



## **UHE SANTO ANTÔNIO NO RIO MADEIRA**

Síntese dos resultados dos perfis verticais realizados  
durante o enchimento e estabilização da  
UHE Santo Antônio no rio Madeira

MARÇO 2013





## ÍNDICE

1 -	Apresentação .....	1/18
2 -	Métodos .....	1/18
3 -	Resultados .....	2/18
3.1 -	Igarapé Jatuarana .....	2/18
3.2 -	rio Jaci-paraná .....	5/18
3.3 -	Rio Madeira .....	8/18
3.4 -	Igarapé Ceará .....	11/18
3.5 -	Igarapé Teotônio .....	14/18
4 -	Considerações Finais .....	17/18
5 -	Referências .....	18/18



## 1 - APRESENTAÇÃO

Atendendo à condicionante 2.15 da LO 1044/2011, concedida pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), foi realizado, durante as fases de enchimento e estabilização do reservatório da UHE Santo Antônio no rio Madeira, um monitoramento intensivo da qualidade da água nos tributários Jaci-Paraná, Jatuarana I, Ceará e Teotônio, além do rio Madeira em estação próxima à barragem. Este monitoramento consistiu na realização de medições diárias em perfil de profundidade de parâmetros básicos, como pH, oxigênio dissolvido, temperatura da água, condutividade elétrica e turbidez.

Os resultados foram apresentados por meio de relatórios semanais, mensais e consolidados, além de pareceres técnicos (por exemplo, "Parecer sobre ocorrência de processos de desestratificação da coluna d'água do igarapé Ceará durante o Enchimento do reservatório da UHE Santo Antônio do rio Madeira" - 2382-00-PTC-RL-0002-00 de 28/05/2012). Esse documento apresenta uma síntese da consolidação dos principais resultados obtidos nos períodos de enchimento, estabilização e parte da operação do reservatório.

## 2 - MÉTODOS

Os perfis foram realizados utilizando uma sonda multiparâmetros modelo YSI-9620. Medições de temperatura da água, pH, oxigênio dissolvido, saturação de oxigênio, condutividade elétrica e turbidez foram realizadas a cada 10 centímetros da coluna d'água. As medições foram feitas sempre ao longo do dia, de modo que nenhum resultado apresentado contempla medições realizadas no período noturno.

Os perfis verticais foram realizados entre setembro de 2011 e janeiro de 2013 em cinco estações de coleta: CEA e CEA.01 (igarapé Ceará), JAC.01 (rio Jaci-Paraná), MON.01 (rio Madeira, a montante da barragem) e JAT I (igarapé Jatuarana I). A frequência da realização dos perfis iniciou-se diária nas estações JAC.01, MON.01 e JAT I e TEO, ao passo que nas estações CEA, e CEA.01 a frequência iniciou-se semanal. A partir de julho de 2012 com o fim da estabilização a frequência de amostragem foi reduzindo progressivamente para três vezes por semana, semanal e enfim 2 vezes por mês em novembro de 2012.

## 3 - RESULTADOS

### 3.1 - IGARAPÉ JATUARANA

Os perfis verticais do igarapé Jatuarana mostram claramente como a profundidade aumentou neste igarapé com o enchimento do reservatório, que foi iniciado em setembro de 2011 e terminado em janeiro de 2012. Inicialmente, o igarapé Jatuarana apresentava coluna d'água totalmente misturada, sem formação de estratos com diferentes temperaturas. Entretanto, a partir de janeiro de 2012, quando foi terminado o enchimento do reservatório, começaram a ser observadas temperaturas mais elevadas nas camadas superficiais. A partir de agosto de 2012, a estratificação térmica foi intensificada, estendendo-se até as camadas mais profundas (Figura 3-1). Os resultados dos perfis térmicos indicam que o igarapé Jatuarana passou a apresentar características lênticas com a formação do reservatório.

Em relação ao oxigênio dissolvido, foi observado um padrão de estratificação inverso entre janeiro e abril de 2012, com a camada superficial permanecendo com concentrações mais baixas que as camadas mais profundas. Entre abril e maio, houve mistura total da massa d'água, o que foi corroborado pelos perfis térmicos, com homogeneização das concentrações ao longo do perfil vertical. A partir de agosto de 2012, o igarapé Jatuarana passou a apresentar perfil clinogrado clássico, havendo diminuição do oxigênio dissolvido com o aumento da profundidade, o que é uma característica típica de ambientes lênticos (Figura 3-2). Embora os resultados apontem para a persistência de um hipolímnio anóxico no igarapé Jatuarana após a formação do reservatório, as camadas superficiais bem oxigenadas constituem refúgio para a fauna aeróbia.

O pH permaneceu próximo à neutralidade ao longo da maior parte do tempo e não apresentou estratificação vertical, embora tenha havido variação sazonal (Figura 3-3). A turbidez também não apresentou muita variação vertical, com exceção do período entre janeiro e abril de 2012. Durante esses meses, as camadas mais profundas apresentaram maior turbidez, com valores semelhantes aos registrados no rio Madeira, ao passo que as camadas superficiais apresentaram valores inferiores e semelhantes aos naturalmente encontrados no igarapé Jatuarana (Figura 3-4).

A condutividade elétrica variou sazonalmente, mas não houve variação vertical. Inicialmente, os valores foram inferiores a 20  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , valor tipicamente observado no igarapé Jatuarana, que é um rio de águas claras, antes do enchimento (Figura 3-5). Após o enchimento, no entanto, houve

aumento da condutividade, que passou a ser superior a 50  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , valor tipicamente observado no rio Madeira, que é um rio de águas brancas, antes do enchimento. Esses resultados mostram que, a partir do enchimento, a água presente na estação de monitoramento do igarapé Jatuarana (JAT I) é predominantemente proveniente do rio Madeira.

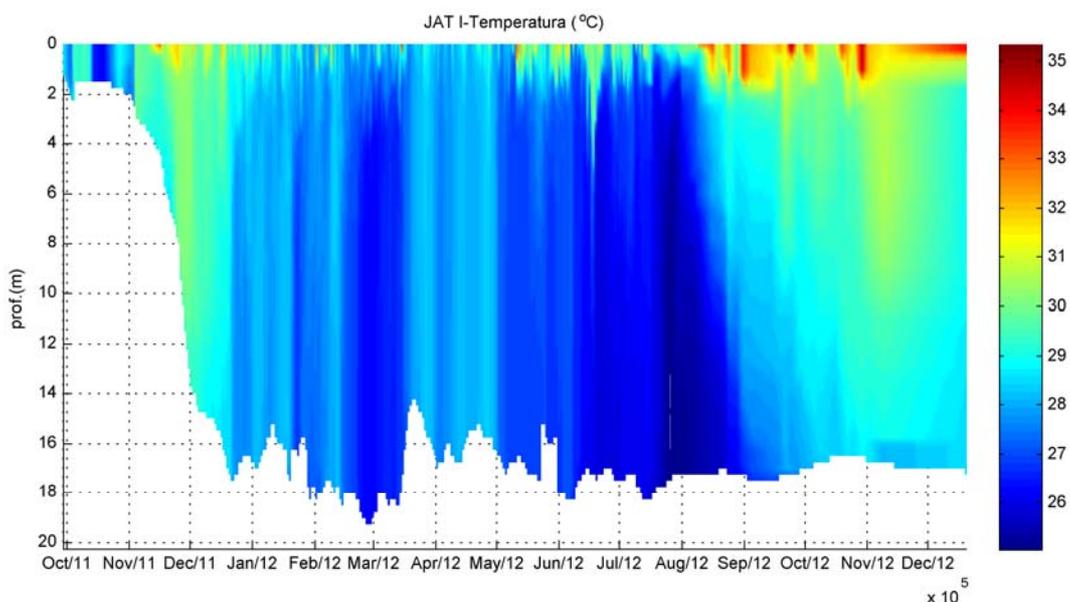


Figura 3-1 - Perfis verticais de temperatura da água do igarapé Jatuarana I (Estação JAT I) medidos entre outubro de 2011 e dezembro de 2012.

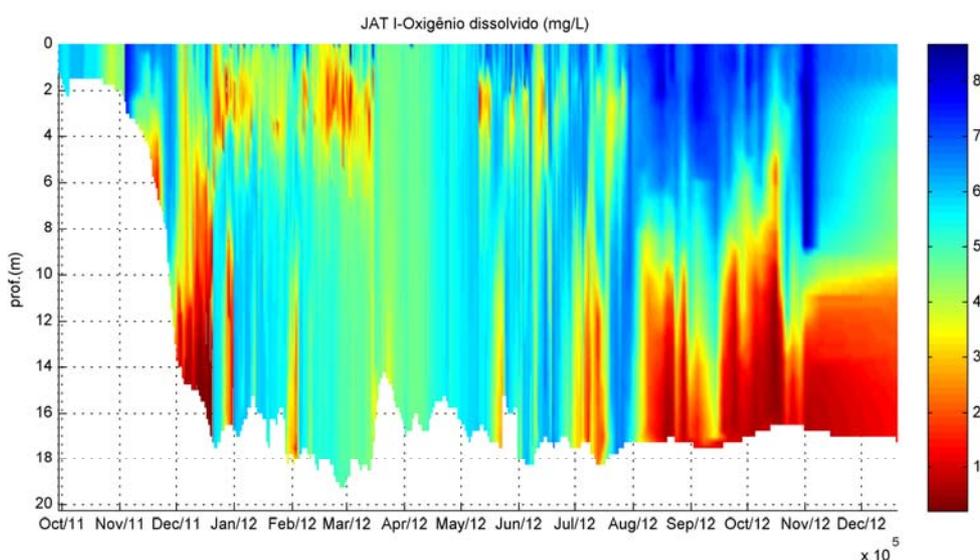


Figura 3-2 - Perfis verticais de oxigênio dissolvido do igarapé Jatuarana I (Estação JAT I) medidos entre outubro de 2011 e dezembro de 2012.

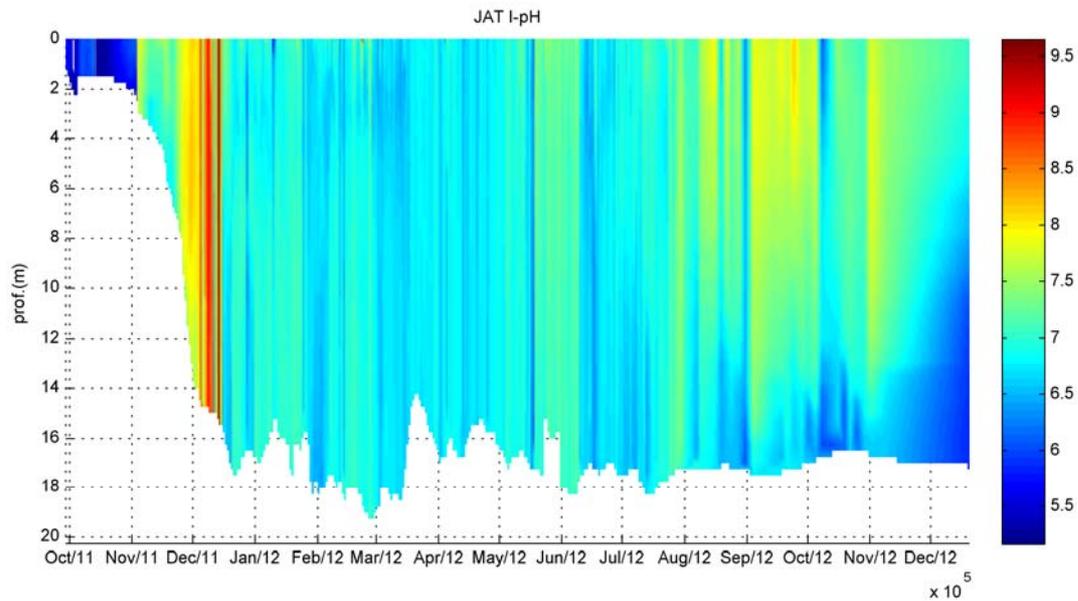


Figura 3-3 - Perfis verticais de pH do igarapé Jatuarana I (Estação JAT I) medidos entre outubro de 2011 e dezembro de 2012.

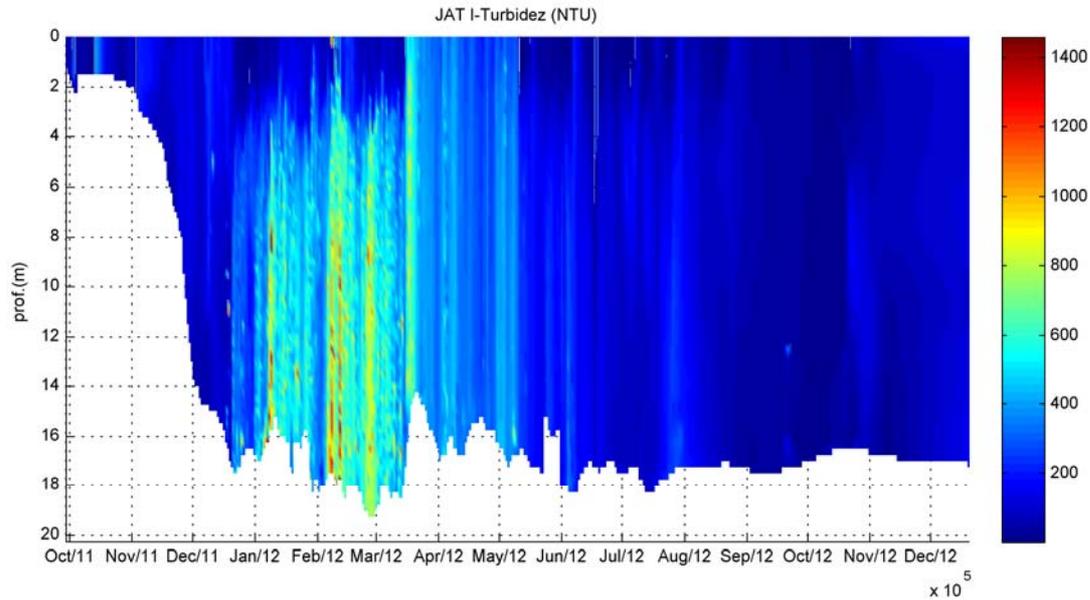


Figura 3-4 - Perfis verticais de turbidez do igarapé Jatuarana I (Estação JAT I) medidos entre outubro de 2011 e dezembro de 2012.

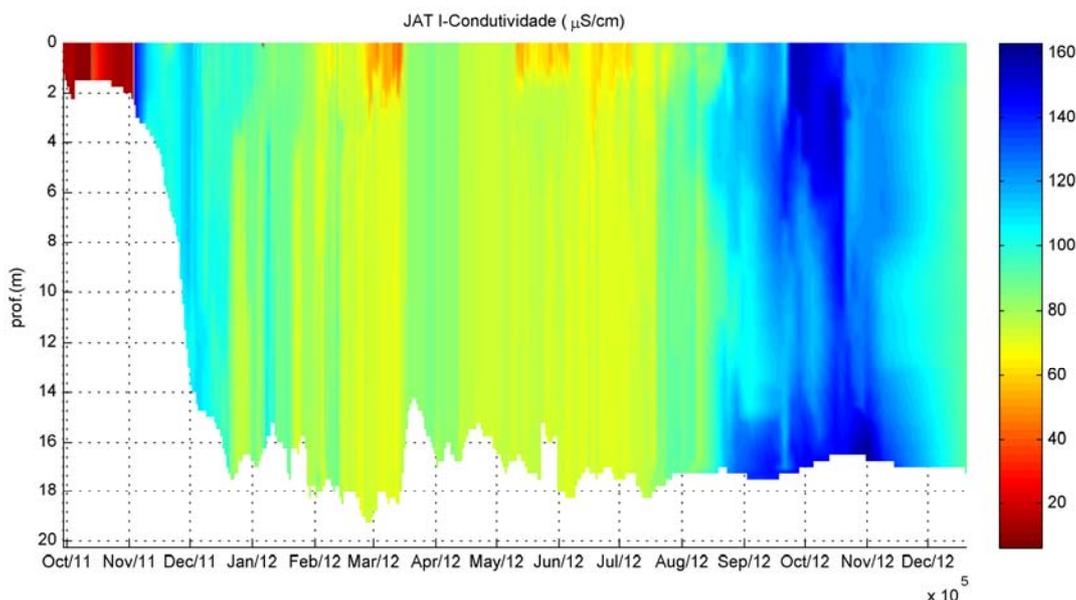


Figura 3-5 - Perfis verticais de condutividade elétrica do igarapé Jatuarana I (Estação JAT I) medidos entre outubro de 2011 e dezembro de 2012.

### 3.2 - RIO JACI-PARANÁ

Os dados de perfil térmico do rio Jaci-Paraná evidenciaram uma coluna d'água termicamente homogênea até o fim de julho de 2012. A partir de agosto de 2012, no entanto, houve formação de estratificação térmica bem definida, com temperaturas mais elevadas nos estratos superficiais. Essa é uma característica típica de ambientes lânticos.

As concentrações de oxigênio dissolvido apresentaram perfil ortogrado até o fim de agosto de 2012, com uniformidade nas concentrações no perfil vertical. A partir de agosto de 2012, o rio Jaci-Paraná passou a apresentar perfil clinogrado clássico, havendo diminuição do oxigênio dissolvido com o aumento da profundidade, situação que persistiu até novembro de 2012. Em todas essas ocasiões a maior parte da coluna d'água apresentou altas concentrações de oxigênio.

O pH apresentou-se levemente ácido na maior parte do tempo, com pouca variação vertical. Os perfis verticais apontam baixa turbidez na maior parte do tempo, com manchas específicas em determinados períodos, como julho e agosto e após novembro de 2012. Nesses meses, houve aumento a turbidez no fundo, o que pode ser resultado da entrada de água proveniente do rio Madeira. Os perfis de condutividade elétrica foram bastante semelhantes aos de turbidez, corroborando a hipótese de que nos casos em que ocorreram maiores valores houve entrada de água do rio Madeira.

Síntese dos resultados dos perfis verticais realizados durante o enchimento e estabilização da UHE Santo Antônio no rio Madeira

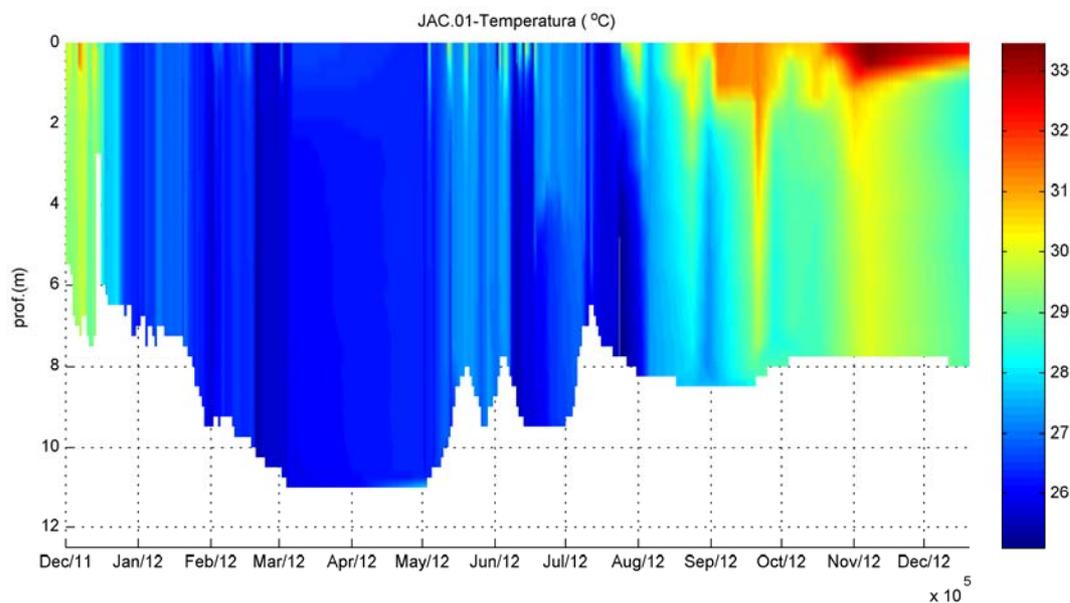


Figura 3-6 - Perfis verticais de temperatura da água do rio Jaci-Paraná (estação JAC.01) medidos entre dezembro de 2011 e dezembro de 2012.

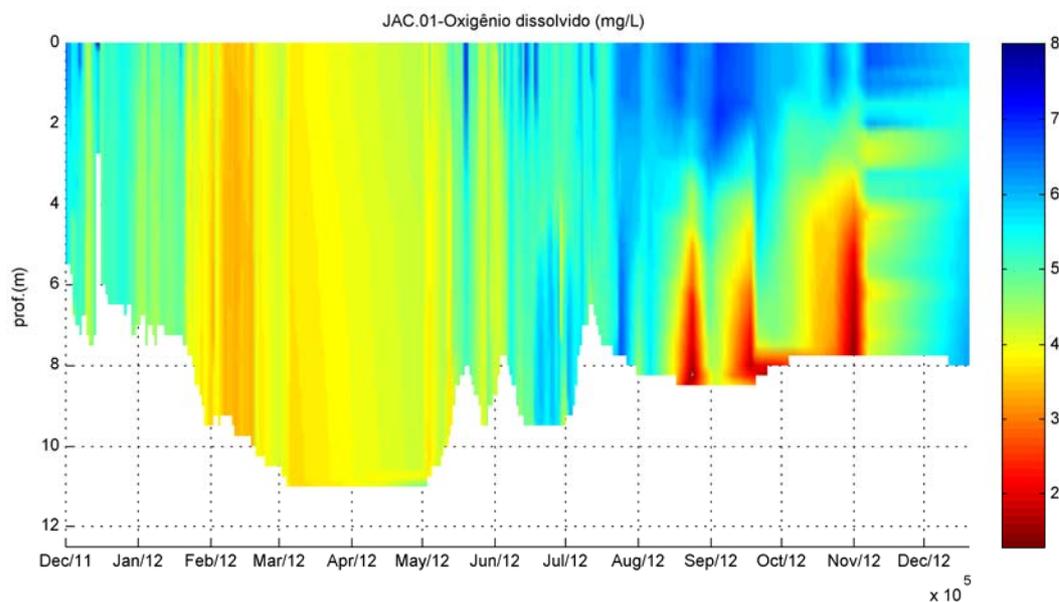


Figura 3-7 - Perfis verticais de oxigênio dissolvido do rio Jaci-Paraná (estação JAC.01) medidos entre dezembro de 2011 e dezembro de 2012.

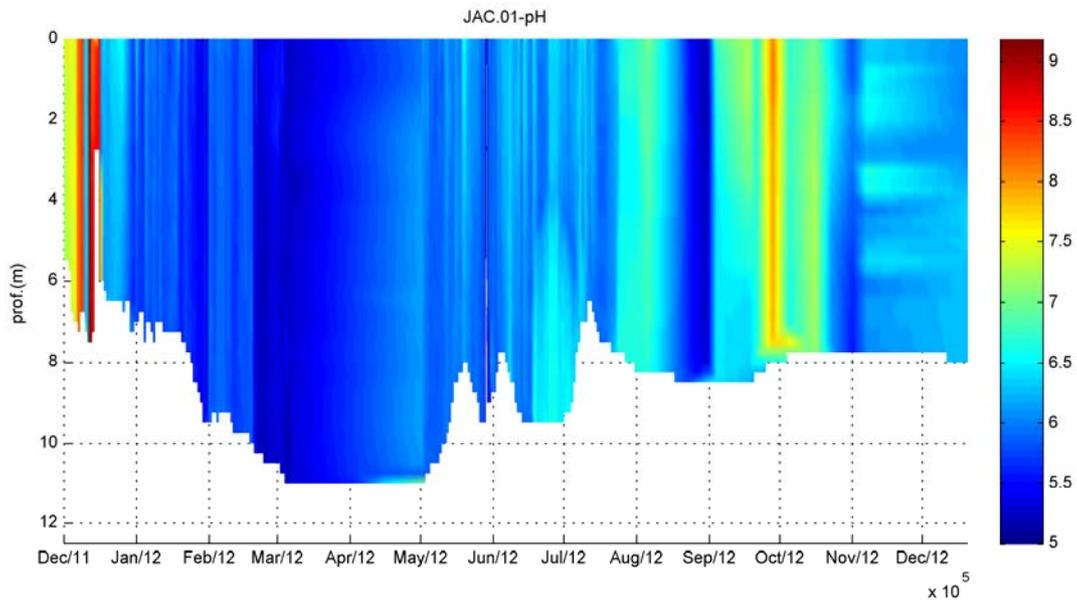


Figura 3-8 - Perfis verticais de pH do rio Jaci-Paraná (estação JAC.01) medidos entre dezembro de 2011 e dezembro de 2012.

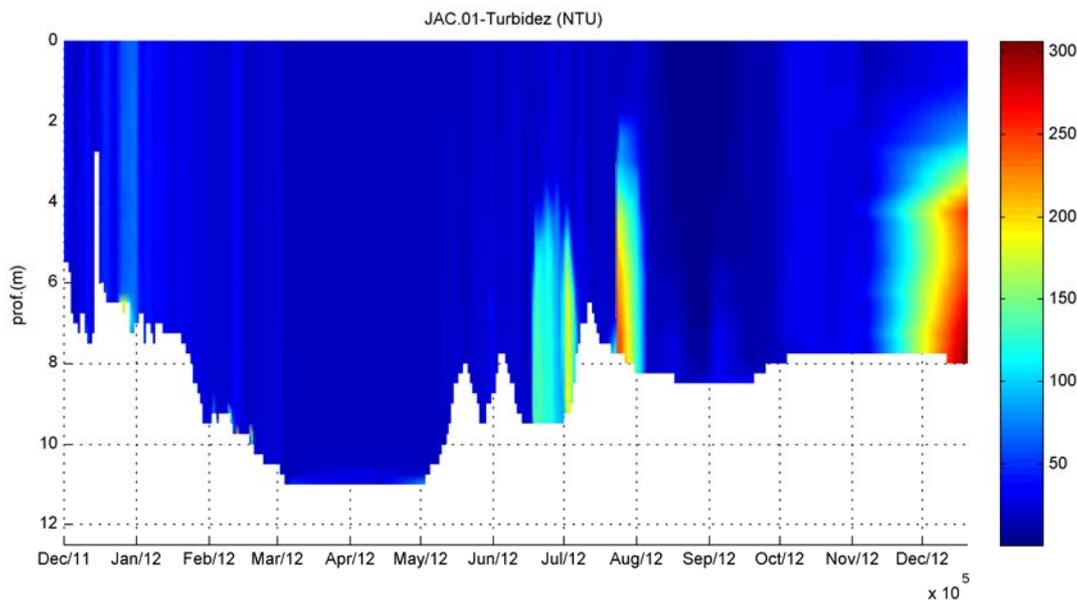


Figura 3-9 - Perfis verticais de turbidez do rio Jaci-Paraná (estação JAC.01) medidos entre dezembro de 2011 e dezembro de 2012.

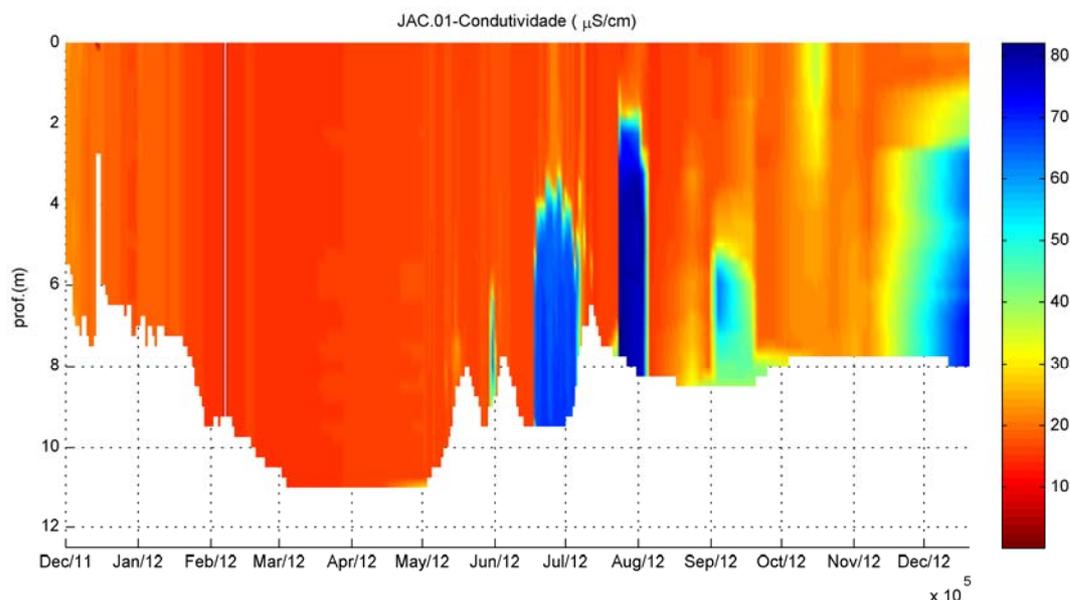


Figura 3-10 - Perfis verticais de condutividade elétrica do rio Jaci-Paraná (estação JAC.01) medidos entre dezembro de 2011 e dezembro de 2012.

### 3.3 - RIO MADEIRA

Na estação de monitoramento do rio Madeira, os perfis térmicos evidenciaram uma coluna d'água termicamente homogênea até o fim de julho de 2012. A partir de agosto de 2012, no entanto, houve formação de estratificação térmica, com temperaturas mais elevadas nos estratos superficiais. A formação de estratificação térmica nesse período pode estar associada à menor vazão afluente no reservatório, o que aumenta a estabilidade térmica. Durante o período de águas altas, que tem seu pico em março/abril, a coluna d'água tende a ficar novamente desestratificada, como observado nos meses correspondentes ao período de águas altas em 2012.

Os perfis de oxigênio dissolvido mostram que as condições de oxigenação no canal central do rio Madeira mantiveram-se boas durante toda a fase de estabilização, com valores superiores a 5 mg/L. As concentrações de oxigênio apresentaram perfil ortogrado, com concentrações uniformes ao longo de toda a coluna d'água.

O pH manteve-se próximo ao neutro e sem variação vertical. Em relação à turbidez e à condutividade elétrica, os valores mantiveram-se relativamente constantes verticalmente.

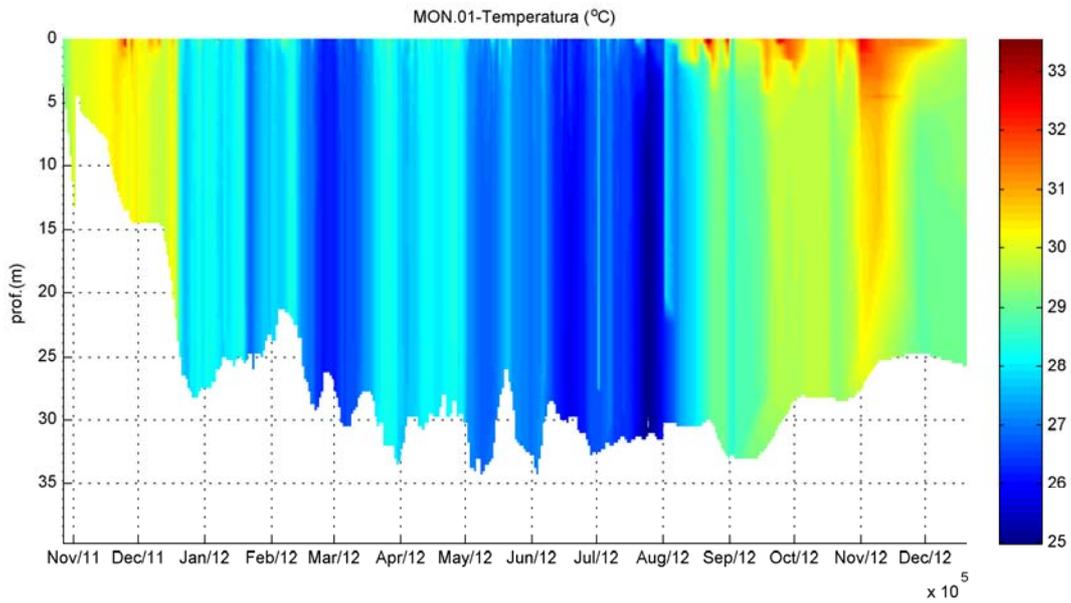


Figura 3-11 - Perfis verticais de temperatura da água do rio Madeira próximo à barragem (estação MON.01) medidos entre novembro de 2011 e dezembro de 2012.

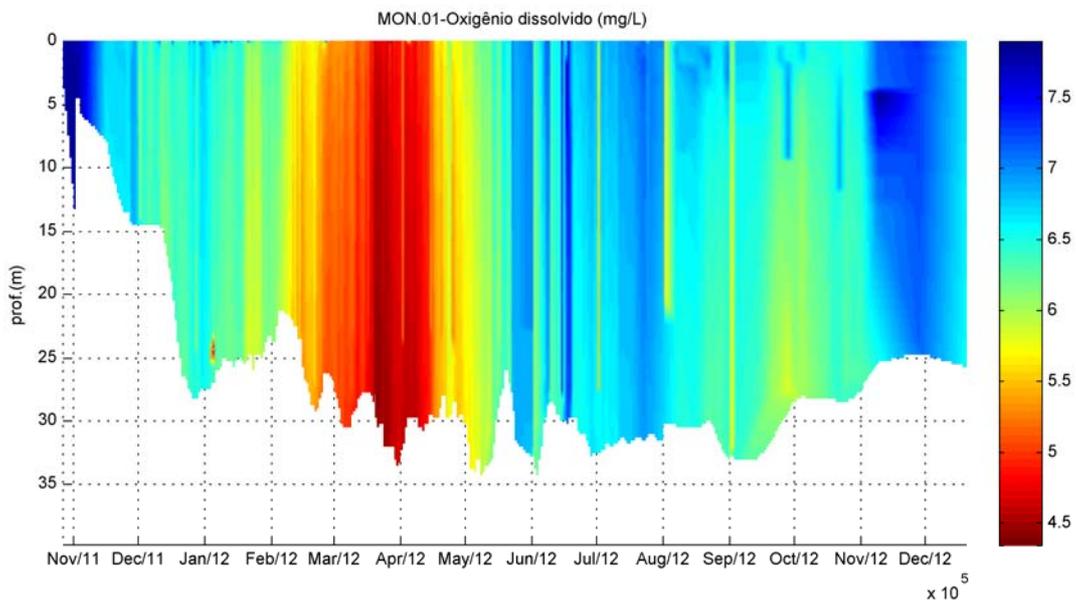


Figura 3-12 - Perfis verticais de oxigênio dissolvido do rio Madeira próximo à barragem (estação MON.01) medidos entre novembro de 2011 e dezembro de 2012.

Síntese dos resultados dos perfis verticais realizados durante o enchimento e estabilização da UHE Santo Antônio no rio Madeira

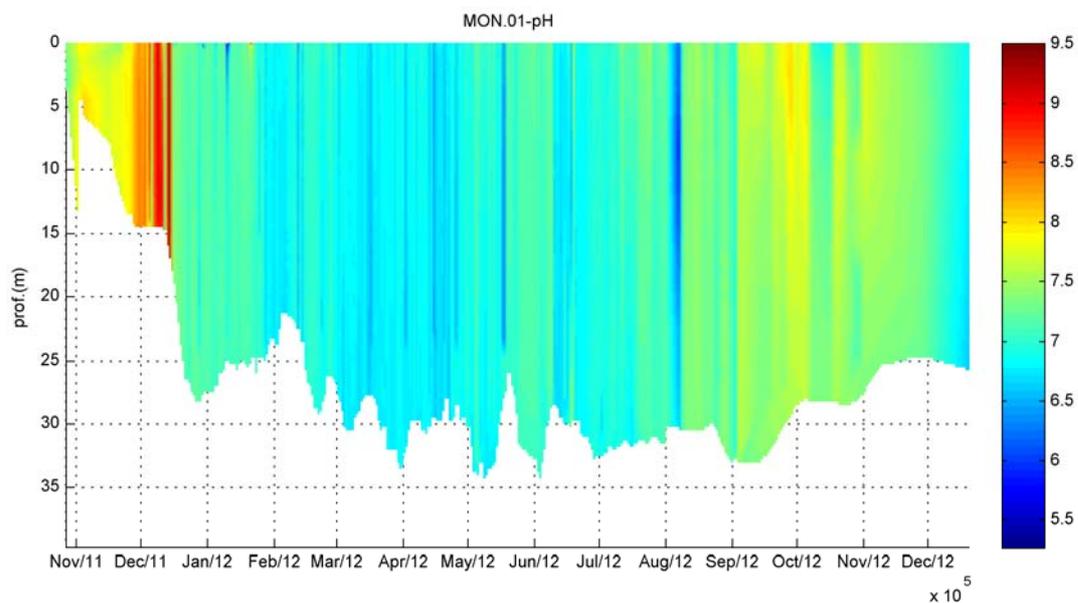


Figura 3-13 - Perfis verticais de pH do rio Madeira próximo à barragem (estação MON.01) medidos entre novembro de 2011 e dezembro de 2012.

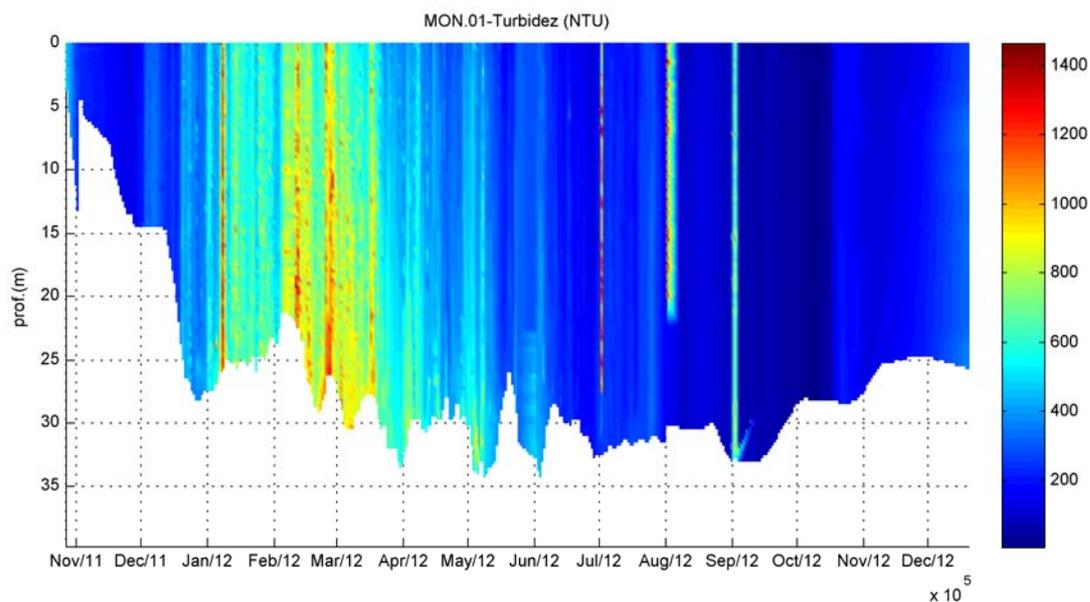


Figura 3-14 - Perfis verticais de turbidez do rio Madeira próximo à barragem (estação MON.01) medidos entre novembro de 2011 e dezembro de 2012.

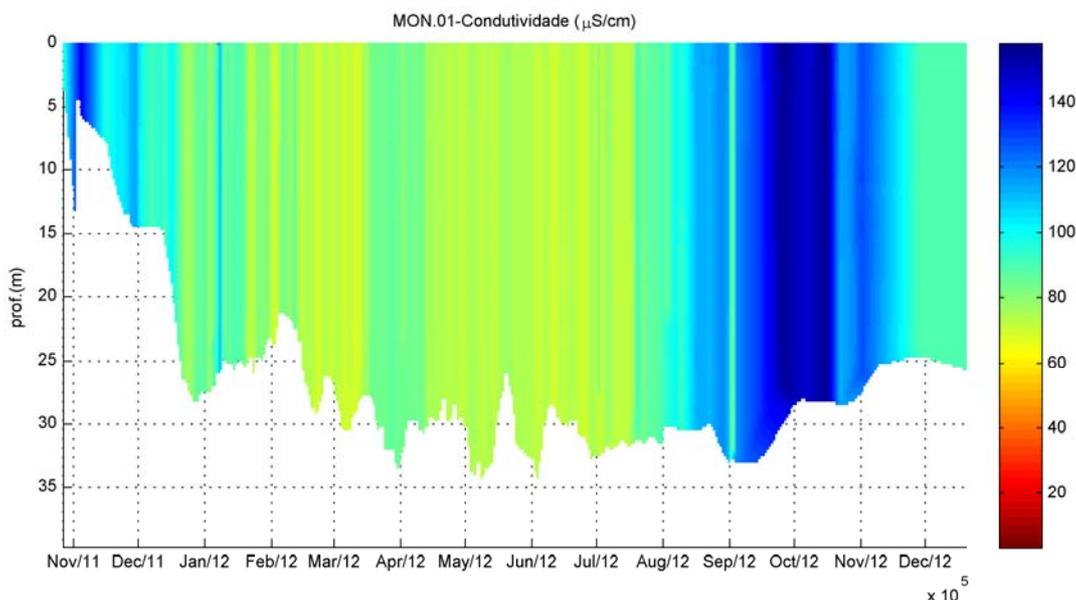


Figura 3-15 - Perfis verticais de condutividade elétrica do rio Madeira próximo à barragem (estação MON.01) medidos entre novembro de 2011 e dezembro de 2012.

### 3.4 - IGARAPÉ CEARÁ

Na estação de monitoramento CEA, os perfis térmicos evidenciaram uma coluna d'água termicamente homogênea até o fim de julho de 2012. A partir de agosto de 2012, no entanto, houve formação de estratificação térmica, com temperaturas mais elevadas nos estratos superficiais, o que é uma característica típica de ambientes lânticos. A formação de estratificação térmica nesse período pode estar associada à menor vazão afluente no reservatório, o que aumenta a estabilidade térmica.

As concentrações de oxigênio dissolvido apresentaram perfil ortogrado até o fim de agosto de 2012, com uniformidade vertical nas concentrações. No mês de janeiro houve hipoxia ao longo de toda a coluna d'água, o que pode estar ligado à decomposição do material orgânico inundado com o barramento. A partir de agosto até novembro de 2012, a estação CEA passou a apresentar perfil clinogrado clássico, havendo diminuição do oxigênio dissolvido com o aumento da profundidade. Os resultados indicaram a ocorrência de um fundo hipóxico no igarapé Ceará entre agosto e outubro de 2012, entretanto as camadas superficiais foram mais abundantes e bem oxigenadas em todas as ocasiões.

O pH apresentou-se levemente ácido na maior parte do tempo, com pouca variação vertical. Os perfis verticais apontam baixa turbidez ao longo da maior parte do tempo, com exceção do mês de março de 2012, quando houve elevada turbidez ao longo de toda a coluna d'água. Isso pode estar relacionado à entrada de água do rio Madeira. A condutividade elétrica variou sazonalmente, mas houve relativa homogeneidade vertical.

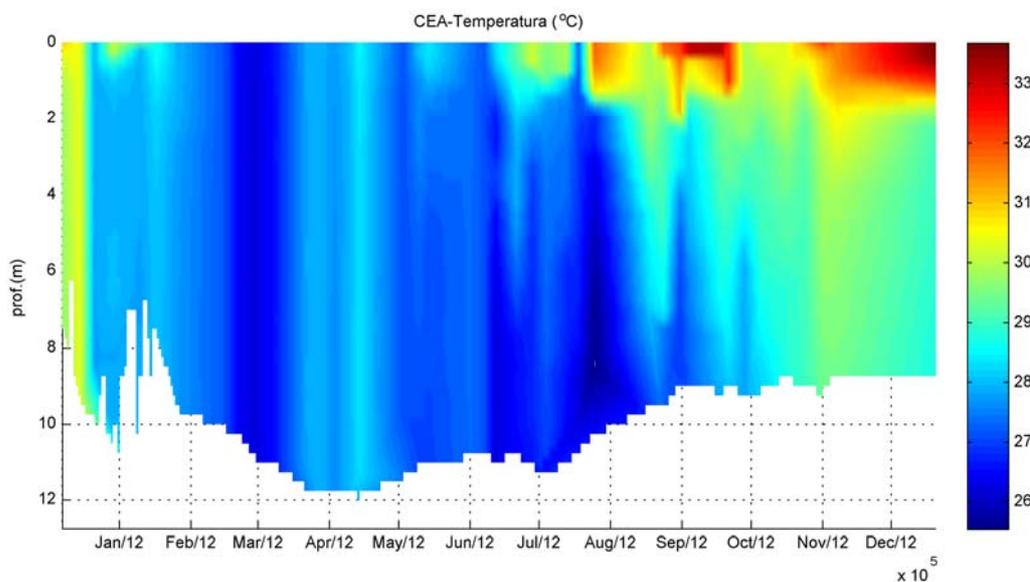


Figura 3-16 - Perfis verticais de temperatura da água do igarapé Ceará (estação CEA) medidos entre dezembro de 2011 e dezembro de 2012.

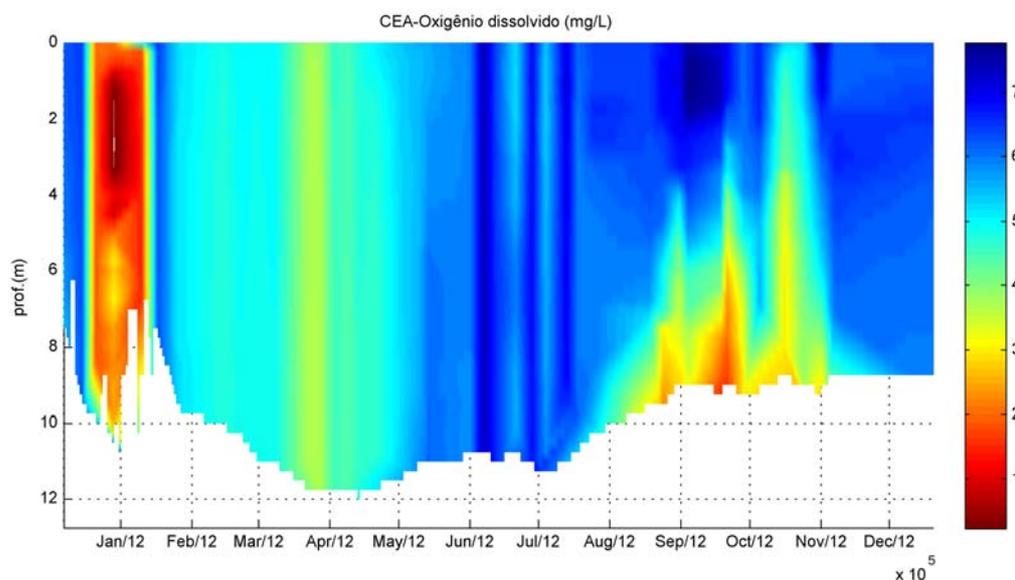


Figura 3-17 - Perfis verticais de oxigênio dissolvido do igarapé Ceará (estação CEA) medidos entre dezembro de 2011 e dezembro de 2012.

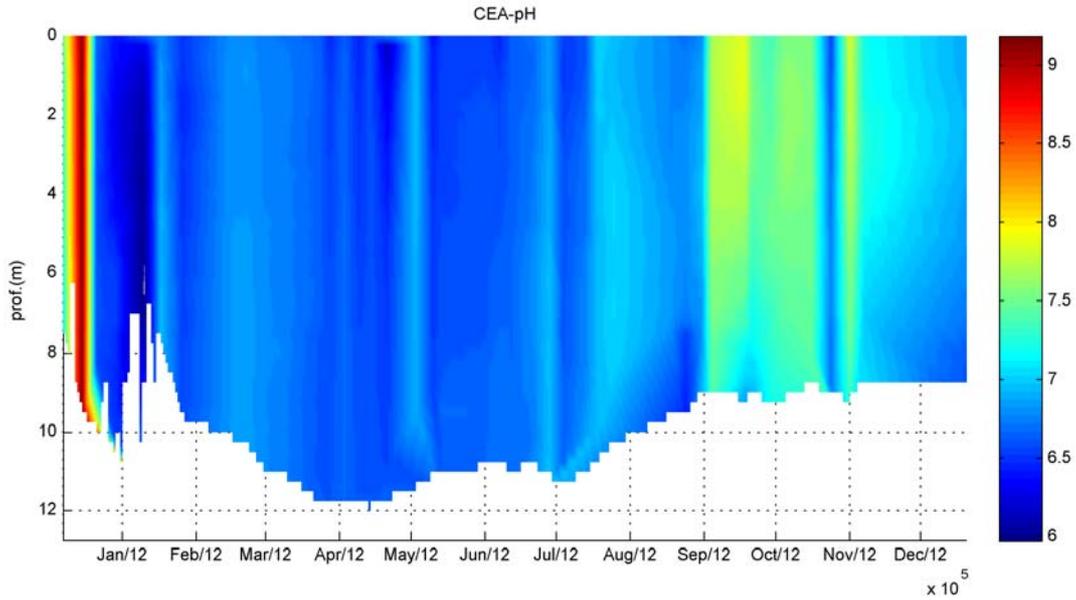


Figura 3-18 - Perfis verticais de pH do igarapé Ceará (estação CEA) medidos entre dezembro de 2011 e dezembro de 2012.

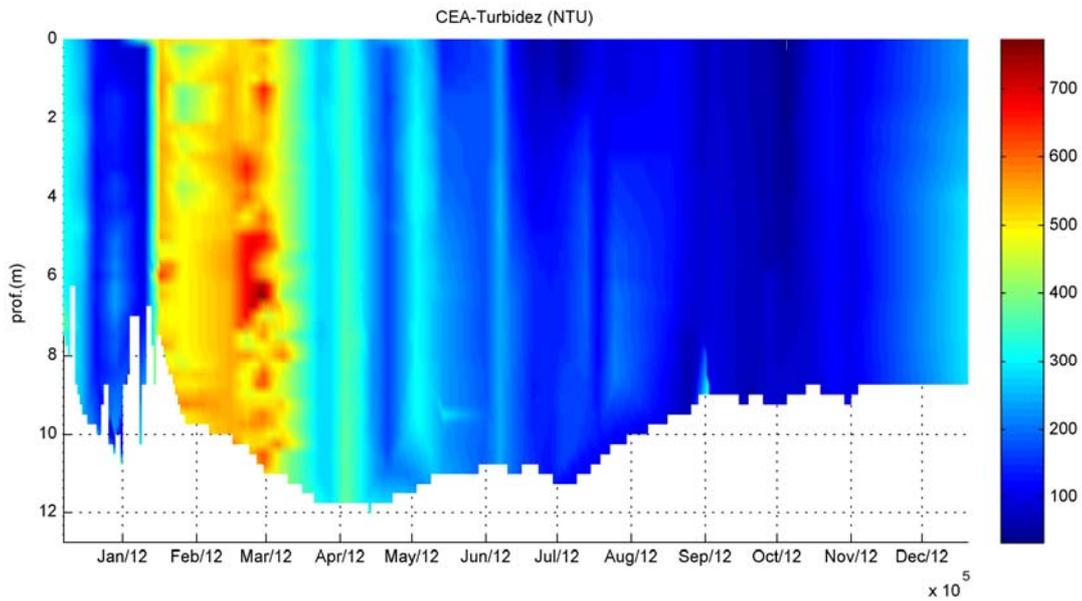


Figura 3-19 - Perfis verticais de turbidez do igarapé Ceará (estação CEA) medidos entre dezembro de 2011 e dezembro de 2012.

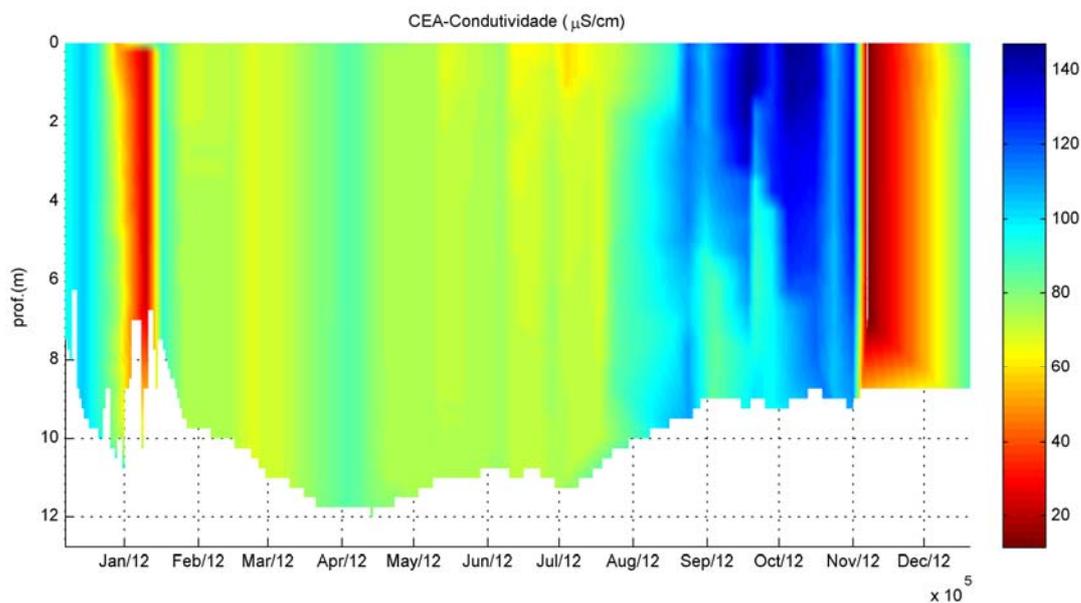


Figura 3-20 - Perfis verticais de condutividade elétrica do igarapé Ceará (estação CEA) medidos entre dezembro de 2011 e dezembro de 2012.

### 3.5 - IGARAPÉ TEOTÔNIO

No igarapé Teotônio, os perfis térmicos evidenciaram uma coluna d'água termicamente homogênea até o fim de julho de 2012. A partir de agosto de 2012, no entanto, houve formação de estratificação térmica, com temperaturas mais elevadas nos estratos superficiais. A formação de estratificação térmica nesse período pode estar associada à menor vazão afluente no reservatório, o que aumenta a estabilidade térmica.

As concentrações de oxigênio dissolvido apresentaram perfil ortogrado até o fim de agosto de 2012, com uniformidade vertical nas concentrações. A partir de agosto até novembro de 2012, o igarapé Teotônio passou a apresentar perfil clinogrado clássico, havendo diminuição do oxigênio dissolvido com o aumento da profundidade. Os padrões de estratificação do igarapé Teotônio foram bastante semelhantes aos do igarapé Ceará (CEA).

O pH variou entre levemente básico e levemente ácido, com pouca variação vertical. Os perfis verticais apontam baixa turbidez ao longo da maior parte do tempo, com valores uniformes verticalmente. A condutividade elétrica também variou pouco verticalmente.

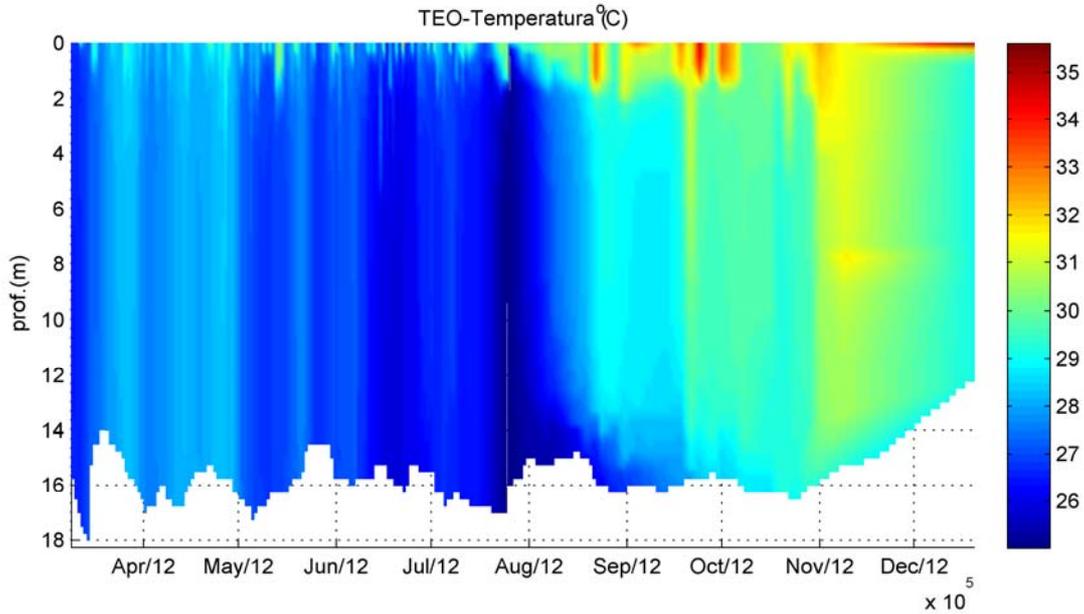


Figura 3-21 - Perfis verticais de temperatura da água do igarapé Teotônio (estação TEO) medidos entre março de 2012 e dezembro de 2012.

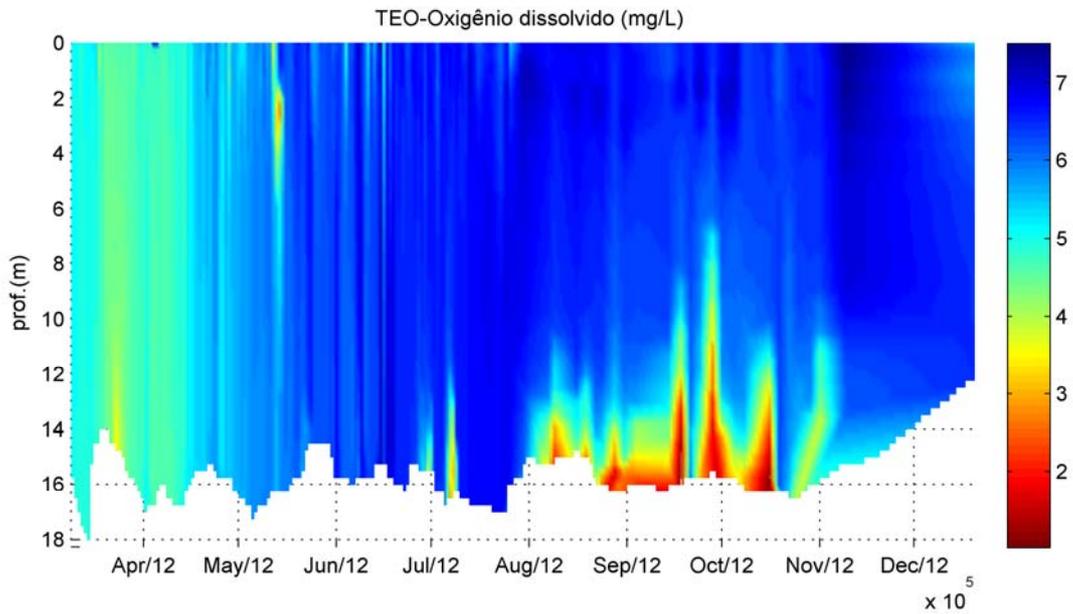


Figura 3-22 - Perfis verticais de oxigênio dissolvido do igarapé Teotônio (estação TEO) medidos entre março de 2012 e dezembro de 2012.

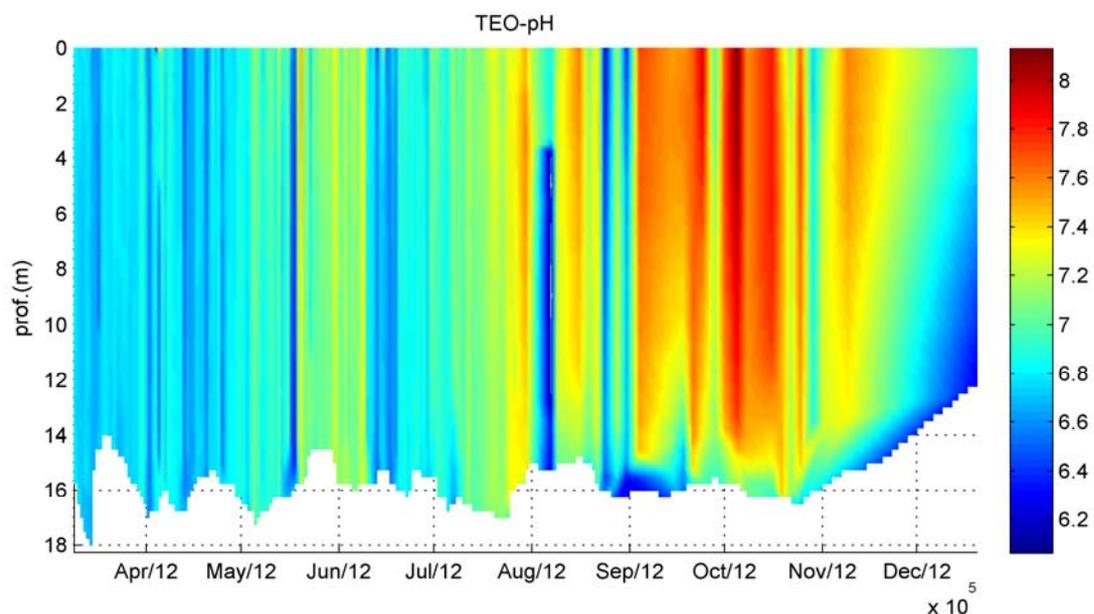


Figura 3-23 - Perfis verticais de pH do igarapé Teotônio (estação TEO) medidos entre março de 2012 e dezembro de 2012.

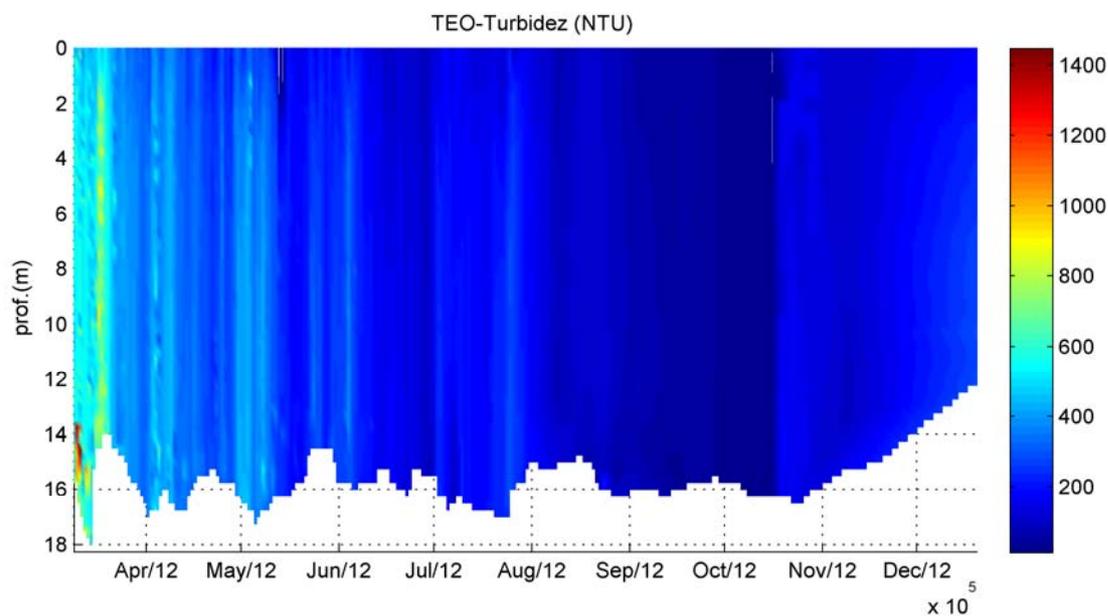


Figura 3-24 - Perfis verticais de turbidez do igarapé Teotônio (estação TEO) medidos entre março de 2012 e dezembro de 2012.

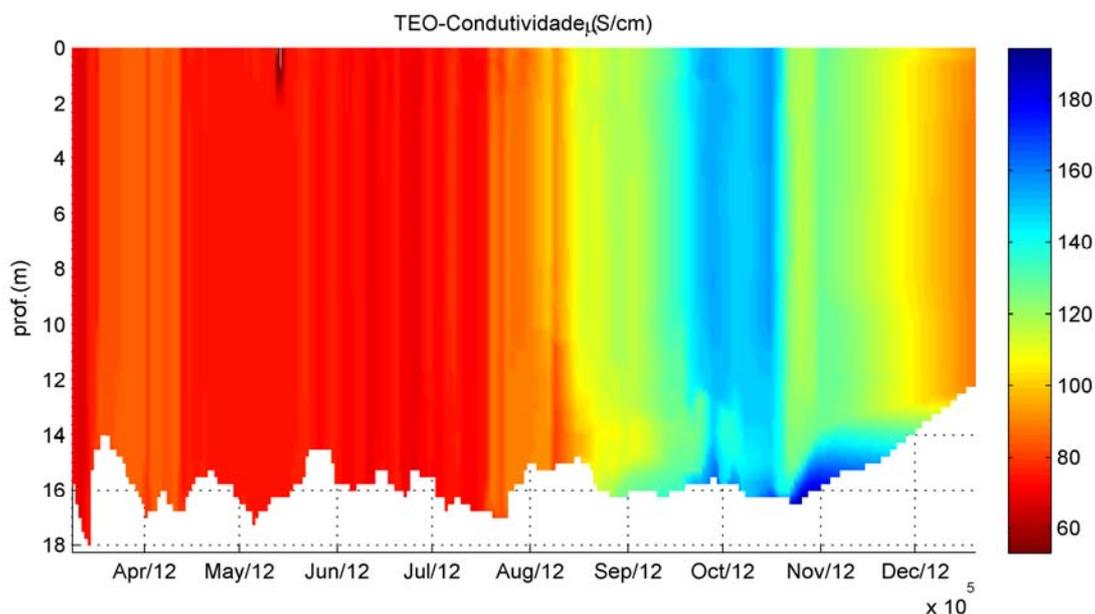


Figura 3-25 - Perfis verticais de condutividade elétrica do igarapé Teotônio (estação TEO) medidos entre março de 2012 e dezembro de 2012.

## 4 - Considerações Finais

Os perfis verticais realizados ao longo das fases de enchimento e estabilização do reservatório informam com bastante detalhamento as modificações ocorridas nos ambientes monitorados. Em geral, observou-se que as estações amostradas apresentaram ausência de estratificação térmica ou formação de estratos com temperaturas mais elevadas restritos somente as camadas superficiais até o fim de julho de 2012. A partir de agosto de 2012 foram observadas estratificações térmicas mais bem definidas, com formação de perfil clinogrado de oxigênio dissolvido na maior parte das estações, exceto em MON.01, onde a uniformidade vertical das concentrações de oxigênio foi mantida. Desta forma, é possível traçar um padrão geral relacionado aos perfis térmicos das estações monitoradas: formação de estratificação em períodos de vazante e águas baixas (junho a dezembro) e desestratificação da coluna d'água durante os períodos de enchente e águas altas (janeiro a maio). A formação de estratificação térmica durante os períodos de menor nível da água pode estar associada à menor vazão afluente no reservatório, o que aumenta a estabilidade térmica. Em contrapartida, quando há maior vazão afluente, como nos períodos de enchente e águas altas, a estabilidade térmica é rompida.

A formação de estratificação térmica é um efeito esperado em reservatórios, já que estabilidade da água favorece a formação de estratos com diferentes temperaturas, os quais criam barreiras para a difusão de gases entre as camadas mais profundas e as camadas superiores. A formação ambientes hipóxicos em alguns períodos no fundo das estações não foram relacionadas à mortalidade de organismos aeróbios, uma vez que na maior parte das vezes as camadas superficiais permanecem oxigenadas, fornecendo refúgio para esses organismos. Em reservatórios, períodos de estiagem de fato compreendem as épocas mais favoráveis à formação de condições de hipoxia na coluna d'água (Esteves, 2011), corroborando os resultados encontrados para o reservatório da UHE Santo Antônio.

Os padrões observados devem se manter ao longo do tempo de vida do reservatório, com mistura da massa d'água em determinadas ocasiões, como em períodos de maior vazão, e estratificação em períodos com menor vazão. Desta forma, não há justificativa para manter o esforço amostral, sugerindo-se que os perfis sejam feitos trimestralmente pelas coletas do Programa de Monitoramento Limnológico e de Macrófitas Aquáticas fornecerão indicativos dos padrões de variação vertical nessas estações.

## 5 - REFERÊNCIAS

Esteves, F.A. Fundamentos de Limnologia. 3 ed, Rio de Janeiro, Interciência. 790 pp. 2011.