

The text that follows is a TRANSLATION
O texto que segue é uma TRADUÇÃO

Emissões de gases de efeito estufa de um reservatório hidrelétrico (a represa de Tucuruí) e suas implicações para política energética

Please cite the original article:
Favor citar o trabalho original:

Fearnside, P.M. 2002. Greenhouse gas emissions from a hydroelectric reservoir (Brazil's Tucuruí Dam) and the energy policy implications. *Water, Air and Soil Pollution* 133(1-4): 69-96.

doi: 10.1023/A:1012971715668

ISSN: 0049-6979

Copyright: Springer

The original publication is available at:
O trabalho original está disponível em:

<http://www.springer.com/environment/journal/11270>

Disponível em: <http://philip.inpa.gov.br>

Emissões de Gases de Efeito Estufa de um Reservatório Hidrelétrico (a Represa de Tucuruí) e suas Implicações para Política Energética

Philip M. Fearnside

Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia-INPA

Av. André Araújo, 2936

69067-375 Manaus-Amazonas

e-mail pmfearn@inpa.gov.br

Tradução de:

Fearnside, P.M. 2002. Greenhouse gas emissions from a hydroelectric reservoir (Brazil's Tucuruí Dam) and the energy policy implications. *Water, Air and Soil Pollution* 133(1-4): 69-96. doi: 10.1023/A:1012971715668

RESUMO

Emissões de gases de efeito estufa de represas são frequentemente retratadas pela indústria hidrelétrica como sendo inexistentes, e, geralmente, tem sido ignoradas em cálculos globais das emissões das mudanças de uso da terra. A represa de Tucuruí apresenta um exemplo importante para debates sobre política de desenvolvimento amazônico e como avaliar a influência sobre o efeito estufa das diferentes opções de energia. Tucuruí é melhor, do ponto de vista de densidade energética e, conseqüentemente, das emissões de gases de efeito estufa por unidade de eletricidade, do que a média para represas existentes na Amazônia. Também é melhor do que a média para as represas planejadas que, se todas fossem construídas, inundariam 3% da floresta na Amazônia brasileira. A emissão de gases de efeito estufa de Tucuruí em 1990 é equivalente a $7,0-10,1 \times 10^6$ toneladas de carbono equivalente a CO_2 , uma quantidade substancialmente maior que a emissão de combustível fóssil da cidade de São Paulo. Emissões precisam ser pesadas corretamente em decisões sobre construção de barragens. Embora espera-se que muitas hidrelétricas propostas na Amazônia tenham balanços positivos em comparação com combustíveis fósseis, emissões significativas indicadas pelo atual estudo reduzem os benefícios atribuídos às represas planejadas.

PALAVRAS CHAVE: Amazônia, Florestas tropicais, Gás carbônico, Gás de efeito estufa, Hidrelétricas, Metano, Política de energia, Represas, Reservatórios

I. INTRODUÇÃO

Hidrelétricas são freqüentemente promovidas pelas autoridades governamentais como uma fonte “limpa” de energia, em contraste com termoelétricas (por exemplo, Souza, 1996). Embora a contribuição da queima de combustíveis fósseis para o efeito estufa seja bem conhecida, hidrelétricas não estão livres de impactos. Represas hidrelétricas em áreas de florestas tropicais emitem gases de efeito estufa, tais como gás carbônico (CO_2) e metano (CH_4). A razão impacto/benefício varia muito entre diferentes represas, dependendo da produção de energia. Tucuruí, a represa examinada neste trabalho, tem um saldo mais favorável do que a média das represas existentes e do que a média das represas planejadas na Amazônia brasileira.

Tucuruí serve como um local de prova para os planos do País para desenvolvimento hidrelétrico na Amazônia. A possibilidade de reivindicar crédito de carbono para represas hidrelétricas planejadas surge frequentemente em discussões no Brasil sobre o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, do Protocolo de Kyoto. Emissões de gases de efeito estufa não podem ser ignoradas em discussões desse tipo. Os impactos sociais e ambientais causados por muitas represas são até mesmo mais importantes que as contribuições ao efeito estufa, e tem levado a estes projetos serem questionados como formas de “desenvolvimento limpo” (Fearnside, 2001a). A Represa de Tucuruí oferece um exemplo excelente destes problemas (Fearnside, 1999, 2001b).

O presente trabalho calcula emissões de gases de efeito estufa para Tucuruí para 1990, o ano base para inventários nacionais de emissões de gases de efeito estufa sob a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança de Clima (UN-FCCC). A estimativa inclui emissões de várias fontes de emissão que foram ignoradas em estimativas anteriores para reservatórios amazônicos, tais como a liberação de metano pela água que passa pelo vertedouro e pelas turbinas.

II.) O RESERVATÓRIO DE TUCURUÍ

A represa de Tucuruí foi finalizada em 1984 no Rio Tocantins, um afluente do rio Amazonas localizado no Estado do Pará (Figura 1). A área do reservatório é oficialmente 2.430 km² ao nível operacional normal de 72 m acima do nível médio do mar. Medidas pelo satélite LANDSAT estimaram a área em 2.247 km² em junho de 1989 (INPE, veja Fearnside, 1995, p. 13) e 2.800 km² em julho de 1996 (de Lima *et al.*, 2000). A usina atual (Tucuruí-I) tem 3.960 MW de capacidade instalada. Uma segunda fase (Tucuruí-II) deve dobrar a capacidade instalada para 8.085 MW até 2002 (Brasil, Programa Avança Brasil, 1999).

[Figura 1 aqui]

A represa de Tucuruí foi objeto de um dos 10 estudos focais da Comissão Mundial sobre Barragens, especialmente para a avaliação das emissões de gás de efeito estufa por desenvolvimento hidrelétrico (WCD, 2000). Tucuruí tem o maior reservatório na Amazônia brasileira depois de Balbina (que é frequentemente descartada por autoridades elétricas, como atípico, devido à sua baixa densidade energética). Balbina tem emissões muito altas devido ao seu enorme reservatório em comparação com a capacidade geradora que poderia ser instalada neste local com topografia plana e de baixa vazão (Fearnside, 1995, 1996a; Rosa *et al.*, 1996a). Tucuruí-I (a configuração atual de Tucuruí) tem 1,63 watts (W) de capacidade instalada por m² de superfície de reservatório, considerando que as Centrais Elétricas do Brasil (ELETROBRÁS) calcularam a densidade energética média para todo o potencial hidrelétrico da região amazônica como apenas 1 W/m² (Rosa *et al.*, 1996b, p. 6). Isto se refere à lista completa de represas planejadas no Plano 2010, independente da data planejada de construção (Brasil, ELETROBRÁS, 1987; veja Fearnside, 1995). A cifra equivalente para os 5.537 km² de superfície de água nas quatro represas grandes existentes (cuja capacidade instalada totaliza 4.490 MW) é de 0,81 W/m², ou apenas a metade da densidade energética de Tucuruí-I.

III.) EMISSÕES DO RESERVATÓRIO

A.) EMISSÕES DE DECOMPOSIÇÃO ACIMA DA SUPERFÍCIE D'ÁGUA

Quando florestas tropicais são inundadas por reservatórios, as árvores permanecem em pé, projetando-se fora d'água, com a exceção de pequenas áreas desmatadas perto das barragens. Uma parte significativa da biomassa fica projetada acima da superfície de água e se decompõe aerobicamente. Esta fonte de emissão tem sido ignorada na maioria das discussões do impacto de desenvolvimento hidrelétrico sobre o efeito estufa. Parâmetros para cálculos de emissões acima d'água para o reservatório de Tucuruí são apresentados na Tabela 1.

[Tabela 1 aqui]

B.) EMISSÕES DA SUPERFÍCIE DO RESERVATÓRIO

Vários estudos recentes em reservatórios indicam que as emissões de metano apresentam um grande pico nos primeiros anos depois do enchimento, seguido por um declínio. Com um ano de idade, o reservatório de Petit-Saut, na Guiana francesa, liberou 1.300 mg CH₄/m²/dia da superfície d'água (530 de ebulição e 770 de difusão) (Galy-Lacaux *et al.*, 1997). O reservatório de Curuá-Una, com 21 anos de idade, liberou 66 mg CH₄/m²/dia (16 de difusão e 50 de ebulição) (Duchemin *et al.*, 2000). O Lago de Gatun, no Panamá, com 84 anos de idade liberou 412 mg CH₄/m²/dia (12 de difusão e 400 de ebulição) (Keller & Stallard, 1994). Medidas de emissões de metano específicas para Tucuruí indicam grandes variações espaciais e temporais (Tabela 2).

[Tabela 2 aqui]

Há grandes controvérsias sobre a metodologia usada para calcular emissões de gases por reservatórios. Um funil invertido usado pela Universidade Federal de São Carlos só mede emissões de ebulição (por exemplo, Rosa *et al.*, 1996b,c, 1997a). Câmaras de difusão usadas pelo INPE (Lima & Novo, 1999; Lima *et al.*, 2000) e por estudos realizados pela Universidade de Quebec em Montreal em outros reservatórios amazônicos (Duchemin *et al.*, 2000) captura bolhas e emissões de difusão. No entanto, estas câmaras são menos eficientes que os funis para calcular o componente ebulitivo porque as câmaras fazem coletar uma série de medidas em períodos breves (tipicamente de 15 minutos cada) que podem perder os estouros esporádicos de atividade ebulitiva (Keller & Stallard, 1994). Recentemente um estudo em Tucuruí (idade 14-15 anos) pela Universidade Federal de São Carlos com funis e câmaras de difusão indicou que a ebulição contribuiu apenas 6-16% das emissões totais de superfície de 14,6-205,3 mg CH₄/m²/dia (Matvienko *et al.*, 2000). No reservatório de Curuá-Una (idade 21 anos), Duchemin *et al.* (2000) mediram a ebulição e a difusão e constataram que a ebulição representou 32-81% das emissões totais de superfície de 37,5-80,2 mg CH₄/m²/dia. Em Petit-Saut (idade 1 ano), Galy-Lacaux *et al.* (1997) acharam uma contribuição ebulitiva de 59% em uma emissão de superfície total de 1.300 mg CH₄/m²/dia. No Panamá, em enseadas na margem do Lago Gatun (idade 84 anos), a ebulição contribuiu com 97% dos 400 mg CH₄/m²/dia de emissão média da superfície (Keller & Stallard, 1994). Dado a falta de qualquer proporcionalidade consistente entre ebulição e difusão, apenas as estimativas que incluem ambos a ebulição e a difusão foram usadas no atual estudo (Tabela 2).

A área coberta por macrófitas (principalmente vegetação flutuante como a aguapé, *Eichhornia crassipes*) é um determinante essencial do fluxo de metano. No período de águas altas (14 de agosto de 1988), Novo & Tundisi (1994, p. 149) reportaram que 21% do reservatório de Tucuruí estava coberto por macrófitas a partir de imagens de LANDSAT. Baseado nos dados e suposições de Novo & Tundisi (1994) para o período de alto nível d'água, e nas presunções destes autores para o resto do ano, a área média ocupada por macrófitas durante o ciclo anual era 286,4 km², ou 13,1% da área média de 2.188 km² do reservatório que pode ser computado para o mesmo ano. Em Tucuruí, macrófitas explodiram no primeiro ano depois do enchimento e depois morreram quando o nível de nutrientes na água abaixar. Em 1986 (dois anos depois de fechar) a área de macrófitas foi calculada em 620 km² (Brasil, ELETRONORTE, 1988a, p. 94), ou aproximadamente 26% da área do reservatório quando cheio. Um estudo feito por Lima *et al.* (2000) para junho-agosto (período de nível de águas altas) mostra que a cobertura de macrófitas diminuiu de 39% em 1986 para 11% em 1994, o que parece ser um nível estável. A cobertura teria sido 21% em 1988, que corresponde ao cenário na Tabela 3. Crescimento explosivo inicial seguido por declínio também foi o padrão para macrófitas em outros reservatórios tropicais, tais como Brokopondo no Suriname (Leentvaar, 1966), Guri na Venezuela (Vilarrubia & Cova, 1993) e Balbina (Fearnside, 1989; Walker *et al.*, 1999), Curuá-Una (Junk *et al.*, 1981) e Samuel (Bohdan Matvienko, declaração pública, 24 de fevereiro de 2000) no Brasil.

[Tabela 3 aqui]

Em sete estudos em lagos de várzea, áreas com macrófitas tiveram 3,25 vezes mais emissões de CH₄ que água aberta (veja Fearnside, 1995, p. 15). Na UHE Tucuruí em setembro de 1992, uma área com macrófitas apresentou 1.056 vezes mais emissão de CH₄ por ebulição que água aberta no canal do rio, 0,8 vezes a emissão de água aberta com árvores em pé, e 5,8 vezes a emissão de 1992 em água aberta em uma enseada sem árvores em pé (Rosa *et al.*, 1996c,

p. 150). As maiores áreas de macrófitas nos primeiros anos de um reservatório contribuem para um maior pulso de emissões de metano durante estes anos.

Uma grande área do fundo do reservatório fica exposta sazonalmente. Considerando a cota de 58 m de nível mínimo operacional de Tucuruí-I (Brasil, ELETRONORTE, 1989, p. 64), esta área ocupa 858 km² (Fearnside, 1995, p. 13), enquanto se for considerado o rebaixamento apenas até a cota de 68 m em agosto de 1988 (antes que todas as turbinas estivessem operacionais), a área ocupava 397 km² (Novo & Tundisi, 1994). Quando inundada, a área de rebaixamento oferece condições ideais para geração de metano, como também para metilação de mercúrio do solo. No reservatório de Samuel, por exemplo, essas áreas liberaram 15,3 g C/m²/ano como CH₄ por ebulição dependendo da época inundada, comparado com 7,2 g C/m²/ano liberado entre árvores mortas em pé em áreas permanentemente inundadas e apenas 0,00027 g C/m²/ano no canal principal (Rosa *et al.*, 1996c, p. 150).

Baseado em informações sobre áreas de hábitat e taxas de emissão (Tabelas 2 e 3), pode-se calcular emissões aproximadas por ebulição e difusão de CH₄ de Tucuruí (Tabela 4). Isto presume que a área coberta por macrófitas ao longo do ciclo anual segue as suposições de Novo & Tundisi (1994, p. 150), que é a área máxima de macrófitas (505,4 km²) aplica-se a quatro meses (presumidos para ser maio-agosto), enquanto dois meses (presumidos para ser março e abril) a área é 50% do máximo e é substituída pela água aberta (25%) e área de rebaixamento exposto (25%), e durante seis meses (presumidos para ser setembro-fevereiro) a área de macrófitas é 30% do máximo e é substituída pela água aberta (15%) e área de rebaixamento exposto (15%). O ano é dividido em duas estações com base na vazão máxima: um período de fluxo baixo (janeiro-maio) e um período de fluxo alto (junho-dezembro). O ano também pode ser dividido com base do nível de água (baixo = setembro-fevereiro, alto = março-agosto) ou com base na chuva (seco = julho-novembro, chuvoso = dezembro-junho).

[Tabela 4 aqui]

C.) EMISSÕES DAS TURBINAS

Em 1991 Tucuruí produziu 18,03 TWh de eletricidade (Brasil, ELETRONORTE, 1992, p. 3), ou 2.058 MW. Era esperado que a produção anual da represa fosse 2.476 MW antes de 1991 (Brasil, ELETRONORTE, 1989, p. 58), ou 20,3% mais do que foi produzido de fato. Se a produção tivesse sido mais alta, as emissões de CH₄ da água que passa pelas turbinas também teriam sido proporcionalmente mais altas. Cada turbina tem uma capacidade nominal de 350 MW e um fator de carga de 95% (*i.e.*, 332,5 MW de produção efetiva), e usa 575 m³/s de água (Brasil, ELETRONORTE, 1989, p. 17). Cada turbina, então, usa 18,1 × 10⁹ m³/ano de água, e 18,3 MW é gerado por 10⁹ m³ de água. Um total de 112,2 × 10⁹ m³ de água atravessaram as turbinas em 1991, a concentração de metano a 30 m de profundidade, era 6 mg CH₄/litro em março de 1989 (dados inéditos de J.G. Tundisi citados por Rosa *et al.*, 1997a, p. 43). Estudos na represa de Petit-Saut por Galy-Lacaux *et al.* (1999, p. 508) mostram que as concentrações de CH₄ oscilam em uma base sazonal em um padrão que corresponde ao equilíbrio entre o influxo de água e a vazão da saída do reservatório. A amplitude da oscilação é tal que a concentração máxima é, pelo menos, 50% mais alta que o mínimo em cada ciclo anual. O único perfil disponível para concentrações de CH₄ na água em Tucuruí é de março de 1989, que é durante o período de fluxo alto de água quando a série temporal a Petit-Saut (Galy-Lacaux *et al.*, 1999) indica que as concentrações de CH₄ estão no mínimo. Se a magnitude relativa da oscilação sazonal em concentração de CH₄ a Petit-Saut se aplica a Tucuruí, a concentração de 30 m de

profundidade deveria variar (pelo menos) entre 6 e 9 mg CH₄/litro, com um valor médio de 7,5 mg CH₄/litro (Figura 2).

[Figura 2 aqui]

Isto pode ser considerado uma estimativa conservadora da concentração na água que passa pelas turbinas, já que a concentração de CH₄ aumenta na medida em que aumenta a profundidade, e a tomada d'água está com profundidade de 35,4 m quando o reservatório estiver ao nível operacional na cota de 72 m (Brasil, ELETRONORTE, 1989, p. 157). Baseado em uma média anual de concentração de metano de 7,5 mg CH₄/litro ao nível das turbinas, pode-se calcular que a quantia de CH₄ exportada do reservatório pelas turbinas em 1991 teria sido $0,842 \times 10^6$ toneladas (t). Porém, a oscilação sazonal age para reduzir a quantia de CH₄ exportada, em relação a este valor, porque a geração de energia é maior durante o período de fluxo alto, quando a concentração de CH₄ na água for menor. Um ajuste para este efeito é calculado na Tabela 5, assim reduzindo a exportação de CH₄ 1991 em 6,7% para $0,785 \times 10^6$ t.

[Tabela 5 aqui]

O destino do CH₄ da água que passa pelas turbinas pode ser calculado baseado em dados da Hidrelétrica de Petit-Saut (Galy-Lacaux *et al.*, 1997). Três medidas somadas a Petit-Saut, uma média de 87,1% do metano era imediatamente liberada como gás quando a água emergiu das turbinas. Do metano restante, 18,4% eram liberados no rio a jusante e 81,6% foram oxidados para CO₂ nos primeiros 40 km abaixo da barragem. Baseado nestes dados, a liberação em 1991 da passagem de água pelas turbinas em Tucuruí totalizou $0,702 \times 10^6$ t CH₄ ($0,684 \times 10^6$ t às turbinas e $0,019 \times 10^6$ t no rio).

Uma diferença significativa entre Tucuruí e Petit-Saut é um dispositivo de areação construído 300 m a jusante da barragem de Petit-Saut. Quando a operação da hidrelétrica começou em junho de 1994, quase todos os peixes morreram a jusante da barragem, motivando assim a suspensão da geração enquanto um dispositivo (uma barragem de 4 m de altura com dois degraus) foi construído para criar uma cachoeira artificial e fornecer água com mais oxigênio para o rio a jusante. O dispositivo foi completado em fevereiro de 1995 (Gosse, 1999). Um subproduto não intencional disto é a liberação de metano adicional, uma parte do qual teria sido oxidada até o CO₂ por atividade bacteriana no rio ou no oceano (40 km a jusante) se a cachoeira artificial não existisse. No caso de Tucuruí, no entanto, pode-se presumir que a maioria do CH₄ na água também é liberada quando a água atravessar as turbinas por causa da queda súbita de pressão. Por exemplo, em Balbina, amostras de água tiradas do fundo do reservatório (29 m de profundidade máxima) espumam com bolhas de CH₄ e CO₂ quando trazidas à superfície (Bohdan Matvienko, declaração pública, 24 de fevereiro de 2000).

Os dados de Petit-Saut não permitem a separação da quantia liberada imediatamente quando a água emerge das turbinas daquela que é liberada na cachoeira artificial. Galy-Lacaux *et al.* (1997, p. 479) calcularam a liberação destes dois pontos juntos a partir das concentrações de CH₄ na coluna d'água anterior a represa e na água debaixo da cachoeira artificial. Das três medidas pareadas informadas por Galy-Lacaux *et al.* (1997, p. 497), a concentração média de CH₄ cai de 8,11 mg/litro para 0,77 mg/litro, ou 90,5%. A quantia média liberada nas turbinas e na cachoeira somaram 98,2 t CH₄/dia (89,9% do CH₄ exportado pelas turbinas, ou 97,7% das emissões totais de 100,5 t CH₄/dia de água turbinada). Toda a liberação no rio acontece nos primeiros 20-30 km abaixo da barragem; a média das três medidas desta liberação era 2,3 t CH₄/dia, que representa 2,1% do CH₄ exportado pelas turbinas, ou 2,3% das emissões totais de

água turbinada. Se a cachoeira artificial não existisse, a quantia liberada no rio provavelmente seria mais alto que os 11,0 t/dia medidos no caso de Petit-Saut (21,0% do CH₄ que entra no rio abaixo da barragem) por causa da concentração mais alta de CH₄ que entraria no rio neste momento. Com isto, torna-se possível calcular estimativas mínimas e máximas para a emissão de CH₄ da água que passa pelas turbinas em Tucuruí. Considerando as porcentagens liberadas como 21,0%-89,9%, baseado nos resultados de Petit-Saut, a liberação das turbinas em Tucuruí em 1990 era de 0,165-0,702 × 10⁶ t CH₄. O total de metano liberado da água que passa pelas turbinas em Tucuruí era 2-8 vezes a liberação total de ebulição e difusão no próprio reservatório.

D.) EMISSÕES DO VERTEDOIRO

Uma grande fonte adicional de emissões de CH₄ em Tucuruí é da água liberada pelo vertedouro. Esta água não é tirada da superfície, mas vem da cota de 52 m (Brasil, ELETRONORTE, 1989, p. 146). Quando o reservatório está na cota operacional normal de 72 m, a água liberada do vertedouro vem de uma profundidade de 20 m. A água sai em uma lâmina debaixo de uma série de 23 comportas de aço quando elas são elevadas; normalmente, esta é uma lâmina fina do fundo do vão do vertedouro, embora estas portas gigantes (cada com 21 m de altura e pesando 220 t) podem ser giradas para cima para permitir a passagem de grandes inundações. Com a exceção de tais eventos de inundação, a tirada é, então, na crista do vertedouro na cota de 52 m. Em cada vertedouro, a água desce uma calha por 30 m, onde é lançada no ar por um salto tipo esqui e mergulha mais 28 m até uma bacia de dissipação forrada de concreto armado. A grande pluma branca de neblina formada quando estão abertos todos os 23 vertedouros, cada um com 20 m de largura, é, indubitavelmente, a vista mais espetacular e freqüentemente fotografada na barragem. A perfeição e a natureza instantânea da aeração faz com que seja uma suposição segura de que todo o CH₄ dissolvido na água é liberado imediatamente à atmosfera.

Emissões do vertedouro seriam muito grandes se o reservatório fosse mantido sempre no seu nível d'água cheio. Considerando a vazão média a longo prazo de 11.107 m³/s (Brasil, ELETRONORTE, 1989, p. 17), ou 350,5 × 10⁹ m³/ano, e a concentração de CH₄, ajustada de acordo com a época de 3,75 mg CH₄/litro a 20 m de profundidade, o vertedouro teria emitido 0,893 × 10⁶ t CH₄ em 1990, equivalente a 5,1 × 10⁶ t de C equivalente a CO₂. Porém, vários fatores reduzem a emissão anual de água liberada pelo vertedouro. Um fator é o ciclo sazonal na concentração de CH₄, a maior liberação do vertedouro que é durante o período de fluxo alto quando a concentração de CH₄ é mais baixa. Outro fator é o efeito do rebaixamento do nível d'água: na medida em que o nível da água cai, a profundidade da entrada do vertedouro diminui relativo à superfície da água, presumivelmente com uma redução correspondente na concentração de CH₄ ao nível do vertedouro. Estes dois efeitos reduzem a exportação calculada de CH₄ pelo vertedouro para 0,535 × 10⁶ t (Tabela 6), uma diminuição de 40,1%. Um efeito para qual não foi feita uma correção, é a variação na espessura da lâmina d'água que atravessa o vertedouro: embora normalmente apenas uma fenda estreita é aberta, durante inundações maiores, as comportas podem ser elevadas mais alto, permitindo assim escapar água mais próximo da superfície (com conteúdo de CH₄ mais baixo).

[Tabela 6 aqui]

E.) PERDA DE FONTES E SUMIDOUROS EM FLORESTA VIVA

Quando a floresta tropical é inundada e, conseqüentemente, morta, são perdidas as fontes e sumidouros naturais na floresta de gases de efeito estufa. Isto inclui a perda de uma absorção

anual de carbono pela floresta em pé. Estudos que usam técnicas de correlação de remanço indicam que as florestas amazônicas intactas têm uma absorção líquida de carbono atualmente (por exemplo, Grace *et al.*, 1995; Mahli *et al.*, 1998). Embora este efeito não possa ser permanente, já que, a longo prazo, os estoques de C na floresta não podem continuar crescendo, a absorção efetuada constitui uma adição ao impacto de matar grandes áreas de floresta por inundações. Outras perdas incluem um pequeno sumidouro de metano no solo da floresta tropical e uma fonte de metano muito pequena de térmitas de floresta. Por outro lado, uma fonte de óxido nitroso (N₂O) de emissões são eliminadas pela inundação. Solos sob as florestas amazônicas em Paragominas (onde a distribuição sazonal de precipitação é semelhante à aquela em Tucuruí) emite uma quantidade calculada em 8,68 kg de N₂O/ha/ano (Verchot *et al.*, 1999, p. 37), equivalente a 0,73 t C/ha/ano equivalente a CO₂ que considera o potencial de efeito estufa de 100 anos de 310 adotado pelo Protocolo de Kyoto para N₂O. Os 1.926 km² de florestas inundadas por Tucuruí (Fearnside, 1995, p. 11), então, emitiram anualmente como N₂O, 0,117 × 10⁶ t de C equivalente a CO₂ antes de serem inundados. A área inundada por Tucuruí, como a maioria das represas hidrelétricas, não era um pantano antes de ser inundada, mas era uma área de correteiras no rio que teve topografia acidentada o bastante para manter os solos bem drenados. A emissão pré-reservatório não era, então, a grande fonte de CH₄ ou de N₂O que às vezes tem sido sugerido. É calculado o efeito líquido de perdas de fontes e sumidouros em floresta viva na Tabela 7.

[Tabela 7 aqui]

F.) IMPACTO SOBRE O EFEITO ESTUFA DAS EMISSÕES EM 1990

Em resumo, as principais fontes de emissões de metano em Tucuruí em 1990 eram as seguintes quantidades de CH₄ em 10⁶ t: 0,0937 de ebulição e difusão, 0,1649-0,7025 das turbinas, e 0,5353 do vertedouro (Tabela 8). Pequenas contribuições adicionais foram feitas pelos cupins na decomposição acima d'água, pela perda do sumidouro em solos sob floresta, e, por outro lado, pela perda do pequeno fluxo dos cupins na floresta. A emissão de CH₄ somou 0,79-1,33 × 10⁶ t de gás; considerando um potencial de aquecimento global de 21 (Schimel *et al.*, 1996, p. 121), é equivalente a 4,5-7,6 × 10⁶ t de C equivalente a CO₂. Foram calculadas emissões de CO₂ em 1990 de 9,68 × 10⁶ t de gás de CO₂, ou 2,64 × 10⁶ t de C. Ajuste para perda da fonte de N₂O do solo sob floresta diminui a emissão em 1-2%. A contribuição de metano representou 64-75% do impacto total de gás de efeito estufa em 1990 de 7,0-10,1 × 10⁶ t de C equivalente a CO₂ (Tabela 8). Como explicado na Tabela 8 (nota 1), as emissões em 1990 são calculadas a partir de parâmetros que se refiram aos anos para os quais as informações estão disponíveis.

[Tabela 8 aqui]

IV.) DISCUSSÃO

A.) INCERTEZA

A confiança da atual estimativa é muito sensível ao valor de dois parâmetros: as concentrações de CH₄ no transcurso de água pelo vertedouro e pelas turbinas. Aqui um conjunto de valores é usado, medido em Tucuruí em março de 1989 por José G. Tundisi (citado por Rosa *et al.*, 1997a, p. 43). Estes valores são ajustados para oscilações sazonais baseado na série de medidas feitas em Petit-Saut (Galy-Lacaux *et al.*, 1999). A existência de oscilações sazonais indica a importância de ter uma série de medidas para capturar esta fonte de variação. A maioria do esforço de pesquisa tem visado a quantificação das emissões de gases de efeito estufa de

represas hidrelétricas, inclusive Tucuruí, tem sido dedicado a medidas de fluxos no próprio reservatório. Porém, os cálculos no atual trabalho mostram claramente que os maiores ganhos na redução das incertezas na estimativa global seriam na melhoria das informações sobre as concentrações de CH₄ na água que entra nas turbinas e no vertedouro, e o destino do CH₄ no rio a jusante da barragem.

Fluxos de metano da superfície do reservatório, particularmente por ebulição, também estão sujeitos a ciclos. Em uma base sazonal, as emissões por unidade de área são mais altas em qualquer local no reservatório quando o nível de água está baixo. Podem ser esperados que os rebaixamentos frequentes no nível d'água no gerenciamento do reservatório resultassem em maior liberação de CH₄ por ebulição. É provável que as grandes liberações que acontecem quando os níveis de água caem não sejam descobertas por meio de medidas feitas nas breves “campanhas” que atualmente formam a fonte dos dados disponíveis.

Emissões de ebulição são maiores em áreas mais rasas porque há menos distância vertical, ao longo de que as bolhas de CH₄, que são liberadas dos sedimentos, podem ser oxidadas antes de alcançar a superfície. Também, a pressão hidrostática nos sedimentos é menor, assim conduzindo a maior liberação de bolhas deste ambiente supersaturado. Além disso, taxas de metanogênese são sensíveis à temperatura, e os sedimentos mais frios a profundidades maiores produziram menos CH₄ que sedimentos em áreas rasas. No Lago Gatun, por exemplo, ao longo de um gradiente de profundidade de 0,5 a 10 m, a taxa de ebulição diminuiu por um fator de 10, dos quais um fator de 2,3-3,9 poderia ser explicado por diferenças de temperatura e de pressão (Keller & Stallard, 1994, p. 8.315). O efeito adicional significativo da profundidade pode ser devido a maiores contribuições de carbono terrestre nas áreas rasas próximas à beira do lago (Keller & Stallard, 1994). Com o passar do tempo, além do efeito da profundidade sobre as variações na emissão, este fator mostra também a grande variação espacial que existe em diferentes partes da superfície de um reservatório e o cuidado necessário para obter amostras representativas e interpretar estes resultados usando uma ponderação apropriada pela área de cada hábitat e categoria de profundidade. A divisão em três zonas usada no atual trabalho é o nível máximo de detalhamento que os dados atuais permitem, mas a medida em que mais dados ficam disponíveis, uma desagregação melhor de classes de profundidade e de hábitat poderia aumentar a confiança das estimativas.

Em uma base diurna, emissões são mais altas durante o dia que à noite, devido à maior força do vento e da ação de ondas (Duchemin *et al.*, 2000; Keller & Stallard, 1994). Maiores fluxos de ebulição à tarde em Tucuruí também podem ser devido a um ciclo diurno em pressão atmosférica para o que é equivalente a uma flutuação no nível de água de 18 cm, em termos de pressão hidrostática sobre o fundo do lago (Lima & Novo, 1999). Considerando que muitas das medidas publicadas não especificam se são baseadas em monitoramento ao longo de um ciclo de 24 horas, esta é uma fonte de incerteza adicional.

O estudo de Galy-Lacaux *et al.* (1999), a Petit-Saut, indica que as concentrações de CH₄ diminuem com o passar do tempo, caindo de 14 a 10 mg/litro nos primeiros quatro anos de represamento (o período de medida em Petit-Saut), e espera-se diminuir até 0,3 mg/litro à idade de 20 anos, baseado em níveis de CH₄ presentes em uma represa comparável na Costa do Marfim. A concentração projetada a Petit-Saut seis anos depois do represamento (a idade do reservatório para a atual estimativa para Tucuruí) era 4 mg/litro. No entanto, Galy-Lacaux *et al.* (1999) usaram uma concentração de CH₄ média ao longo de todo o perfil vertical da coluna d'água em uma estação localizada perto da barragem como a estimativa da concentração na passagem da água pelas turbinas. Petit-Saut difere de Tucuruí de alguns modos significantes que

afetam a escolha de um valor de CH_4 . O reservatório de Tucuruí é aproximadamente duas vezes mais profundo que a represa de Petit-Saut, com o ponto central das entradas para as turbinas sendo localizado a uma profundidade de 35,4 m (*i.e.*, mais fundo que a profundidade total de 34 m do reservatório de Petit-Saut). Além disso, Petit-Saut tem uma estrutura especial construída para minimizar a descarga de água anóxica (que também é mais rica em metano). Este é um dique subaquático construído paralelo e 60 m a montante da barragem com a finalidade de imobilizar a metade mais baixa da coluna d'água e somente puxar água da superfície, relativamente bem oxigenada, nas tomadas d'água das turbinas (Sissakian & Desmoulins, 1991). Tucuruí não tem nenhuma estrutura desse tipo, assim fazendo com que o valor medido da concentração de CH_4 num ponto tão próximo quanto possível ao nível das entradas das turbinas seja uma escolha mais apropriada que a média para a coluna d'água.

A atual estimativa de emissões de Tucuruí é conservadora por várias razões. A estimativa ignora “eventos incomuns”, como tempestades, que resultam em emissões muito mais altas do que as que normalmente ocorrem. Estes eventos foram constatados como responsáveis por uma porção significativa das emissões anuais em reservatórios no norte do Canadá (Duchemin *et al.*, 1995). Tempestades podem causar contribuições grandes de matéria orgânica da bacia, tais como folhas, ramos e outros detritos; elas também podem criar seichas que trazem o oxiclínio à superfície, assim permitindo a liberação de água funda saturada de metano (Donald D. Adams, declaração pública, 24 de fevereiro de 2000).

O uso de dados de diferentes anos para produzir uma estimativa aproximada para 1990 aumenta a incerteza. Alguns dos efeitos, resultam em sobreestimativa da emissão de 1990. Por exemplo, usar as áreas de macrófitas de 1988, o conteúdo de CH_4 na água de 1989, as profundidades das turbinas e dos vertedouros de 1988 e o fluxo de água turbinada de 1991. Outros fatores subestimam a emissão de 1990, como a ebulição e a difusão por unidade de área de 1996-1997 e o fluxo de água vertida de 1991.

A atual estimativa não inclui emissões do desmatamento feito pela população que foi retirada do local do reservatório. Também não foram incluídas estimativas das emissões significativas da construção da represa, que seriam necessárias para uma análise da cadeia completa (análise do ciclo de vida). Impactos futuros também incluiriam emissões das represas a montante planejadas para regular o fluxo do rio Tocantins.

B.) COMPARAÇÃO COM ESTIMATIVAS ANTERIORES

Emissões de gases de efeito estufa do reservatório de Tucuruí durante um único ano (1990) foram calculadas (Fearnside, 1995). Essa análise foi subseqüentemente estendida de um único ano, para computar a quantia e a distribuição temporal das emissões ao longo de um período de 100 anos que poderia ser comparado então com as emissões que seriam produzidas gerando a mesma quantia de energia a partir de combustíveis fósseis (Fearnside, 1997a). Fatores considerados incluíram o estoque inicial e a distribuição de carbono, as taxas e os caminhos de decomposição (conduzindo para liberação de CO_2 e CH_4), e as perdas de energia nas linhas de transmissão. Fatores não considerados incluíram a degradação da floresta nas ilhas e nas margens do reservatório, fontes de óxido nitroso em zonas de deplecionamento e linhas de transmissão, além de caminhos adicionais de emissão de metano através das árvores em pé, passagem de água pelas turbinas, etc. Também não foram incluídas emissões na fase de construção, nem as emissões do desmatamento feito por pessoas deslocadas (ou atraídas) pelo projeto.

Cálculos anteriores presumiram que apenas 10% da superfície de água estava coberta por macrófitas (Fearnside, 1997a). O percentual médio usado no cálculo da área atual é de 13,1% (Tabela 3). Porém, a emissão das áreas de macrófita é muito mais baixa no cálculo atual (72 mg CH₄/m²/dia na época de nível alto de água e 68 mg CH₄/m²/dia na época de nível baixo) que os 174,7 mg CH₄/m²/dia usados em cálculos anteriores (Fearnside, 1995, 1997a). Isto provavelmente indica que o cálculo atual é conservador, já que o anterior, embora baseado em dados de lagos de várzea em vez de se basear em dados de Tucuruí, estava fundamentado em muito mais observações (por exemplo, Bartlett *et al.*, 1990; Devol *et al.*, 1990; Wassmann & Thein, 1996).

A maioria do impacto de efeito estufa nos cálculos anteriores (Fearnside, 1995) foi derivado do CO₂ liberado por decomposição da madeira acima da água: em 1990, o CO₂ contribuiu com 83% e o CH₄ com 17% do impacto, considerando o potencial de aquecimento global de 21 atualmente usado para CH₄, para representar o impacto de uma tonelada deste gás relativo a uma tonelada de CO₂ da forma adotada pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) (Schimel *et al.*, 1996, p. 121). Na análise anterior, foi presumido que as emissões de metano seriam relativamente constantes ao longo do horizonte de tempo, em vez de ter um pico inicial seguido por um declínio até um platô mais baixo.

A inclusão de emissões substanciais de CH₄ na água liberada pelas turbinas e pelo vertedouro, que não foram incluídas em estimativas anteriores, aumentam a confiança do cálculo atual. Estas fontes aumentam a emissão total de CH₄, comparado à estimativas anteriores das emissões (Fearnside, 1995, 1997a) que incluíram o CH₄ de decomposição de floresta submersa, na qual as suposições adotadas agora parecem ser conservadoras. A produção de CH₄ calculada baseados em suposições sobre taxas e caminhos de decomposição foi substituída por estimativas mais seguras baseado em medidas de concentração de CH₄ na água que foi liberada pelas turbinas e pelo vertedouro. Isto altera as estimativas anteriores significativamente para o ano 1990 (Fearnside, 1995), nas quais o CO₂ contribuiu com 83% e o CH₄ com 17%. A estimativa revisada indica emissões mais baixas de metano do reservatório (principalmente devido a valores mais baixos para emissão de macrófitas por m²).

São comparados os resultados do atual estudo com os de estudos anteriores na Tabela 9. Estudos variam amplamente, não só nos seus resultados finais, mas também na abrangência da cobertura deles com respeito às fontes de emissões. Estimativas que produzem resultados finais muito baixos ignoram emissões de CH₄ da passagem de água pelas turbinas e pelo vertedouro e as emissões de CO₂ de decomposição de biomassa acima da água. Principalmente devido à inclusão de emissões das turbinas e do vertedouro, os cálculos no atual estudo mais que duplicam a estimativa anterior deste autor para emissões em 1990 (Fearnside, 1995) de $3,1 \times 10^6$ t de C equivalente a CO₂ (considerando o valor atual de 21 para o potencial de aquecimento global para CH₄) para $8,6 \times 10^6$ t de C equivalente a CO₂, sendo isto o ponto central da faixa de variação de $7,0-10,1 \times 10^6$ t de C equivalente a CO₂ que é o resultado da incerteza sobre a porcentagem de CH₄ liberada da água turbinada. Acredita-se que a conclusão de que há uma emissão significativa é bastante robusta, apesar da incerteza ser alta e mal quantificada. Os resultados deste trabalho indicam emissões de uma a duas ordens de grandeza maiores do que os estudos de emissões da superfície do reservatório que atualmente formam a base da política brasileira sobre o efeito estufa e represas hidrelétricas (Tabela 9).

[Tabela 9 aqui]

C.) DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL DAS EMISSÕES

Uma pergunta fundamental para o futuro será se a concentração de CH₄ na água diminuirá até um platô de nível muito baixo (por exemplo, como os 0,32 mg/litro encontrados por Galy-Lacaux *et al.* (1999) em um reservatório africano de 20 anos de idade). Um fator que determina isto, será a importância relativa de fontes diferentes do carbono que é convertido em metano. A decomposição rápida de partes macias das plantas da floresta original é provavelmente completa em todos os reservatórios até a idade de seis anos, mas contribuições de carbono degradável continuam entrar a partir da bacia hidrográfica na forma de carbono orgânico dissolvido e detritos orgânicos trazidos pela água. Carbono degradável também é gerado dentro do reservatório por produção primária, especialmente através de macrófitas, usando nutrientes providos para o reservatório do influxo. Em um reservatório como Tucuruí, com amplo desmatamento e, por consequência, afetado pela erosão do solo na bacia a montante da represa, estas contribuições de nutrientes e de carbono orgânico podem ser esperadas a continuar em longo prazo em níveis altos. A cobertura de macrófitas diminuiu no reservatório ao longo do período 1986-1994, mas parece ter estabilizado no nível de cobertura que foi observado em 1994, quando estas plantas cobriram 11% da superfície de água durante o período de águas altas (Lima *et al.*, 2000).

Emissões de Tucuruí hoje diferem das emissões em 1990. Um fator importante que aumenta as emissões é que os dados de 1991 para geração de energia usados na estimativa para 1990 se referem a um período antes que todas as turbinas tenham sido instaladas na fase Tucuruí-I da usina. Por outro lado, a emissão da decomposição da biomassa acima da água teria diminuído ao longo dos anos a medida em que este estoque de carbono desaparecesse, e a cobertura de macrófitas reduzisse de 21% até o platô de 11% no período de águas altas.

Maior flutuação no nível de água (com mais turbinas instaladas) também conduz a maiores emissões. Quando o nível de água no reservatório diminui, a vegetação cresce rapidamente na terra exposta. Esta biomassa verde e macia decompõe rapidamente quando, subsequentemente, o nível d'água sobe e inunda a área de deplecionamento, liberando metano sob as condições anóxicas que prevalecem no fundo. Em virtude destas áreas serem relativamente rasas, uma porção significativa das bolhas que se formam pode alcançar a superfície, antes que o metano possa ser oxidado na coluna d'água. A vegetação verde foi considerada em zonas de deplecionamento inundadas uma fonte significativa de metano por ebulição em Balbina (Bohdan Matvienko, declaração pública, 24 de fevereiro de 2000).

D.) PREFERÊNCIA TEMPORAL E ESCOLHAS DE ENERGIA

Em 1990, o Brasil emitiu anualmente 53×10^6 t de carbono de combustíveis fósseis (La Rovere, 1996). A emissão de $7,0-10,1 \times 10^6$ de t de C equivalente a CO₂ de Tucuruí em 1990 representou, portanto, 13-19% da emissão de combustível fóssil, na época, da população brasileira de 170 milhões de pessoas. A emissão de Tucuruí é 1,3-1,9 vezes maior do que aquele proveniente do combustível fóssil queimado pela população de 17 milhões da cidade de São Paulo (10% da população do Brasil).

A madeira acima da água que produziu 25-36% da emissão de Tucuruí em 1990 desaparecerá com o passar do tempo. A emissão de metano, que compõe o resto do impacto da represa sobre o efeito estufa, diminuirá até um platô mais baixo, mas uma parte mal quantificada disto continuará como uma fonte permanente. Uma fonte de emissão do tamanho da cidade de São Paulo pode, então, ser permanente. Estes impactos consideram os potenciais de aquecimento global de 100 anos sem desconto (atualmente usado pelo Protocolo de Kyoto). Caso seja

aplicada uma taxa de desconto ou outro mecanismo de ponderação por preferência temporal, o impacto relativo de represas hidrelétricas poderia ser o dobro ou mais do que os impactos calculados aqui (Fearnside, 1997a).

A geração de energia hidrelétrica produziu pulsos grandes de CO₂ e emissões de CH₄ nos primeiros anos depois de encher o reservatório, enquanto a geração térmica produz um fluxo constante de gases em proporção a energia gerado. A análise da distribuição temporal das emissões (Fearnside, 1997a) indica que a molécula de CO₂ média na carga atmosférica contribuída por Tucuruí entra na atmosfera 15 anos mais cedo que a molécula média na carga comparável produzida pela geração a partir de combustível fóssil. Isto significa que, considerando um horizonte de tempo de 100 anos, uma tonelada de CO₂ emitida por Tucuruí tem mais impacto sobre o efeito estufa que uma tonelada emitida por combustível fóssil, aplicando-se ou não uma taxa de desconto sobre os gases de efeito estufa. Se usar uma taxa de desconto maior que zero, então o impacto relativo da opção hidrelétrica é aumentado.

Decisões sobre a escala de tempo ao longo da qual são avaliadas as represas e os seus impactos sobre o efeito estufa, e na ponderação temporal (por exemplo, aplicando uma taxa de desconto) ao longo desse horizonte de tempo, terão influência dramática nas escolhas entre opções de desenvolvimento energético. Eles também influenciarão a avaliação da contribuição mundial ao efeito estufa feita por reservatórios. Decisões sobre horizontes de tempo e sobre taxas de desconto deveriam ser tomadas para melhor representar os interesses da sociedade. Se horizontes temporais longos são aplicados sem descontar (ou aplicar outras formas de ajuste por preferência temporal) dentro do horizonte de tempo, o resultado seria dar pouco valor para adiar o efeito estufa. Embora ainda não se tenha chegado a nenhum acordo sobre estes assuntos nas negociações internacionais, este autor defende o uso de um horizonte de tempo de 100 anos, junto com uma taxa anual de desconto de cerca de 1%, ou seu equivalente sob um sistema alternativo de ponderação por preferência temporal (Fearnside, 2002a,b; Fearnside *et al.*, 2000).

Quando o efeito estufa é adiado, os impactos (inclusive impactos sobre a vida humana e outros impactos não-monetários) que teriam acontecido no decorrer da demora, representam benefícios à sociedade. A tradução deste valor social para as ferramentas de tomada de decisão é feita através do horizonte de tempo e a aplicação de uma taxa de desconto, e resulta em dar um peso maior aos impactos em curto prazo, tais como o pico de emissões da construção da barragem e dos primeiros anos de represamento, e aos gases de vida curta, tais como o metano produzido por reservatórios. A escolha de um horizonte de tempo de 100 anos seria consistente com muitas análises do ciclo de vida de represas e com os potenciais de aquecimento global atualmente adotados em um adendo ao Protocolo de Kyoto (Decisão 2/CP.3) para o primeiro período de compromisso do Protocolo (2008-2012). É esperado que uma decisão para o primeiro período de compromisso seja tomada em futuro próximo. Independente da decisão, os impactos humanos cada vez mais inevitáveis e a natureza duradoura do efeito estufa significam que as negociações internacionais continuarão por muitos anos além do primeiro período de compromisso. Este autor acredita que esse processo tenderá a dar um peso maior ao tempo do que é dado atualmente, e por conseguinte, levará ao aumento no impacto atribuído às emissões das represas hidrelétricas quando comparado aos impactos de muitas outras alternativas de energia.

V.) CONCLUSÕES

Represas hidrelétricas em áreas de florestas tropicais produzem emissões significativas de gases de efeito estufa. Embora a incerteza sobre a quantia de emissão seja alta, a magnitude das emissões envolvidas é suficiente para que afete os níveis globais de gases de efeito estufa. Isto demonstra a necessidade de comparações cuidadosas de opções de energia hidrelétrica e outras como uma parte do processo de tomada de decisões. Tucuruí, com um impacto em 1990 sobre o efeito estufa maior do que o combustível fóssil queimado pela cidade de São Paulo, fornece uma lembrança da escala potencial das emissões das dezenas de reservatórios que estão planejados para construção na Amazônia nas próximas décadas.

VI.) AGRADECIMENTOS

O Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq AIs 350230/97-98 & 523980/96-5) e o Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA PPI 5-3150 e 1-3160) contribuíram com apoio financeiro. Agradeço a Evelyn M.L.M. Novo e Ivan Tavares de Lima pelo uso de informações inéditas. Uma versão anterior desta discussão foi apresentada à Comissão Mundial de Barragens no Seminário sobre Represas e Emissões de Gases de Efeito Estufa, Montreal, Canadá, 24-25 de fevereiro de 2000. Agradeço a Klewer Academic Publishers, Dordrecht, Países Baixos, editores da revista *Water, Air and Soil Pollution*, pela permissão de publicar esta tradução (Fearnside, 2002c). Agradeço a John J. Magnuson pelos comentários e a Paulo Maurício Lima de Alencastro Graça, Ruth Ferreira e Marinete Moura Souza pela correção do português.

VII.) LITERATURA CITADA

- Bartlett, K.B., Crill, P.M., Bonassi, J.A., Richey, J.E. & Harriss, R.C. 1990. Methane flux from the Amazon River floodplain: Emissions during rising water. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)* 95(D10): 16.773-16.778.
- Brasil, ELETROBRÁS. 1987. *Plano 2010: Relatório Geral. Plano Nacional de Energia Elétrica 1987/2010 (Dezembro de 1987)*, Centrais Elétricas do Brasil (ELETROBRÁS), Brasília, DF. 269 p.
- Brasil, ELETRONORTE. 1987. *Estudos Ambientais do Reservatório de Balbina, Relatório "Diagnóstico" BAL-50-1001-RE*, Centrais Elétricas do Norte do Brasil (ELETRONORTE), Brasília, DF. 308 p.
- Brasil, ELETRONORTE. 1988. *UHE Tucuruí: Plano de Utilização do Reservatório, Caracterização e Diagnóstico do Reservatório e de sua Área de Influência, TUC-10-26346-RE, Volume I – Texto*, Centrais Elétricas do Norte do Brasil (ELETRONORTE), Brasília, DF. 228 p.
- Brasil, ELETRONORTE. 1989. *Usina Hidrelétrica Tucuruí: Memória Técnica*, Diretoria Técnica (DT), Departamento de Projetos (TPR), Projeto Memória, Centrais Elétricas do Norte do Brasil (ELETRONORTE), Brasília, DF. 681 p.
- Brasil, ELETRONORTE. 1992. *Ambiente, Desenvolvimento, Tucuruí*, Centrais Elétricas do Norte do Brasil (ELETRONORTE), Brasília, DF. 32 p.
- Brasil, Programa Avança Brasil. 1999. <http://www.abrasil.gov.br..>

- Devol, A.H., Richey, J.H., Forsberg, B.R. & Martinelli, L.A. 1990. Seasonal dynamics in methane emissions from the Amazon River floodplain to the troposphere. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)* 95(D10): 16.417-16.426.
- Duchemin, E., Lucotte, M., Canuel, R. & Chamberland, A. 1995. Production of the greenhouse gases CH₄ and CO₂ by hydroelectric reservoirs of the boreal region. *Global Biogeochemical Cycles* 9(4): 529-540.
- Duchemin, E., Lucotte, M., Canuel, R., Queiroz, A.G., Almeida, D.C., Pereira, H.C. & Dezincourt, J. 2000. Comparison of greenhouse gas emissions from an old tropical reservoir with those of other reservoirs worldwide. *Verhandlungen International Vereinigung fur Limnologie*. 27: 1-5.
- Fearnside, P.M. 1989. Brazil's Balbina Dam: Environment versus the legacy of the pharaohs in Amazonia. *Environmental Management* 13(4): 401-423.
- Fearnside, P.M. 1995. Hydroelectric dams in the Brazilian Amazon as sources of 'greenhouse' gases. *Environmental Conservation* 22(1): 7-19.
- Fearnside, P.M. 1996a. Hydroelectric dams in Brazilian Amazonia: Response to Rosa, Schaeffer & dos Santos. *Environmental Conservation* 23(2): 105-108.
- Fearnside, P.M. 1996b. Amazonia and global warming: Annual balance of greenhouse gas emissions from land-use change in Brazil's Amazon region. p. 606-617. In: J. Levine (ed.) *Biomass Burning and Global Change, Volume 2: Biomass Burning in South America, Southeast Asia and Temperate and Boreal Ecosystems and the Oil Fires of Kuwait*, MIT Press, Cambridge, MA, E.U.A. 902 p.
- Fearnside, P.M. 1997a. Greenhouse-gas emissions from Amazonian hydroelectric reservoirs: The example of Brazil's Tucuruí Dam as compared to fossil fuel alternatives. *Environmental Conservation* 24(1): 64-75.
- Fearnside, P.M. 1997b. Greenhouse gases from deforestation in Brazilian Amazonia: Net committed emissions. *Climatic Change* 35(3): 321-360.
- Fearnside, P.M. 1999. Social impacts of Brazil's Tucuruí Dam. *Environmental Management* 24(4): 485-495.
- Fearnside, P.M. 2001a. The potential of Brazil's forest sector for mitigating global warming under the Kyoto Protocol. *Mitigation Adaptation Strategies for Global Change* 6(3-4): 355-372.
- Fearnside, P.M. 2001b. Environmental impacts of Brazil's Tucuruí Dam: Unlearned lessons for hydroelectric development in Amazonia. *Environmental Management* 27(3): 377-396.
- Fearnside, P.M. 2002a. Why a 100-year time horizon should be used for global warming mitigation calculations. *Mitigation Adaptation Strategies for Global Change* 7(1): 19-30.

- Fearnside, P.M. 2002b. Time preference in global warming calculations: A proposal for a unified index. *Ecological Economics* 41(1): 21-31.
- Fearnside, P.M. 2002c. Greenhouse gas emissions from a hydroelectric reservoir (Brazil's Tucuruí Dam) and the energy policy implications. *Water, Air and Soil Pollution* 133(1-4): 69-96.
- Fearnside, P.M., Lashof, D.A. & Moura-Costa, P. 2000. Accounting for time in mitigating global warming through land-use change and forestry. *Mitigation Adaptation Strategies for Global Change* 5(3): 239-270.
- Fearnside, P.M., Leal Filho, N. & Fernandes, F.M. 1993. Rainforest burning and the global carbon budget: Biomass, combustion efficiency and charcoal formation in the Brazilian Amazon. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)* 98(D9): 16.733-16.743.
- Galy-Lacaux, C., Delmas, R., Jambert, C., Dumestre, J.-F., Labroue, L., Richard, S. & Gosse, P. 1997. Gaseous emissions and oxygen consumption in hydroelectric dams: A case study in French Guyana. *Global Biogeochemical Cycles* 11(4): 471-483.
- Galy-Lacaux, C., Delmas, R., Kouadio, J., Richard, S. & Gosse, P. 1999. Long-term greenhouse gas emissions from hydroelectric reservoirs in tropical forest regions. *Global Biogeochemical Cycles* 13(2): 503-517.
- Gosse, P. 1999. A system for reoxygenating the water at Petit-Saut. <http://www.edf.fr/der/html/der/environnement/ptiso.en.htm>
- Grace, J., Lloyd, J., McIntyre, J., Miranda, A.C., Meir, P., Miranda, H.S., Nobre, C., Moncrieff, J., Massheder, J., Malhi, Y., Wright, I. & Gash, J. 1995. Carbon dioxide uptake by an undisturbed tropical rain forest in southwest Amazonia, 1992 to 1993. *Science* 270: 778-780.
- Junk, W.J., Robertson, B.A., Darwich, A.J. & Vieira, I. 1981. Investigações limnológicas e ictiológicas em Curuá-Una, a primeira represa hidrelétrica na Amazônia Central. *Acta Amazonica* 11(4): 689-716.
- Keller, M., Kaplan, W.A. & Wofsy, S.C.: 1986, 'Emissions of N₂O, CH₄ and CO₂ from tropical forest soils. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)* 91: 11.791-11.802.
- Keller, M. & Stallard, R.F. 1994. Methane emission by bubbling from Gatun Lake, Panama. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)* 99(D4): 8.307-8.319.
- La Rovere, E.L. 1996. The prevention of global climate changes and sustainable energy development in Brazil. p. 215-225. In: L.P. Rosa & M.A. dos Santos (eds.) *Greenhouse Gas Emissions under a Developing Countries Point of View*. Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, RJ.
- Leentvaar, P. 1966. The Brokopondo Lake in Surinam. *Verhandlungen Internationale Vereinigung für Limnologie* 16: 680-684.

- Lima, I.B.T. de, Novo, E.M.L.M., Ballester, M.V.R. & Ometto, J.P. 2000. The role of macrophyte community in the CH₄ production and emission in the tropical reservoir of Tucuruí, Pará state, Brazil. *Verhandlungen Internationale Vereinigung für Limnologie* 27: 1437-1440.
- Lima, I.B.T. de & Novo, E.M.L.M.: 1999. Carbon flows in the Tucuruí reservoir. p. 78-84. In: L.P. Rosa & M.A. dos Santos (eds.), *Dams and Climate Change*, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia (COPPE), Universidade Federal de Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, RJ.
- Malhi, Y., Nobre, A.D., Grace, J., Kruijt, B., Pereira, M.G.P., Culf, A. & Scott, S. 1998. Carbon dioxide transfer over a central Amazonian rain forest. *Journal of Geophysical Research (Atmospheres)* 103(D24): 31.593-31.612.
- Martius, C., Fearnside, P.M., Bandeira, A.G. & Wassmann, R. 1996. Deforestation and methane release from termites in Amazonia. *Chemosphere* 33(3): 517-536.
- Matvienko, B., Rosa, L.P., Sikar, E., dos Santos, M.A., Menezes, F. & Lourenço, R. 2000. Carbon dioxide and methane emission from some Brazilian reservoirs. Trabalho apresentado no "World Commission on Dams Workshop on Greenhouse Gas Emissions from Reservoirs", Montreal, Canadá, 24-25 de fevereiro de 2000, 8 p.
- Matvienko, B. & Tundisi, J.G. 1996. Biogenic gas release by reservoirs in the Amazon. Relatório para Centrais Elétricas do Brasil (ELETROBRÁS), Rio de Janeiro, RJ, 11 p.
- Matvienko, B. & Tundisi, J.G. 1997. Biogenic gases and decay of organic matter. p. 34-40. In: L.P. Rosa & M.A. dos Santos (eds.) *Hydropower Plants and Greenhouse Gas Emissions*. Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, RJ.
- Novo, E.L.M. & Tundisi, J.G. 1994. Contribution of remote sensing techniques to the assessment of methane emission from large tropical reservoirs. *Remote Sensing Reviews* 10: 143-153.
- Polunin, N.V.C. 1984. The decomposition of emergent macrophytes in fresh water. *Advances in Ecological Research* 14: 115-168.
- Revilla Cardenas, J.D., Kahn, F.L. & Guillamet, J.L. 1982. Estimativa da fitomassa do reservatório da UHE de Tucuruí. p. 1-11. In: *Projeto Tucuruí, Relatório Semestral, Período janeiro/junho 1982, Vol. 2: Limnologia, Macrófitas, Fitomassa, Degradação da Fitomassa, Doenças Endêmicas, Solos*. Centrais Elétricas do Norte do Brasil (ELETRONORTE) & Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), Manaus, AM.
- Rosa, L.P., dos Santos, M.A., Tundisi, J.G. & Sikar, B.M. 1997a. Measurements of greenhouse gas emissions in Samuel, Tucuruí and Balbina Dams. p. 41-55. In: L.P. Rosa & M.A. dos Santos (eds.) *Hydropower Plants and Greenhouse Gas Emissions*. Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, RJ.

- Rosa, L.P. & Schaeffer, R. 1995. Global warming potentials: The case of emissions from dams. *Energy Policy* 23: 149-158.
- Rosa, L.P., Schaeffer, R. & dos Santos, M.A. 1996a. Are hydroelectric dams in the Brazilian Amazon significant sources of 'greenhouse' gases? *Environmental Conservation* 23(2): 2-6.
- Rosa, L.P., Schaeffer, R. & dos Santos, M.A. 1996b. *A Model of Greenhouse Gas Emissions from Hydroelectric Plants and an Application to Dams in the Amazon Region of Brazil*. Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, RJ, 17 p.
- Rosa, L.P., Schaeffer, R. & dos Santos, M.A. 1996c. Emissões de metano e dióxido de carbono de hidrelétricas na Amazônia comparadas às termelétricas equivalentes. *Cadernos de Energia* 9: 109-157.
- Rosa, L.P., Sikar, B.M., Sikar, E.M. & dos Santos, M.A. 1997b. A model for CH₄ and CO₂ emission mean life in reservoir based on data from an Amazonian hydroplant. p. 102-111. In: L.P. Rosa & M.A. dos Santos (eds.), *Hydropower Plants and Greenhouse Gas Emissions*. Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, RJ.
- Schimel, D. & 75 outros. 1996. Radiative forcing of climate change. p. 65-131. In: J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg & K. Maskell (eds.) *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.
- Sissakian, C. & Desmoulins, G. 1991. Impacts des retenues en site tropical: Actions entreprises a l'occasion de la réalisation du barrage de Petit-Saut en Guyane Française. Q. 64, R. 1, p. 1-18. In: *Seventeenth Congress on Large Dams, Vienna, 1991*. International Commission on Large Dams (ICOLD), Paris, França.
- Souza, J.A.M. de. 1996. Brazil and the UN Framework Convention on Climate Change. p. 19-21. In: International Atomic Energy Agency (IAEA). *Comparison of Energy Sources in Terms of their Full-Chain Emission Factors: Proceedings of an IAEA Advisory Group Meeting/Workshop held in Beijing, China, 4-7 October 1994*. IAEA-TECDOC-892, IAEA, Vienna, Áustria.
- Tian, H., Mellilo, J.M., Kicklighter, D.W., McGuire, A.D., Helfrich III, J.V.K., Moore III, B. & Vörösmarty, C. 1998. Effect of interannual climate variability on carbon storage in Amazonian ecosystems. *Nature* 396: 664-667.
- Verchot, L.V., Davidson, E.A., Cattânio, J.H., Akerman, I.L., Erickson, H.E. & Keller, M. 1999. Land use change and biogeochemical controls of nitrogen oxide emissions from soils in eastern Amazonia. *Global Biogeochemical Cycles* 13(1): 31-46.
- Vilarrubia, T.V. & Cova, M. 1993. Estudio sobre la distribución y ecología de macrófitos acuáticos en el embalse de Guri. *Interciencia* 18(2): 77-82.

- Walker, I., Miyai, R. & de Melo, M.D.A. 1999. Observations on aquatic macrophyte dynamics in the reservoir of the Balbina hydroelectric power plant, Amazonas state, Brazil. *Acta Amazonica* 29(2): 243-265.
- Wassmann, R. & Thein, U.G. 1996. Spatial and seasonal variation of methane emission from an Amazon floodplain lake. Trabalho apresentado “Workshop on Cycling of Reduced Gases in the Hydrosphere *Verhandlungen Internationale Vereinigung für Limnologie* 25: 179-185.
- WCD (World Commission on Dams). 2000. *Dams and Development: A New Framework for Decision-Making*. Earthscan, Londres, Reino Unido. 404 p.

LENDAS DAS FIGURAS

Fig. 1 – locais mencionados no texto.

Fig. 2 – perfil de concentração de metano em Tucuruí. Observações de março de 1989 são de medidas feitas por J.G. Tundisi, citadas por Rosa *et al.* (1997a, p. 43). Valores ajustados da média anual são calculados da forma descrita no texto, baseado em variações sazonais proporcionais em Petit-Saut (Galy-Lacaux *et al.*, 1997, 1999).

Tabela I

Parâmetros para emissão pela biomassa acima da água no reservatório de Tucuruí

Parâmetro	Valor	Unidades	Fonte
Fração de biomassa acima do solo	0,759		Fearnside (1997b, pág. 37)
Profundidade média na zona de água de superfície		1 metro	Suposição, baseado em perda de madeira comercial,
Taxa de decomposição de folhas na zona sazonalmente inundada	-0,5	fração ano ⁻¹	Suposição; nota que o ressecamento sazonal aumenta a taxa (Polunin, 1984, pág. 129).
Taxa de decomposição acima da água (anos 0-4)	-0,1680	fração ano ⁻¹	Presumido, mesmo que floresta derrubada (Fearnside, 1996b, pág. 611)
Taxa de decomposição acima da água (anos 5-7)	-0,1841	fração ano ⁻¹	Assumido mesmo como floresta derrubada (Fearnside, 1996b, pág. 611)
Taxa de decomposição acima da água (anos 8-10)	-0,0848	fração ano ⁻¹	Assumido mesmo como floresta derrubada (Fearnside, 1996b, pág. 611)
Taxa de decomposição acima da água (>10 anos)	-0,0987	fração ano ⁻¹	Assumido mesmo como floresta derrubada (Fearnside, 1996b, pág. 611)
Conteúdo de carbono da madeira	0,50		Fearnside <i>et al.</i> (1993)
Taxa de queda de madeira da zona acima da água	0,1155	fração ano ⁻¹	Suposição: vida média = 6 anos
Biomassa total média de floresta em Tucuruí	519	t ha ⁻¹	Revilla Cardenas <i>et al.</i> (1982)
Profundidade de água média no nível mínimo	9,7	metro	Usa 58,0 m acima do nível de mar como o mínimo nível normal de operação (Brasil, ELETRONORTE, 1989, pág. 64).
Biomassa inicial presente: folhas	8,8	t ha ⁻¹	Calculado da biomassa total e de Fearnside (1995, pág. 12).
Biomassa inicial presente: madeira acima da água	291,0	t ha ⁻¹	Calculado da biomassa total e de Fearnside (1995, pág. 12).
Biomassa inicial presente: subterrenea	125,1	t ha ⁻¹	Calculado da biomassa total e de Fearnside (1995, pág. 12).

Liberação de metano através de
térmitas

0,687 kg de CH₄ ha⁻¹
ano⁻¹

Martius *et al.* (1996, pág. 527).

TABELA 2: DADOS DISPONÍVEIS SOBRE EMISSÕES DA SUPERFÍCIE DO RESERVATÓRIO TUCURUÍ EM HÁBITATS DIFERENTES

Habitat	Data	Estação (nível de água)	Estação (fluxo de água)	Tipo de emissão	Emissão			Fonte
					(Mg CH ₄ / m ² /dia)	média	desvio padrão	
DIVISÕES DE HÁBITAT USADAS NO CÁLCULO:								
Água aberta	maio de 1996	Alto	Alto	Ebulição+difusão	12			(a)
	agosto de 1996	Alto	Baixo	Ebulição+difusão	33,5			(a)
	dez. de 1996	Baixo	Baixo	Ebulição+difusão	65			(a)
	agosto de 1997 ^(b)	Alto	Baixo	Ebulição+difusão	86,5			(c)
	Média: fluxo de água alto				12,0			1
Média: fluxo de água baixo				61,7	26,6		3	
Áreas de macrófitas	maio de 1996	Alto	Alto	Ebulição+difusão	73			(a)
	agosto de 1996	Alto	Baixo	Ebulição+difusão	63			(a)
	dez. de 1996	Baixo	Baixo	Ebulição+difusão	72			(a)
	Média: fluxo de água alto				73			1
	Média: fluxo de água baixo				67,5	6,4		2
Árvores mortas em pé	maio de 1996	Alto	Alto	Ebulição+difusão	56,4			(a)
	agosto de 1996	Alto	Baixo	Ebulição+difusão	59			(a)
	dez. de 1996	Baixo	Baixo	Ebulição+difusão	960			(a)
	agosto de 1997	Alto	Baixo	Ebulição+difusão	74,8			(d)
	Média: fluxo de água alto				56,4			1
Média: fluxo de água baixo				364,6	515,7		1	

OUTRAS MEDIDAS:

Água aberta	março de 1989	Alto	Alto	Ebulição	0	(e)
	set. de 1993 ^(f)	Baixo	Baixo	Ebulição	0,018	(g)
	março de 1993 ^(h)	Alto	Alto	Ebulição	14,2	(g)
	set. de 1993 ^(h)	Baixo	Baixo	Ebulição	3,3	(g)
Áreas de macrófitas	set. de 1993	Baixo	Baixo	Ebulição	19,0	(g)
Árvores mortas em pé	março de 1993	Alto	Alto	Ebulição	3,3	(g)
	set. de 1993	Baixo	Baixo	Ebulição	24,8	(g)
Média ponderada, calculada para o reservatório inteiro	fev. -março de 1993	Baixo	Alto	Ebulição+difusão	5,6	(i)
	set. de 1993	Baixo	Baixo	Ebulição+difusão	15,8	(i)
	1998 ^(j)	?		Ebulição	13,1	(k)
	1998 ^(j)	?		Difusão	192,2	(k)
	1999 ^(j)	?		Ebulição	2,4	(k)
	1999 ^(j)	?		Difusão	12,2	(k)

(a) E.M.L.M. Novo, comunicação pessoal, 1999.

(b) Água aberta: tributário = < 10 m de profundidade.

(c) de Lima *et al.*, 2000.

(d) de Lima & Novo, 1999.

(e) Rosa *et al.*, 1996b,c, 1997a.

(f) Água aberta: canal.

(g) Rosa *et al.*, 1997a, p. 48.

(h) Água aberta: angra protegida.

(i) Matvienko & Tundisi, 1996, p. 10.

(j) Mês não especificado.

(k) Matvienko *et al.*, 2000.

TABELA 3: ÁREAS CALCULADAS DE HÁBITATS NO RESERVATÓRIO DE TUCURUÍ EM 1988

Mês	Vazão média (10 ³ m ³ /s) ^(a)	Tempo de residência (dias) ^(b)	Volume (10 ⁹ m ³)	Área de macrófitas (km ²) ^(c)	Água sem macrófitas (km ²)	Área exposta de deplecio namento (km ²)	Área permanente inundada com árvores emergentes (km ²)	Água sem árvores ou macrófitas (km ²)	Área de Macrófitas <hr/> em % da área total em % da área de água	
Jan.	15,3	37	48,9	151,6	1.879,8	398,0	396,8	1.483,0	6,2	7,5
Fev.	20,8	27	48,5	151,6	1.879,8	398,0	396,8	1.483,0	6,2	7,5
Mar.	24,3	23	48,3	252,7	1.924,0	252,7	396,8	1.527,2	10,4	11,6
Abr.	23,8	24	49,4	252,7	1.924,0	252,7	396,8	1.527,2	10,4	11,6
Mai	15,3	37	48,9	505,4	1.924,0	0,0	396,8	1.527,2	20,8	20,8
Jun.	7,7	74	49,2	505,4	1.924,0	0,0	396,8	1.527,2	20,8	20,8
Jul.	4,5	126	49,0	505,4	1.924,0	0,0	396,8	1.527,2	20,8	20,8
Ago.	3,2	177	48,9	505,4	1.924,0	0,0	396,8	1.527,2	20,8	20,8
Set.	2,4	236	48,9	151,6	1.879,8	398,0	396,8	1.483,0	6,2	7,5
Out.	2,7	210	49,0	151,6	1.879,8	398,0	396,8	1.483,0	6,2	7,5
Nov.	4,6	123	49,0	151,6	1.879,8	398,0 ^(d)	396,8	1.483,0	6,2	7,5
Dez.	8,8	64	48,7	151,6	1.879,8	398,0	396,8	1.483,0	6,2	7,5
Média	11,1	96,5	48,9	286,4	1.901,9	241,1	396,8	1.505,1	11,8	13,1

(a) Brasil, ELETRONORTE (1989, p. 51).

(b) Brasil, ELETRONORTE (1988, p. 87).

(c) Em 1989 o máximo de macrófitas ocorreu em julho, quando o nível do reservatório era 72 m acima do nível do mar, e o mínimo ocorreu em novembro, quando nível do reservatório era 68 m acima do nível do mar (Novo & Tundisi, 1994, p. 150). São interpolados os meses intercalados baseado nas suposições de Novo & Tundisi (1994).

(d) Novo & Tundisi (1994, p. 149); Fearnside (1995, p. 13) usou 858 km², baseado em volumes de água.

TABELA 4: FONTES DE METANO DA SUPERFÍCIE DO RESERVATÓRIO DE TUCURUÍ

	Área na época de água alta (km ²)	Área média (km ²)	Parte média da área (%)	Média de área (km ²)		Emissão (mg de CH ₄ /m ² /dia)		emissão (t CH ₄)		
				Fluxo alto (jan.-maio)	Baixo fluxo (jun.-dez.)	Período de fluxo alto ^(a)	Período de fluxo baixo ^(a)	Período de fluxo alto 151 dias	Período de fluxo baixo- 214 dias	Total 365 dias
Água aberta										
Sem árvores nem macrófitas	1.545,5	1.505,1	68,8	1.509,5	1.502,0	12,0	61,7	14.055	19.819	33.873
Área de árvores em pé	407,4	396,8	18,1	396,8	396,8	56,4	364,6	21.844	30.958	52.802
Total de água aberta	1.952,9	1.901,9	86,9	1.906,3	1.898,7				50.777	86.675
Áreas de macrófitas	294,1	286,4	13,1	262,8	303,2	73,0	67,5	2.679	4.380	7.059
Reservatório inteiro	2.247,0	2.188,3	100,0	2.169,1	2.202,0			38.578	55.157	93.734
Emissão média		114,3				117,8	117,1			

(a) Tabela 2.

TABELA 5: CÁLCULO DE EXPORTAÇÃO DE METANO PELAS TURBINAS DE TUCURUÍ EM 1991 ^(a)

Mês	Fluxo pelas Turbinas ^(b) (10 ⁹ m ³)	Cota da água ^(c) (m sobre o nível do mar)	Correção para oscilação sazonal (%) ^(d)	Profundidade da entrada das turbinas (m abaixo da superfície)	Concentração corrigida de CH ₄ na água liberada pelas turbinas ^(e) (mg CH ₄ /litro)	CH ₄ exportado através das turbinas (10 ⁶ t)
Jan.	10,9	67,5	-17	30,9	6,2	0,0676
Fev.	12,4	67,5	-33	30,9	5,0	0,0622
Mar.	12,4	69,3	-50	32,7	3,8	0,0464
Abr.	12,4	69,3	-33	32,7	5,0	0,0622
Mai	12,4	72,0	-17	35,4	6,2	0,0770
Jun.	9,4	72,0	0	35,4	7,5	0,0702
Jul.	9,4	72,0	17	35,4	8,8	0,0821
Ago.	6,3	72,0	33	35,4	10,0	0,0632
Set.	4,8	67,5	50	30,9	11,3	0,0542
Out.	4,8	67,5	33	30,9	10,0	0,0481
Nov.	9,4	67,5	17	30,9	8,8	0,0821
Dez.	9,4	67,5	0	30,9	7,5	0,0702
Média	9,5	69,3	0	32,7	7,5	0,0655
Total	113,8					0,7854

(a) Baseado na geração de energia em 1991 e nas mudanças no armazenamento e na evaporação (de água e áreas de macrófitas) em 1988.

(b) Alocado entre os meses somando ou subtraindo mensalmente da média das médias em unidades de uma turbina, para manter positivo o fluxo do vertedouro, dentro das restrições de capacidade das turbinas e o total anual de geração de eletricidade.

(c) Baseado em áreas (Tabela III), interpoladas em intervalos de 10 m (Brasil, ELETRONORTE, 1989, Fig. MT-TUC-05).

- (d) Divergência de porcentagem da média anual baseado em amplitude aproximada de oscilações em Petit-Saut de Galy-Lacaux *et al.* (1999).
- (e) Corrigido para profundidade do vertedouro com ajuste para concentração média anual de CH₄ à profundidade das turbinas (Figura 2) e para oscilações sazonais em concentração de CH₄. Por exemplo, a média anual da concentração de CH₄ para >30 m de profundidade é 7,5 mg CH₄/litro e em janeiro a concentração corrigida (-17%) é 6,2 mg CH₄/litro.

TABELA 6: CÁLCULO DE EXPORTAÇÃO DE METANO PELO VERTEDOURO EM 1991 ^(a)

Mês	Influxo (10 ⁹ m ³) ^(b)	Evapora- ção (10 ⁹ m ³) ^(c)	Mudança de armazena- mento (10 ⁹ m ³) ^(d)	Fluxo do vertedou- ro (10 ⁹ m ³) ^(e)	Profundi- dade do vertedou- ro (m debaixo da superfíc- ie) ^(f)	Média anual de concen- tração de CH ₄ na profundida de do vertedouro (mg CH ₄ /litro) ^(g)	Concentração corrigida de CH ₄ na água liberada pelo vertedouro (mg CH ₄ /litro) ^(h)	CH ₄ exportado através do vertedouro (10 ⁶ t)
Jan.	41,0	0,26	0,2	29,7	15,5	2,6	2,2	0,0648
Fev.	55,8	0,26	-0,4	43,5	15,5	2,6	1,8	0,0767
Mar.	65,1	0,28	-0,2	52,7	17,3	3,1	1,5	0,0813
Abr.	63,8	0,28	1,0	50,1	17,3	3,1	2,1	0,1035
Mai	41,0	0,31	-0,4	28,7	20,0	3,7	3,1	0,0894
Jun.	20,6	0,31	0,2	10,8	20,0	3,7	3,7	0,0403
Jul.	12,1	0,31	-0,2	2,5	20,0	3,7	4,4	0,0111
Ago.	8,4	0,31	-1,2	2,9	20,0	3,7	5,0	0,0145
Set.	6,3	0,26	-0,1	1,3	15,5	2,6	3,9	0,0050
Out.	7,1	0,26	0,6	1,5	15,5	2,6	3,5	0,0052
Nov.	12,3	0,26	0,5	2,2	15,5	2,6	3,1	0,0067
Dez.	23,6	0,26	-0,1	14,1	15,5	2,6	2,6	0,0370
Média	29,7	0,28	0,0	20,0	17,3	3,1	3,1	0,0446
Total	357,0	3,39	0,0	239,8				0,5353

(a) Baseado na geração de energia em 1991 e em mudança de armazenamento e evaporação (de água e áreas de macrófitas em 1988).

(b) Baseado em vazão em longo prazo (Tabela 3).

(c) Evaporação sem macrófitas é 1.548 mm/ano (Brasil, ELETRONORTE, 1989, p. 47); é presumido que a evapotranspiração de áreas de macrófitas é duas vezes esta taxa.

(d) baseado em volumes de armazenamento (Tabela 3).

- (e) Calculado por diferença do influxo e evaporação + turbinas (da Tabela 5) + mudança de armazenamento.
- (f) Baseado em níveis de água da Tabela 5.
- (g) Figura 2, usando valores pela profundidade do vertedouro com ajuste para oscilações sazonais em concentração de CH₄.
- (h) Ajustado com correção para oscilações sazonais em concentrações de CH₄ da Tabela 5.

TABELA 7: EMISSÕES LÍQUIDAS DAS PERDAS DE FONTES E SUMIDOUROS NA FLORESTA VIVA

Item	Fluxo por hectare		Emissão em	Fonte do valor de fluxo por hectare
	Gás (t de gás/ha/ano)	Equivalente de carbono (t/ha de C equivalente a CO ₂ /ano)	Tucuruí (10 ⁶ t de C equivalente a CO ₂ /ano)	
Perda de absorção de carbono de CO ₂ pela floresta em pé	1,2	0,3	0,06	Tian <i>et al.</i> (1998) ^(b)
Perda de emissão de N ₂ O do solo de floresta	-0,0087	-0,734	-0,14	Verchot <i>et al.</i> (1999, p. 37).
Perda de absorção de CH ₄ do solo de floresta	0,0005	0,00015	0,000028	Keller <i>et al.</i> (1986).
Perda de emissão de CH ₄ de térmitas de floresta	-0,014	-0,104	-0,020	Fearnside (1996b).
Total		-0,52	-0,10	

(a) Considerando área de floresta perdida como sendo 1.926 km² (Fearnside, 1995, p. 11). Potenciais de aquecimento global de 100 anos do Segundo Relatório de Avaliação do IPCC são usados: CO₂ = 1, CH₄ = 21, N₂O = 310 (Schimel *et al.*, 1996). Valores negativos representam emissão reduzida à atmosfera quando a floresta for perdida.

(b) Baseado na média modelada para 1980-1994.

TABELA 8: EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA DE TUCURUÍ EM 1990^(a)

Gás	Fonte de emissão	Fluxo (10 ⁶ t de gás)		C equivalente a CO ₂ (10 ⁶ t C) ^(b)		Contribuição relativa (%)	
		Cenário alto	Cenário baixo	Cenário alto	Cenário baixo	Cenário alto	Cenário baixo
CH ₄	Ebulição + difusão	0,0937	0,0937	0,537	0,537	5%	8%
	Decomposição acima da água (c)	0,0005	0,0005	0,003	0,003	0,03%	0,04%
	Perda de sumidouros no solo da floresta	0,0001	0,0001	0,001	0,001	0,01%	0,01%
	Perda de térmitas da floresta	-0,0027	-0,0027	-0,015	-0,015	-0,15%	-0,22%
	Turbinas	0,7025	0,1649	4,023	0,945	40%	13%
	Vertedouro	0,5353	0,5353	3,066	3,066	30%	44%
	CH ₄ total	1,3294	0,7919	7,61	4,54	75%	64%
CO ₂	Decomposição acima da água	9,34	9,3400	2,55	2,55	25%	36%
	Decomposição abaixo da água	0,11	0,1100	0,03	0,03	0,30%	0,43%
	Perda de absorção da floresta	0,23	0,2300	0,06	0,06	1%	1%
	CO ₂ total	9,68	9,68	2,64	2,64	26%	38%
N ₂ O	Perda de fontes no solo da floresta	-0,00167	-0,00167	-0,14	-0,14	-1%	-2%
Total				10,11	7,03	100%	100%

(a) Componentes são de anos diferentes: áreas de habitat e níveis de água de 1988, emissão por unidade de área por ebulição e difusão de 1996-1997, fluxos de água das turbinas e

vertedouro de 1991, conteúdo de CH₄ na água de 1989, emissões de decomposição de 1990.

- (b) Potencial de aquecimento global de CH₄ = 21; N₂O = 310 (Schimel *et al.*, 1996).
- (c) Fearnside (1995), baseado em decomposição acima do solo em floresta derrubada para agricultura e pecuária (Martius *et al.*, 1996).

TABELA 9: COMPARAÇÃO COM OUTRAS ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE GÁS DE EFEITO ESTUFA DE TUCURUÍ

Autor	Ano de emissão	Fatores incluídos ^(a)	Fluxo de CH ₄ por área de unidade (mg/m ² de CH ₄ /dia)	Emissão anual líquida (10 ⁶ t de gás)			C equivalente a CO ₂ (10 ⁶ t C/ano)	Método para estimativa de CH ₄
				CO ₂	CH ₄	N ₂ O		
Este estudo: Cenário baixo	1990	1,2,3,4,5,6,7		9,7	0,79	-0,00167	7,0	(b)
Este estudo: Cenário alto	1990	1,2,3,4,5,6,7		9,7	1,33	-0,00167	10,1	(b)
Fearnside, 1995.	1990	(1,2,3), 4		9,5	0,09	--	3,1	(c)
Rosa & Schaffer, 1995.	1990	(1,2,3)		--	0,52	--	3,0	(c,d)
Novo & Tundisi, 1994.	1988	1,2	96	--	0,085	--	0,49	(b)
Rosa <i>et al.</i> , 1996c, 1997b.	1993	1	15	--	0,013	--	0,07	(b,e)
Matvienko <i>et al.</i> , 2000.	1998-99	1,2	112	--(f)	0,099	--	0,57	(b,e)
Matvienko & Tundisi, 1997.	Set. 1993	1,2	15	--(f)	0,013	--	0,08	(b,e)

(a) Fatores: 1 = ebulição da superfície, 2 = difusão da superfície, 3 = turbinas, 4 = decomposição acima da água, 5 = CH₄ do solo da floresta, 6 = N₂O do solo da floresta, 7 = térmitas de floresta; parênteses () = implicitamente incluído.

(b) Baseado em dados de fluxo.

(c) Baseado em suposições relativo às taxas de decomposição e fração emitidas como CH₄.

(d) Emissão de CH₄ calculada para 1990 a partir das suposições de Rosa & Schaffer (1995, p. 155) como média de dois cenários, e convertida em C equivalente a CO₂ usando o potencial de aquecimento global de 100 anos do IPCC de 21 (Schimel *et al.*, 1996).

- (e) Emissões do reservatório calculadas a partir de informações por m^2 usando um valor de 2.430 km^2 para a área.
- (f) CO_2 medido de ebulição, mas não pode ser considerado uma emissão líquida porque uma grande parte dela é derivado de carbono contribuído pela bacia e pela produção primária no reservatório.

Fig. 1

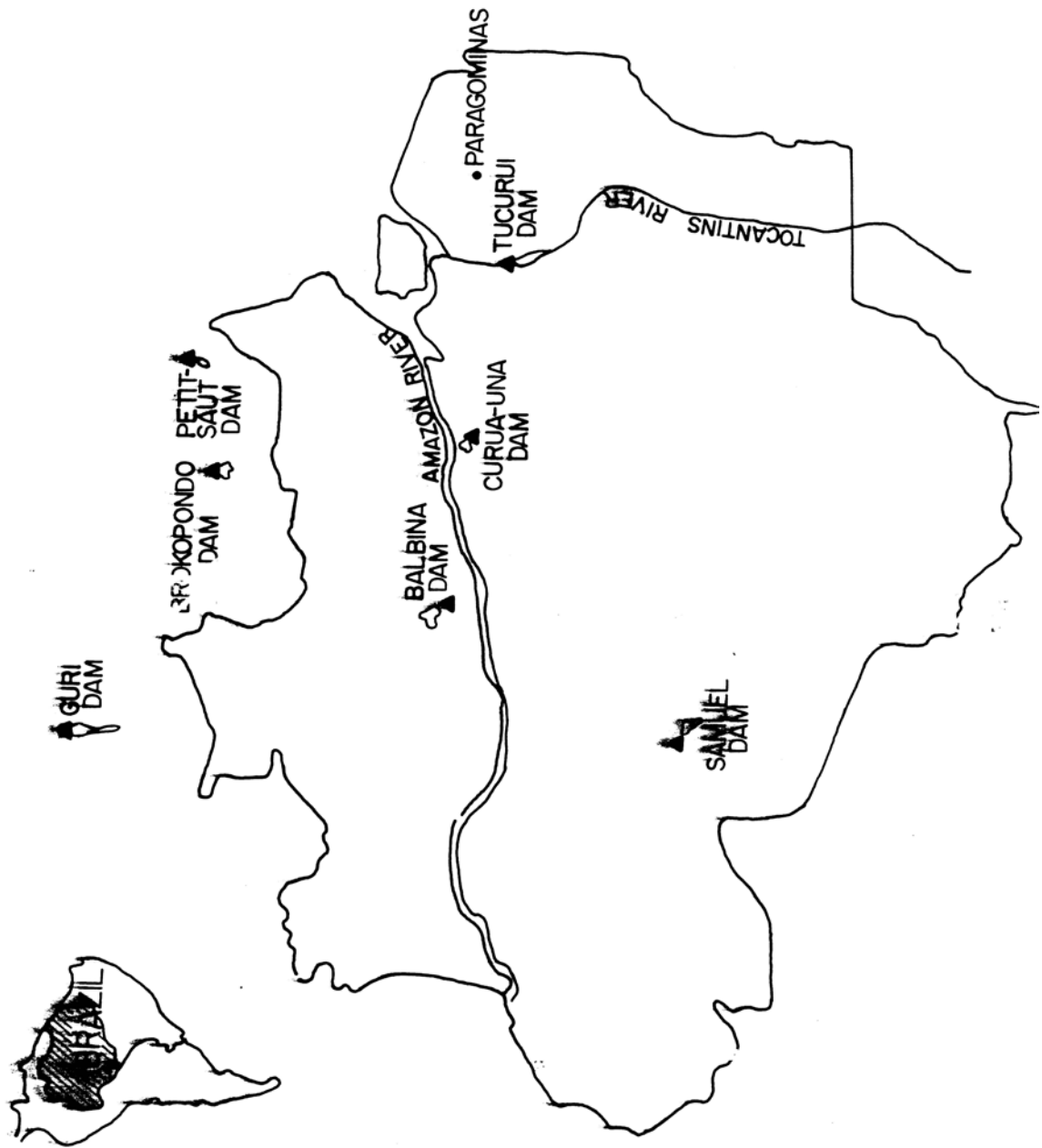


Fig. 2

