

**The text that follows is a REPRINT
O texto que segue é um REPRINT.**

Please cite as:
Favor citar como:

Fearnside, P.M. 2015. Emissões de gases de efeito estufa de reservatórios hidrelétricos na Amazônia: O exemplo de Tucuruí e comparação com as alternativas de combustível fóssil. pp. 161-177. In: P.M. Fearnside (ed.) *Hidrelétricas na Amazônia: Impactos Ambientais e Sociais na Tomada de Decisões sobre Grandes Obras*. Vol. 2. Editora do INPA, Manaus. 297 pp.

[Fearnside, P.M. 1997. 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.
doi:10.1017/S0376892997000118]

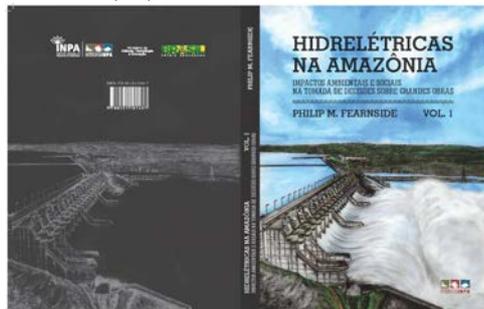
ISBN print: 978-85-211-0144-4 online: 978-85-211-0150-5

Copyright: Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia-INPA

The original publication is available from:

A publicação original está disponível de:

<http://livrariadoinpa.nuvemshop.com.br/> ou envie e-mail para: editora.vendas@gmail.com; editora@inpa.gov.br. Telefones: (92) 3643-3223, 3643-3438.



Download grátis em: http://philip.inpa.gov.br/publ_livres/2015/Livro-Hidro-V2/Livro%20Hidrelétricas%20V.2.pdf

Capítulo 27

Emissões de Gases de Efeito Estufa de Reservatórios Hidrelétricos na Amazônia: O Exemplo de Tucuruí e Comparação com as Alternativas de Combustível Fóssil

Philip M. Fearnside

Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA)
Av. André Araújo, 2936 - CEP: 69.067-375, Manaus, Amazonas, Brasil.
E-mail: pmfearn@inpa.gov.br

Tradução de:

Fearnside, P.M. 1997. 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. doi:10.1017/S0376892997000118

RESUMO

Hidrelétricas em áreas de florestas tropicais emitem dióxido de carbono e metano. Como essas emissões e seus impactos devem ser calculadas, e como as comparações devem ser feitas com as contribuições de aquecimento global a partir de combustíveis fósseis, podem levar a grandes diferenças em conclusões sobre as vantagens relativas dessas opções. O exemplo de Tucuruí é examinado para esclarecer essas diferenças. O presente trabalho estende uma análise anterior de um único ano para compreender 100 anos, e explora as diferenças entre estes impactos e as emissões de combustíveis fósseis comparáveis.

Os fatores considerados aqui no cálculo das emissões de Tucuruí incluem o estoque inicial e a distribuição de carbono, as taxas de decomposição e os caminhos que levam ao dióxido de carbono e metano, e as perdas de energia nas linhas de transmissão. Fatores não considerados incluem a degradação da floresta em ilhas e margens do reservatório, fontes de óxido nitroso em zonas de deplecionamento e linhas de transmissão, vias de emissão de metano adicionais de árvores em pé, a água que passa pelas turbinas, etc. As emissões da fase de construção, também não estão incluídas, nem estão as emissões do desmatamento por pessoas deslocadas pelo reservatório ou atraídas pelo projeto. A contabilidade completa da paisagem alternativa também está faltando. A padronização do nível de confiabilidade do fornecimento de energia elétrica é necessária para comparar opções de hidrelétricas e termelétricas.

Tipos de cálculos de emissões comumente utilizados incluem a contribuição definitiva para as emissões, o balanço anual de emissões em um determinado ano, e as emissões ao longo de um horizonte de longo prazo (por exemplo, 100 anos). O *timing* (trajeto temporal) das emissões difere entre a geração hidrelétrica e termelétrica, a hidrelétrica produzindo um grande pulso de emissões de dióxido de carbono nos primeiros anos após o enchimento do reservatório, enquanto uma usina termelétrica produz um fluxo constante de gases em proporção à energia gerada. Os impactos das emissões estão relacionados com a carga atmosférica (estoques) de gases, em vez de ser relacionados com as emissões (fluxos) de gases. Portanto, o impacto permanece por um longo tempo. De acordo com os cálculos do presente trabalho, a molécula de dióxido de carbono contribuída por Tucuruí estava presente, em média, na carga atmosférica 15 anos antes do que a molécula proveniente de geração de combustíveis fósseis em carga comparável.

Isso significa que, considerando um horizonte de tempo de 100 anos, uma tonelada de CO₂ emitida por Tucuruí tem 15% mais impacto do aquecimento global do que uma tonelada emitida por combustível fóssil, assumindo que não há desconto. Se o desconto por tempo for aplicado, então o impacto relativo da opção hidrelétrica é aumentado.

A preferência temporal, seja mediante uma taxa de desconto ou por um procedimento alternativo, é um fator chave que afeta a atratividade de energia hidrelétrica. No caso de baixas taxas anuais de desconto (digamos 1-2%), a atratividade de Tucuruí, embora menos do que sem descontar, ainda é 3-4 vezes melhor do que a geração a partir de combustíveis fósseis. Se a taxa de desconto chega a 15%, a situação é inversa, e a geração por combustível fóssil se torna mais atraente do ponto de vista do aquecimento global. A hidrelétrica de Tucuruí, com uma densidade de potência (capacidade instalada / área de reservatório) de 1,63 W m⁻² é melhor do que a média de 0,81 W m⁻² para os 5.500 km² de reservatórios existentes na Amazônia brasileira e também é melhor que a média de 1 W m⁻² estimada pelo autoridades elétricas brasileiras como a média para todo o desenvolvimento hidrelétrico planejado na região.

Palavras-Chave: gases de efeito estufa; barragens hidrelétricas; aquecimento global; reservatórios; emissões de carbono da floresta

INTRODUÇÃO

As hidrelétricas em áreas de florestas tropicais emitem gases de efeito estufa, tais como, dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄). A maneira em que essas emissões e seus impactos deve ser calculada, e como as comparações devem ser feitas com contribuições ao aquecimento global por outras fontes de energia, como os combustíveis fósseis, é uma questão de discordância.

A proporção de carbono na biomassa em decomposição que é emitida como CH₄, em vez de CO₂ influencia fortemente o impacto no aquecimento global de reservatórios. Por cada tonelada de carbono, CH₄ é muito mais potente do que o CO₂ em provocar o efeito estufa. O tempo de vida médio de CH₄ na atmosfera é muito mais curto do que o de CO₂ ou seja, 14,5 anos contra 125 anos, dada uma atmosfera de composição constante como presumido pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) (Albritton et al., 1995, p. 222).

O presente artigo analisa o exemplo de Tucuruí, a fim de esclarecer as diferenças entre as várias abordagens para este problema. A análise baseia-se em um estudo anterior (Fearnside, 1995) que calculou a emissão desta e de outras usinas hidrelétricas amazônicas para um único ano, ou seja, 1990, o que é o ano base para inventários de emissões atualmente em curso no âmbito da Convenção-Quadro sobre Mudança do Clima (UNFCCC). O presente trabalho é limitado ao caso de Tucuruí, mas gostaria de salientar que a intenção não é de retratar essa barragem como exemplo de barragens amazônicas típicas, existentes ou planejadas. A hidrelétrica de Tucuruí é melhor, do ponto de vista de gases de efeito estufa, do que qualquer uma das outras quatro grandes barragens existentes na Amazônia brasileira ou da média para as barragens planejadas, mas não representa um caso extremo. Considerando os valores oficiais para as áreas dos reservatórios, Tucuruí tem 1,63 watts (W) de capacidade instalada por m^2 de superfície do reservatório, enquanto a ELETROBRÁS (autoridade elétrica nacional do Brasil) considera a densidade média de energia para todo o potencial hidrelétrico da Amazônia sendo de apenas $1 W m^{-2}$ (Rosa et al., 1996a, p. 6). O valor equivalente para os $5.537 km^2$ de superfície de água nas quatro grandes barragens

existentes (cuja capacidade instalada total é de 4.490 MW) é de $0,81 W m^{-2}$, ou apenas metade da densidade de potência de Tucuruí. [Observação acrescentada em 2013: Isto refere a Tucuruí-I, com 4.000 MW instalados e reservatório de $2.247 km^2$. O projeto Tucuruí-II, implantado entre 1998 e 2002, aumentou a capacidade para 8.000 MW e a área do reservatório para $2.800 km^2$; em 2010 a capacidade instalada chegou a 8.370 MW e a área do reservatório a $2.850 km^2$.]

As comportas da barragem de Tucuruí, de $2.247 km^2$, foram fechadas em 1984, no rio Tocantins, e tornou-se o primeiro grande projeto hidrelétrico na Amazônia brasileira (Fig. 1). Apenas a Curuá-Una, fechada em 1977, com $72 km^2$, a havia precedido na região. Posteriormente barragens foram fechadas em 1987 em Balbina ($3.147 km^2$) e em 1988, Samuel ($465 km^2$) (áreas a partir de imagens LANDSAT-TM, veja Fearnside, 1995). Reservatórios planejados listados no Plano 2010, independentemente da data prevista para a construção, constituem uma área total de $100.000 km^2$ (ELETROBRÁS, 1987, p. 150), que é aproximadamente 20 vezes o total atual [em 1997] de $5.931 km^2$ na Amazônia Legal brasileira. As áreas acima dos reservatórios existentes são aquelas medidas a partir de imagens LANDSAT, e diferem ligeiramente dos valores "oficiais" (Fearnside, 1995, p. 11).



Figura 1. Amazônia Legal.

Tipos de cálculos de emissões

A contribuição definitiva para as emissões.

Uma maneira de abordar gases de efeito estufa (GEE) emitidos por hidrelétricas seria calcular a contribuição final que seria obtida com a decomposição de toda a biomassa da floresta inundada pelo reservatório. Isto é muito mais fácil de calcular do que o cálculo do impacto da inundação sobre o balanço anual de emissões líquidas, porque não precisamos saber a velocidade com que a decomposição ocorre. Rosa e Schaeffer (1995) fizeram um cálculo para Tucuruí usando um método equivalente a esta abordagem, presumindo que a biomassa tem uma meia-vida de apenas sete anos e considerando as emissões em um horizonte de tempo de 100 anos sem descontar. Os pressupostos desses autores podem ser usados nos cálculos, sendo que a liberação acumulada de mais de 100 anos seriam 2,3-5.300.000 t de CH₄ ou 56,4-128.900.000 t de CO₂ gás equivalente usando potenciais de aquecimento global (GWPs) do IPCC de 1994 com integração de 100 anos. No entanto, a análise de Rosa e Schaeffer (1995), presumia (sem explicação de qualquer justificativa) que 10-30% da biomassa se decompõe anaerobicamente (ou seja, liberando CH₄), e considera apenas o impacto do CH₄, ignorando assim a 70-90% do carbono que estes autores presumiram como liberado na forma de CO₂. Uma comparação válida exigiria a representação de todos os gases emitidos por ambas as opções (ver Fearnside, 1996b e Rosa et al., 1996b).

O cálculo da contribuição final de reservatórios para as emissões, embora que seja útil como uma ilustração, nos informa pouco sobre a contribuição para o balanço anual de emissões. A Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), assinada na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (UNCED), no Rio de Janeiro em junho de 1992 por 155 países mais a União Europeia, estipula que cada nação deve fazer um inventário dos estoques de carbono e dos fluxos de gases de efeito estufa. Isto implica que o balanço anual dos fluxos de GEE será o critério adotado para a atribuição de responsabilidade entre as nações para o aquecimento global. Como a biomassa florestal em reservatórios amazônicos se decompõe muito lentamente, a contribuição para o balanço anual é muito diferente do potencial final de emissão de carbono.

Junk e de Mello (1987, p. 381) fizeram dois cálculos das emissões de Tucuruí, em comparação com a geração com combustíveis fósseis. Em um cálculo otimista, eles concluíram que a quantidade de CO₂ liberada da floresta inundada em Tucuruí foi igual à emissão que a seria liberada se fosse gerada a mesma quantidade de energia a partir de combustíveis fósseis durante apenas 1,5 ano. Este cálculo pressupõe que a biomassa média seria de 300 t ha⁻¹, que nenhuma floresta seria derrubada fora da área do reservatório, e que a barragem iria gerar, desde o início, 8.000 MW de energia (ou seja, a configuração de Tucuruí-II e um fator de carga [impossível] de 100%).

O cálculo pessimista de Junk e de Mello (1987, p. 381) indicou que a dívida da emissão seria zerada depois de 37 anos. O último cálculo foi feito presumindo que a biomassa seria de 600 t ha⁻¹, que uma área do lado de fora do reservatório seria derrubada igual a cinco vezes a área do reservatório, e que 4.000 MW seriam gerados desde o início. Ambos os cálculos otimistas e pessimistas presumam que apenas metade da área do reservatório seria florestada, que todo o carbono da biomassa florestal é emitido como CO₂, e que a alternativa termelétrica usaria como combustível o diesel, com teor de energia de 10.900 kcal kg⁻¹ e um eficiência de conversão de 20% para energia elétrica.

Balanço anual de emissões em um ano específico.

De acordo com a Convenção-Quadro sobre Mudança do Clima (UNFCCC), os países atualmente [em 1997] estaria realizando inventários de emissões nacionais para avaliar os fluxos no ano de 1990, e este exercício será repetido em intervalos regulares ao longo dos anos vindouros. A capacidade para avaliar os fluxos em um ano específico, como 1990, é, portanto, importante. As quantidades aproximadas de biomassa presentes em cada zona em Tucuruí, e as emissões foram calculadas para 1990 (ano base para inventários nacionais - Fearnside 1995, Tabela 7). A emissão de metano de Tucuruí em 1990 totalizou 90.000 t de gás de CH₄. As emissões de gás de CH₄ em todo o reservatório foram 215 t a partir de térmitas (cupins), de 39.800 t a partir da água aberta, 14.300 t a partir de massas de macrófitas, e 40.200 t a partir da decomposição subaquática. A parcela da decomposição subaquática foi composta por contribuições da zona inundada permanentemente de 0 t a partir da madeira na zona de água de superfície, 11.900 t de madeira na zona

de água anóxica, 2.000 t de folhas e outros tipos de biomassa não-lenhosa na zona de água anóxica e 10.200 t de biomassa vegetal (raízes) abaixo do solo. As contribuições da zona sazonalmente inundadas foram de 13.300 t de decomposição subaquática de madeira, 1.800 t a partir de folhas e outros tipos de biomassa não-lenhosa (sem considerar árvores mortas), e 64 t a partir de decomposição de biomassa abaixo do solo (raízes).

Emissões ao longo de 100 anos

Cronograma das emissões.

A energia hidrelétrica tem algumas diferenças fundamentais em relação aos combustíveis fósseis que fazem com que as comparações dos impactos dessas duas opções produzam resultados muito diferentes dependendo do tratamento dado ao tempo no método de cálculo. A geração a partir de combustíveis fósseis produz emissões em proporção direta à energia produzida, de modo que o fornecimento de um fluxo constante de benefícios na forma de eletricidade irá produzir um fluxo constante de emissões. As hidrelétricas em áreas de floresta tropical, por outro lado, produzem um grande pulso de emissões nos primeiros anos após o fechamento, e, em seguida, as emissões diminuíram para um nível muito inferior, com a maior parte da biomassa florestal, especialmente a biomassa acima da água, ou já ser decomposta ou transferida para o fundo do reservatório. Os benefícios tipicamente seguem um padrão que é o inverso do padrão para os impactos. O benefícios começam em um nível baixo, com apenas algumas turbinas instaladas, e aumentam gradualmente ao longo de vários anos na medida em que as demais turbinas são instaladas.

MÉTODOS

Fatores incluídos no cálculo das emissões de Tucuruí

Estoque e distribuição inicial de carbono

As áreas de diferentes tipos florestais e a biomassa de cada tipo foram estimadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), como parte dos estudos ambientais contratados pela ELETRONORTE (Revilla Cardenas et al., 1982, p. 90). A média ponderada por área da biomassa acima do solo é de 394 t ha⁻¹ (peso seco em estufa), enquanto a biomassa total aproximada é de 517 t

ha⁻¹. A alocação da biomassa em zonas verticais baseou-se nas profundidades da água no nível normal e no nível mínimo de operação (ver Apêndice).

As remoções de biomassa por exploração madeireira antes da inundação foram pequenas (Fearnside, 1990). Da biomassa acima do solo, 1% foi presumida ter sido removida (Fearnside, 1995). Tucuruí foi caracterizada pela atividade madeireira subaquática iniciada em 1988 usando uma serra elétrica subaquática especialmente desenvolvida. No entanto, as negociações para usar a biomassa a partir desta fonte em larga escala para fornecer carvão para as usinas de ferro-gusa na área do Programa Grande Carajás terminaram sem acordo. No entanto, o presente cálculo presume que entre 1988 e 2000, a metade da biomassa foi removida.

Taxas e caminhos de decomposição.

O reservatório está dividido em duas zonas horizontais: a zona inundada de forma permanente e a zona inundada sazonalmente (Fearnside, 1995, Fig. 3). A biomassa é alocada entre quatro zonas verticais: aérea, água de superfície, água anóxica, e sub-solo (segundo Fearnside, 1995, Tabela 5), utilizando a distribuição vertical de biomassa na floresta estudada perto de Manaus por Klinge e Rodrigues (1973; ver Fearnside, 1995, Tabela 4). Com base nas proporções de biomassa no estrato vertical, as profundidades de água nos níveis operacionais mínimo e máximo, e as áreas de cada zona, a biomassa é calculada em cinco categorias, a saber, madeira acima da água, madeira na água de superfície, madeira na água anóxica, folhas e outros materiais não-madeiras na água anóxica, que são todos presumidos serem depositados no fundo do reservatório, e madeira abaixo do solo. A progressão dos valores de biomassa é calculada para cada ano, zona e componente de biomassa. Isso é feito usando as taxas de decomposição em cada zona e as taxas de queda de biomassa da zona vertical acima da água para as zonas abaixo da água. Os parâmetros usados para o cálculo das emissões de Tucuruí são os mesmos que os usados na análise anterior (Fearnside, 1995, Tabela 6). Ressalto que uma série de parâmetros em relação às taxas de decomposição subaquáticas são baseadas em suposições, mas que as taxas de decomposição acima da água, que geram a maior parte das emissões se baseiam em medições. Estas medições são as disponíveis para a decomposição em derrubadas da Amazônia (Buschbacher, 1984; C. Uhl & J. Saldariagga, manuscrito inédito, ver Fearnside, 1996a).

A biomassa inicialmente presente na área é estimada em 291,4 t ha⁻¹ de madeira acima da água, 5,33 t ha⁻¹ de madeira na zona de água de superfície (até 1 m de profundidade no nível de água mínimo), 55,47 t ha⁻¹ de madeira e outros componentes não-madeireiros na zona de água anóxica, e 122,69 t ha⁻¹ de madeira abaixo do solo. A estimativa de biomassa é baseado em medições feitas na área do reservatório de Tucuruí antes da inundação (Revilla Cardenas et al., 1982) e a alocação em zonas verticais é baseado em um estudo perto de Manaus (Klinge & Rodrigues, 1973). As zonas de água acima e abaixo do solo cobrem toda a parte arborizada do reservatório (1.926 km²), enquanto que a água de superfície e zonas de água anóxica (usando valores médios de profundidade) cobrem a parte florestal da zona permanentemente inundada (858 km²).

A produção de metano a partir de térmitas envolvidas na decomposição da madeira que se projeta para fora da água, é também calculada, seguindo Martius et al. (1996). Esta emissão é limitada pelo pequeno tamanho da população de térmitas que é capaz de se estabelecer antes da biomassa ser removida por meio de outros processos.

O metano também é produzido a partir da “água” em hidrelétricas, o que significa que se origina do carbono dissolvido, matéria orgânica do solo e da decomposição de macrófitas e outros organismos. Sendo que medições para essas emissões são escassas, um valor derivado a partir de estudos em lagos na várzea amazônica foi usado para este parâmetro (ver Fearnside, 1995, Tabela 8). Este é 53,9 mg CH₄ m⁻² dia⁻¹ para o mar aberto, e 174,7 mg CH₄ m⁻² dia⁻¹ para bancos de macrófitas. Tucuruí é presumido como sendo 90% da superfície de água descoberta e 10% de bancos de macrófitas. Medições baseadas em LANDSAT feitas por Novo e Tundisi (1994, p. 149) indicaram que o reservatório de Tucuruí constituía de 67% água aberta, 22% árvores mortas emergentes e macrófitas, e 11% área sazonalmente inundadas. A estimativa de emissão de CH₄ para o reservatório foi obtida pela multiplicação dessas áreas por valores de emissões por unidade de área a partir de medições feitas por Bartlett et al. (1990) em habitats semelhantes em lagos de várzea (Novo & Tundisi, 1994). As taxas de fluxo de CH₄ usadas no presente estudo são ligeiramente menores, com base nos resultados de Bartlett et al. (1990), sendo incluídas em uma média com outras medidas disponíveis sobre lagos de várzea (Fearnside, 1995, p. 15).

As perdas em transmissão

As perdas de energia em transmissão devem ser incluídas em qualquer cálculo para ter uma comparação justa entre energia hidrelétrica e energia gerada a partir de combustíveis fósseis. As usinas termelétricas geram eletricidade no local onde ela será usada, e as perdas de suas redes de distribuição local podem ser presumidas como iguais aos de distribuição local da energia hidrelétrica. O transporte de longa distância, desde o local da usina hidrelétrica até o ponto de consumo, aplica-se apenas à energia hidráulica, e deve ser considerada. Neste cálculo, uma perda de 2,5% é utilizada, sendo este o valor baixo presumido no estudo de viabilidade da hidrelétrica de Balbina (ELETRONORTE/Monasa/ENGE-RIO, 1976). Tucuruí tem 743 km de linha de transmissão com 500 quilovolts (kV) e 75 km de linha com 230 kV, sem contar os aproximadamente 500 km de linha no segmento de Imperatriz para São Luís com 500 kV (ELETRONORTE, s/d [C. 1983]). O total é, portanto, mais de quatro vezes o comprimento de 190 km da linha de 230 kV de Balbina, mas transmite volumes muito maiores de energia. As perdas em transmissão não foram incluídas nos cálculos relativos a 1990 em Fearnside (1995).

RESULTADOS

Emissões

As emissões provenientes da fase Tucuruí-I são mostrados na Figura 2 para um período de 100 anos. Um grande pulso de emissões de CO₂ nos primeiros anos após o enchimento do reservatório é evidente. O metano, sob suposições atuais, é emitido a uma taxa quase constante ao longo do horizonte de tempo. *[Observação acrescentada em 2013: este não é mais o caso, sendo que hoje sabemos que há um grande pulso de emissão de metano nos primeiros anos.]* Na Figura 3, o efeito de Tucuruí e seu equivalente de combustível fóssil são comparados em termos de impacto no aquecimento global pelas suas emissões anuais, expressas em termos de CO₂ equivalentes ajustados ao ano de emissão. Valores de CO₂ equivalente são, portanto, valores instantâneos sem ajuste para os efeitos das emissões não simultâneas, ao longo de um horizonte de tempo de, por exemplo, 100 anos. Estes valores equivalentes de CO₂ são calculados multiplicando-se as quantidades de cada gás pelo seu potencial de aquecimento global (GWP) do relatório intermediário do IPCC de 1994 com

integração de 100 anos (Albritton et al., 1995, p. 222). Considerando este tipo de base instantânea, ou seja, perdendo a quantidade acumulada de emissões desde o início da série histórica, a Tucuruí começa pagar sua 'dívida' de emissão a partir do sexto ano. Nas Figuras 2 e 3, o tempo "0" significa o momento em que a usina entra em operação, e não o momento em que a barragem foi fechada. As emissões provenientes da fase de enchimento (ou seja, antes da usina começar a geração comercial de energia), mais as emissões da construção, seriam representadas por números negativos para o tempo.

As cargas atmosféricas de GEE de Tucuruí são mostradas na Figura 4 para um horizonte de tempo de 100 anos. Os perfis comparáveis para as emissões da geração da mesma quantidade de energia a partir de combustíveis fósseis é mostrado na Figura 4-B. O efeito do grande pulso de emissões iniciais no processo de geração hidráulica é de manter um nível mais elevado de CO₂ na atmosfera durante um período após a barragem começa a igualar os combustíveis fósseis numa base instantânea (Fig. 3).

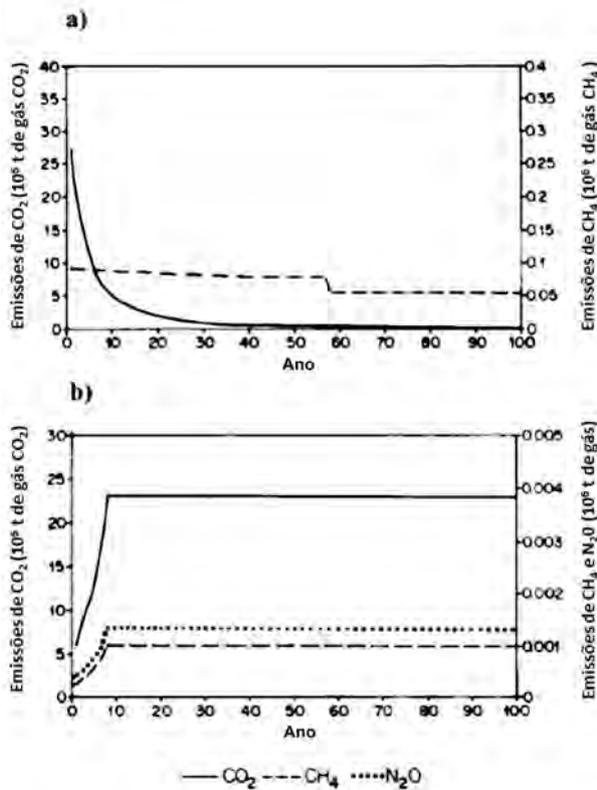


Figura 2. emissões de Tucuruí: (a) a partir do projeto hidrelétrico, (B) a partir de combustíveis fósseis deslocados por Tucuruí.

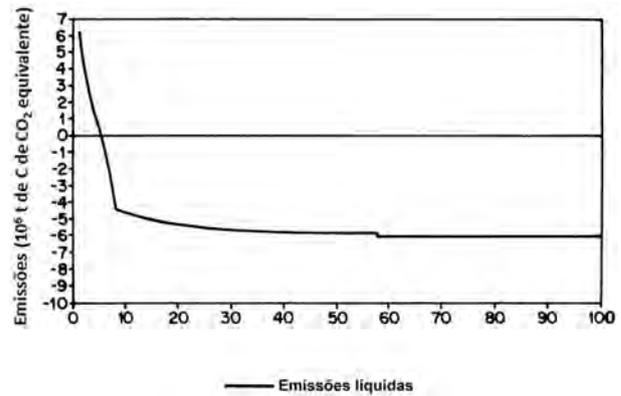


Figura 3. Tucuruí: as emissões líquidas de gases de efeito estufa.

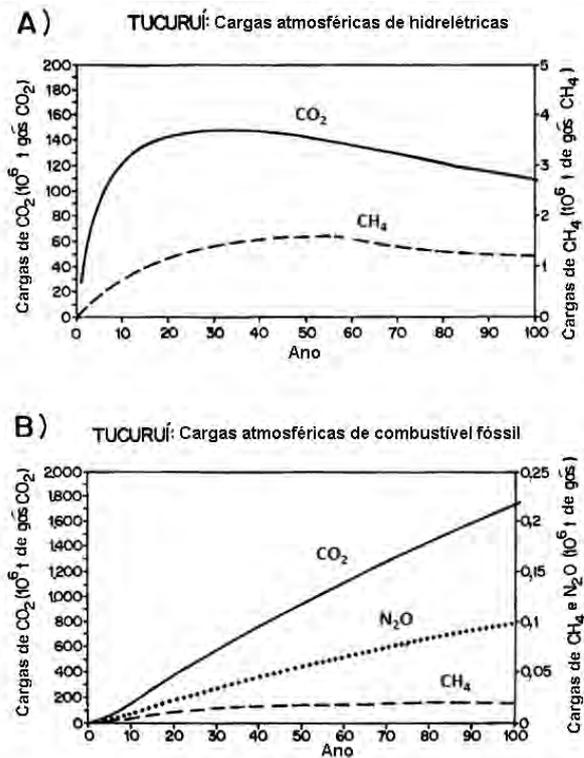


Figura 4. Tucuruí: cargas atmosféricas de gases de efeito estufa (A) a partir do projeto da hidrelétrica, (B) a partir de combustíveis fósseis substituídas por Tucuruí.

A molécula média radiativamente equivalente de CO₂, emitida por uma barragem hidrelétrica, está presente na atmosfera mais cedo do que a molécula correspondente emitida pela geração a partir de combustível fóssil. O 'CO₂ radiativamente equivalente' refere-se a equivalentes de CO₂, em termos de forçamento radiativo instantâneo (não ao GWP, ao longo de um horizonte de longo prazo, por exemplo como a integração de 100 anos dos GWPs mais

usados do IPCC). O “centro de gravidade” da distribuição do total de forçamento radiativo (Fig. 5) é o ano 52 para a produção hídrelétrica de Tucuruí, e 67 anos para o equivalente de Tucuruí a partir de combustível fóssil. A diferença de 15 anos representa um ganho significativo em adiar o aquecimento global. O valor atribuído a esta diferença de tempo depende da taxa de desconto escolhida.

O efeito da taxa de desconto sobre a vantagem relativa da geração hídrelétrica de Tucuruí, em comparação com o seu equivalente termelétrico, é mostrado na Figura 6. A relação benefício/custo diminui para o valor de um para uma taxa anual de desconto de 15%. Se os impactos da geração hídrelétrica fossem calculados incluindo as emissões da construção da barragem e de outras fontes não incluídas no presente cálculo, a curva seria deslocada para a esquerda e os benefícios seriam iguais aos impactos em um valor da taxa de desconto mais baixo.

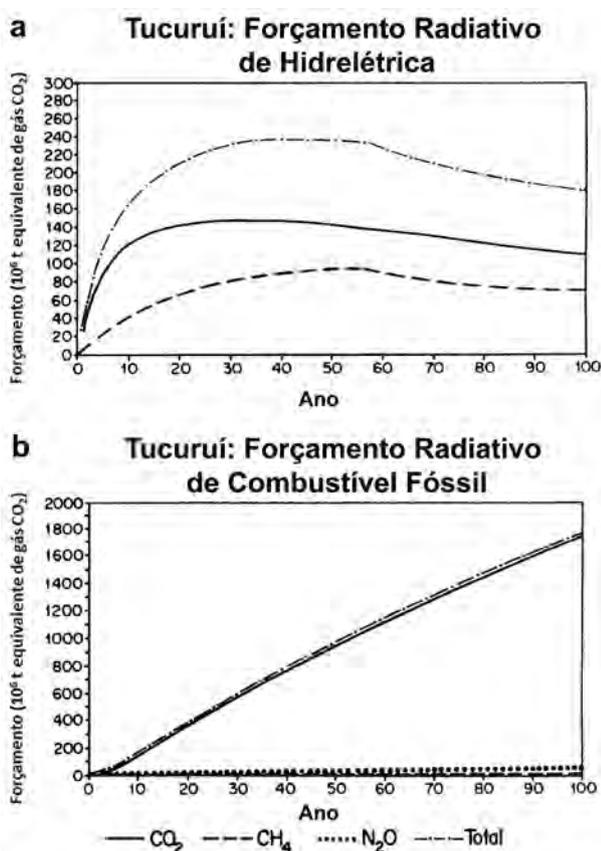


Figura 5. Tucuruí: forçamento radiativo das cargas atmosféricas de gases de efeito estufa (A) a partir do projeto da hídrelétrica, (B) a partir de combustíveis fósseis deslocados por Tucuruí. O centro de gravidade da curva de forçamento radiativo total é no ano 52 para as emissões de hídrelétricas e no ano 67 para emissões a partir de combustíveis fósseis, uma diferença de 15 anos.

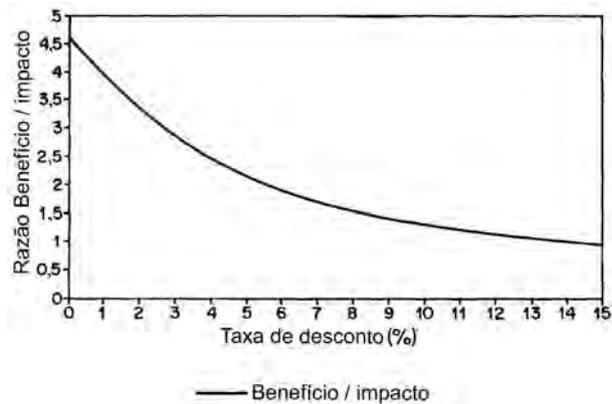


Figura 6. Tucuruí: descontando benefícios e impactos de gases de efeito estufa (benefício/impacto no aquecimento global)

DISCUSSÃO

Fatores não considerados no cálculo atual

A degradação da floresta nas ilhas e nas margens do lago

Florestas em ilhas e nas margens do reservatório são submetidas ao estresse do lençol freático elevado, fazendo com que muitas árvores individuais morram, assim diminuindo a biomassa da floresta. A degradação da floresta em ilhas também ocorre devido ao efeito da fragmentação florestal em pequenas manchas isoladas (e.g., Lovejoy et al., 1984).

Fontes de óxido nitroso

O óxido nitroso (N_2O), provavelmente, é liberado a partir de solos expostos na zona sazonalmente inundada durante períodos de rebaixamento. N_2O também é formado no ar através das linhas de transmissão de alta tensão. A quantificação do N_2O é importante por causa do elevado impacto por tonelada deste gás, em relação ao CO_2 , no aquecimento global, o seu potencial de aquecimento global (GWP) de 100 anos de integração é de 320 em relação ao CO_2 , numa base de massa de gás (Albritton et al., 1995, p. 222). [Observação acrescentada em 2013: o GWP de 100 anos de N_2O (sem retroalimentações) no quinto relatório do IPCC, de 2013, é de 265.]

Trajatórias das emissões de metano adicionais

Os processos pelos quais o CH_4 é liberado não estão bem quantificados, e poderiam aumentar significativamente a quantidade dessas emissões acima do que foi calculado no presente trabalho. Emissões aqui foram estimadas com base em

diferentes processos. Para as emissões a partir da água, isto é, com base em informações disponíveis sobre emissão da superfície da água de lagos de várzea. No entanto, grande parte do CH_4 é oxidada até CO_2 na coluna de água antes de ser liberado para a superfície. Processos que só aplicam a reservatórios, e não a lagos naturais, permitem que CH_4 seja lançado diretamente para a atmosfera, sem passar pela coluna de água inteira, aumentariam substancialmente as emissões sobre esta estimativa. Uma contribuição deste tipo é o CH_4 liberado quando a água passa pelas turbinas, levando água anóxica e diminuindo abruptamente a sua pressão. Com uma vazão média de $11.100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, o volume de $48 \times 10^9 \text{ m}^3$ de água de Tucuruí é substituída a cada 50 dias (0,138 anos). Marc Lucotte (comunicação pessoal) encontrou apenas uma pequena percentagem do total da liberação de CH_4 ocorrendo através da água que passa pelas turbinas do complexo La Grande, de 15.000 km^2 , em Quebec, Canadá. No entanto, como La Grande tem uma área tão grande, e porque o seu tempo de substituição da água é de aproximadamente um ano, a importância relativa da superfície da água será maior do que em Tucuruí. A razão é a mesma que a causa dos lagos naturais que têm, em geral, uma maior contribuição a partir do vento e da difusão pela superfície do que é o caso dos reservatórios (ver Baxter, 1977, p. 259).

A quantidade de CH_4 emitida pelo reservatório depende fortemente das rotas disponíveis através das quais o CH_4 na água anóxica na parte inferior do reservatório pode chegar à superfície sem ser oxidado para CO_2 na coluna d'água. O presente cálculo considera apenas a difusão através da superfície da água, a uma taxa presumida como sendo igual àquela que ocorre em lagos de várzea. Eventos individuais que trazem água anóxica para a superfície não seriam capturados por essas taxas médias, relativamente baixas. Períodos de frio (fria-gens) afetam a parte ocidental da Amazônia brasileira, mas não a área onde a represa de Tucuruí está localizada, na Amazônia oriental. Friagens causam a quebra da termoclina e a mistura completa da coluna d'água, trazendo água anóxica, rica em CH_4 , para a superfície, onde um pulso de emissões pode ocorrer. No entanto, em Tucuruí a calha do rio no reservatório foi estratificada termicamente apenas na estação de vazante, com o início das chuvas, o grande afluxo de água da chuva, com alto teor de oxigênio, elimina condições anóxicas na calha

durante o período de cheia em que o tempo de substituição da água é de apenas algumas semanas (Junk & de Mello, 1987, p. 380). Em baías estagnadas e áreas de margem, onde árvores em pé impedem o fluxo de água de Tucuruí, a estratificação é mantida durante todo o ano (Pereira, 1989 citado por Roulet, 1992, p. 52). O mesmo aplica-se para o reservatório Brokopondo em Suriname (Leentvaar, 1966, citado por Baxter, 1977, p. 261).

Os cálculos da liberação de CH_4 no presente artigo não incluem o possível papel das árvores mortas em pé no reservatório para servir como canais para CH_4 do solo do fundo do reservatório. Marc Lucotte (comunicação pessoal, 1996), encontrou árvores mortas em reservatórios no norte do Canadá agindo dessa forma, com CH_4 passando pelo xilema e floema das árvores mortas, permitindo que o gás fosse liberado diretamente para a atmosfera, escapando, assim, do bloqueio pela termoclina e evitando a oxidação de CO_2 na coluna de água.

Emissões na fase de construção

A construção de hidrelétricas emite gases de efeito estufa por meio do uso de combustível na escavação de terra e rocha, transporte de materiais, e as emissões da fabricação de cimento e aço. Tucuruí exigiu 6,2 milhões de m^3 de concreto (ELETRONORTE, s/d [1992], p. 5). Além disso, havia 55,3 milhões de m^3 de argila compactada, 20,0 milhões de m^3 de enrocamento, 22,9 milhões de m^3 de escavação em rocha, 24,3 milhões de m^3 de escavação comum, e 4,7 milhões de m^3 de filtros e transições (ELETRONORTE, s/d [C. 1983]). Para a linha de transmissão, 1.937 torres foram requeridos, sem contar o trecho Imperatriz-São Luís da linha.

Contabilidade completa da paisagem alternativa

É preciso ter uma estimativa das emissões que ocorreriam na ausência da barragem. A hipótese mais simples para estimar uma emissão desse tipo é que a paisagem permaneceria em um estado estático igual àquela que estava presente antes de construir a barragem, mas uma comparação mais justa seria alcançada através da comparação da barragem com um cenário para o desenvolvimento da região sem a barragem.

Os solos em florestas primárias são sumidouros naturais de metano, e a remoção desse sumidouro representa um pequeno impacto sobre o aquecimento global (Keller et al., 1986). Isso foi incluído no

cálculo das contribuições de represas hidrelétricas (junto com o desmatamento) para o balanço anual de emissões líquidas em 1990 (Fearnside, 1996a), mas não foi incluído no cálculo para Tucuruí no presente trabalho.

A possível absorção de carbono pelo crescimento de floresta natural, encontrada na única medição disponível até o momento (Grace et al., 1995), não foi incluída no cálculo. Se a floresta considerada for um sumidouro natural de carbono, então removê-la por meio de inundação teria maior impacto sobre o aquecimento global.

As emissões do uso do solo por desmatamento estimulado pela barragem pode ter um impacto significativo sobre o efeito líquido da barragem. Porque a população humana, deslocada pelo reservatório teria continuado a desmatar dentro da área de submersão se a barragem não fosse construída, apenas o pulso inicial de desmatamento a partir desta população realocada representa um verdadeiro acréscimo às emissões a partir do desmatamento. Colonos recém-chegados na rodovia Transamazônica perto de Altamira (Pará) derrubaram a floresta a uma taxa anual média de 3,6 ha por família durante os primeiros cinco anos, enquanto que em Ouro Preto do Oeste (Rondônia), os lotes foram apurados a uma taxa média anual de 2,7 ha por família durante os primeiros seis anos em que o lote foi ocupado, após o qual a taxa de desmatamento caiu para níveis muito baixos até que o lote fosse vendido para um novo proprietário (Fearnside, 1984). A atividade madeireira que teria continuado na área de submersão se o reservatório não tivesse sido criado provavelmente foi deslocada para florestas fora da área de submersão, sem que isso represente uma mudança líquida.

Deve-se também deduzir as emissões de CH₄ que teriam sido produzidas pela água do rio natural dentro do trecho inundado pelo reservatório. Da mesma forma, as emissões de CH₄ e N₂O devem ser deduzidas da área sazonalmente inundada (várzea) durante as fases de inundação e exposição do regime hidrológico natural do rio.

Emissões indiretas

Conhecido como “vazamento” em discussões sobre os benefícios líquidos de plantações silviculturais como uma medida de mitigação do aquecimento global, os efeitos indiretos podem aumentar substancialmente os impactos no aquecimento global de um projeto de desenvolvimento, incluindo

uma usina hidrelétrica como Tucuruí. O reservatório tornou necessária a mudança de um trecho de 120 quilômetros da rodovia Transamazônica, deslocando esta estrada (e suas vias associadas de acesso) em uma área de floresta. Tucuruí deslocou 3.350 famílias (17.319 pessoas), de acordo com estimativas feitas depois que o reservatório estava cheio (Monosowski, 1990, p. 32). Embora algumas dessas pessoas se mudaram para as cidades, a maioria foi transferida para áreas de assentamento onde essas pessoas desmataram áreas para fins agrícolas, particularmente na Gleba Parakanã na margem ocidental do reservatório). Uma infestação severa de mosquitos do gênero *Mansonia* neste local (Tadei et al., 1991) fez com que muitas dessas pessoas, posteriormente, passassem para uma nova área de floresta, onde desmatamento adicional foi realizado. Além disso, pessoas de outras partes do País foram atraídas para a área do projeto, onde derrubaram ainda mais floresta.

Nem todas as emissões de desmatamento pela população atraída para a barragem podem ser responsabilizadas pelo projeto, no entanto, já que muitas dessas pessoas teriam desmatado florestas em outras partes da Amazônia se não fosse a represa. O mesmo se aplica às emissões provenientes de centros urbanos que cresceram como resultado da barragem. A substituição de infraestrutura urbana inundada pela barragem, no entanto, representa um impacto direto. Tucuruí inundou a cidade de Jacundá, exigindo a reconstrução completa da cidade em um novo local (Mougeot, 1990).

Um efeito substancial de Tucuruí, seja positivo ou negativo, é o seu papel no transporte fluvial. A barragem poderia ter facilitado o transporte a partir de sua área de influência, se as eclusas tivessem sido concluídas. O rio Tocantins anteriormente tinha corredeiras no trecho do rio hoje submerso pelo reservatório. Para contornar as corredeiras durante o “boom” da borracha no Brasil, essa barreira motivou a construção em 1905 de uma ferrovia que atualmente está abandonada.

Em 1979, foi tomada a decisão de que, simultaneamente com a construção da barragem de Tucuruí, eclusas seriam construídas (Pinto, 1982, p. 47). Embora a construção das eclusas de navegação tenha iniciado, elas foram abandonadas antes da conclusão. O transporte por balsas no rio Tocantins teria sido um meio menos consumidor de energia para exportação de minério da mina de Carajás do que a opção

ferroviária adotada mais tarde. Carajás tem o maior depósito de minério de ferro do mundo de alta qualidade, com uma jazida de minério estimada em 11×10^9 t, o que é suficiente para a mineração no ritmo atual [de 1997] por 400 anos. Além do ferro, a área de Carajás tem depósitos exploráveis de cobre, bauxita e outros minerais, e é associada com o Programa Grande Carajás para administrar um plano agrícola, que futuramente deverá exportar grandes quantidades de soja e outros produtos agrícolas (ver Fearnside, 1986, 1989a). O minério e outros produtos de Carajás são exportados usando uma ferrovia de 890 km, que foi concluída em 1983. Com a estrada de ferro sendo um fato consumado, a conclusão da construção das eclusas de Tucuruí passou a ser visto como parte de uma segunda fase de desenvolvimento de Carajás para permitir a expansão das exportações para além dos limites impostos pela capacidade da ferrovia (Pinto, 1982, p. 46). É também uma opção para aumentar substancialmente as exportações agrícolas da Bacia do Tocantins-Araguaia, especialmente de soja. Se as eclusas forem concluídas, então o reservatório iria começar a produzir uma energia e economia de carbono, evitando o uso de combustíveis para o transporte ferroviário adicional.

A capacidade da linha férrea (30 milhões de t ano⁻¹ de minério) limita as exportações, que pode ser maior hoje se o transporte fosse feito por barcaça. Porque o minério de Carajás é extraordinariamente puro (66% de ferro), a exploração de jazidas com teores mais baixos no resto do mundo (incluindo aquelas em Minas Gerais), resulta em mais emissões de GEE provenientes do transporte e fundição do que seria o caso se este ferro fosse fornecido a partir de Carajás.

Existe alguma possibilidade de que as eclusas na barragem de Tucuruí possam um dia ser concluídas. Embora o assunto seja levantado periodicamente, nenhum compromisso específico tem sido feito, e, portanto, é mais realista calcular cenários de emissões sem estes recursos. [Observação acrescentada em 2013: as eclusas de Tucuruí foram finalizadas em 2010, com atraso de 26 anos.]

A padronização do nível de serviço

A comparação de diferentes tipos de geração de energia requer decisões sobre o nível de serviço, ou seja, a constância do fornecimento de eletricidade que deve ser fornecida por cada opção. A geração hidrelétrica na Amazônia tem um forte ciclo sazonal

de oferta de energia, devido à disponibilidade sazonal de água para geração de energia. Se a eletricidade fosse oferecida no mesmo nível de serviço tanto para hidrelétricas como termelétricas, para fins comparativos, seria preciso incluir as emissões dos geradores termelétricos de substituição que seriam necessários para fornecer uma quantidade constante de energia durante todo o ano. A padronização do nível de serviço é uma técnica aceita para comparar opções que diferem grandemente em termos de confiabilidade de energia, como é o caso de comparações entre energia eólica e a geração térmica.

No caso de Tucuruí, uma normalização completa no pico de potência pode ser irrealista como uma representação das escolhas reais envolvidas. Quando os serviços que estão sendo prestados são essenciais, como no fornecimento de centros urbanos, geração por usinas termelétricas de substituição é necessária durante os períodos de vazante. Por exemplo, a hidrelétrica de Balbina, que fornece energia à cidade de Manaus, Amazonas, é completamente substituída por usinas térmicas durante parte do ano. No caso de Tucuruí, no entanto, cerca de dois terços da energia é utilizada para a fabricação de alumínio, e pode ser mais econômico para beneficiar o alumínio apenas na proporção de energia hidrelétrica disponível, em vez de fornecer grandes quantidades de energia suplementar mais cara a partir de sistemas térmicos de apoio. Em qualquer caso, algum tipo de correção para representar a substituição térmica, seja total ou parcial, é necessário para uma comparação justa de Tucuruí com a geração térmica.

Tempo e os impactos da hidrelétrica contra combustíveis fósseis

Cronograma das emissões

O pulso inicial de emissões quando um reservatório é inundado, especialmente emissões de CO₂ liberado da decomposição de árvores mortas que se projetam acima da água, excede em muito os benefícios para o aquecimento global da barragem em termos de substituição de combustíveis fósseis. Diferentes barragens variam enormemente em termos do tempo necessário para começar a ter emissões menores do que termelétricas por unidade de eletricidade gerada, mesmo numa base instantânea, isto é, para as emissões anuais caírem a um nível inferior ao que é necessário para produzir a mesma energia a partir de combustível fóssil, omitindo os impactos acumuladas do pico inicial de emissões.

As emissões de metano calculadas a partir das presentes hipóteses são quase constantes ao longo do tempo. No entanto, há alguma evidência de que um pulso muito maior de CH_4 é emitido logo após o enchimento do reservatório. Tundisi (não publicado, ver Rosa et al., 1996c, p. 144 e 150.) mediu emissões de CH_4 com câmaras flutuantes de Samuel 3 meses após o alagamento e em Tucuruí 4,5 anos após o alagamento; essas medidas têm sido usadas por Rosa et al. (1996c, p. 148-149) para estimar as taxas de fluxo de metano a partir da superfície do reservatório de $227 \text{ g C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ em Samuel e 0 em Tucuruí. A falta de emissões de CH_4 na superfície da água em Tucuruí não significa que o reservatório não esteja emitindo este gás através de outros meios, especialmente a partir da água que passa através das turbinas.

A justificativa para uma taxa de descontos

A diferença entre a importância de uma tonelada de GEE na atmosfera agora contra uma tonelada daqui a 15 anos são os impactos do aquecimento global causados por esses gases em 15 anos, tais como, inundações e secas. O magnitude do valor que a sociedade atribui a esses impactos é um fator importante na avaliação das contribuições hidrelétricas para o aquecimento global.

Rosa e Schaeffer (1994) propuseram uma alternativa ao potencial de aquecimento global do IPCC de tal forma que o trajeto temporal (*timing*) das emissões é considerado, e o impacto sobre a forçamento radiativo só é contado a partir da data de emissões. Este é um avanço em relação ao método do IPCC, que se baseia na comparação de emissão simultânea de uma molécula de CO_2 e uma molécula de outro gás, como o CH_4 . O método de Rosa e Schaeffer (1994) não significa, contudo, incluir qualquer ponderação por preferência temporal, presumindo uma taxa de desconto igual a zero. Ambos os recursos são necessários: a consideração do tempo do forçamento radiativo (ou seja, o momento da presença da carga atmosférica de gases, como distintos do trajeto temporal das emissões), e consideração do peso que a sociedade dá ao tempo. O método de Rosa e Schaeffer (1994) também difere do método adotado aqui em ter diferentes horizontes de tempo durante o qual as emissões são consideradas e durante o qual os efeitos radiativos das cargas atmosféricas são considerados. No método adotado aqui, os dois horizontes temporais terminam em um ponto comum no tempo (100 anos após o fechamento da barragem).

Tanto a formulação de Rosa e Schaeffer (1994) e a que é adotada aqui implicam na consideração dos diferentes gases de uma forma diferente daquela atualmente adotada pelo IPCC. A principal justificativa para a formulação de GWP do IPCC é que uma formulação mais complicada seria muito difícil para os tomadores de decisões políticas entenderem (R.T. Watson, declaração pública, 1992). No entanto, os GWPs são, de fato, uma caixa preta a partir do ponto de vista dos tomadores de decisão, que não compreendem os detalhes de como os GWPs são derivados. Sob tais circunstâncias, pode-se também usar uma formulação mais complicada que melhor reflita a importância do tempo das emissões e dos seus impactos no forçamento radiativo. A nova caixa preta seria utilizada da mesma forma pelos tomadores de decisão, e o resultado seria uma comparação mais justa de opções de energia em termos de interesses sociais.

Efeitos da preferência temporal

A questão da aplicação de uma taxa de desconto (ou uma ponderação temporal alternativa) para as emissões de GEE e/ou seus impactos é uma questão de debate. O Global Environment Facility (GEF), que administra fundos do Banco Mundial destinados ao combate ao aquecimento global no âmbito da Agenda 21, atualmente não aplica nenhum desconto ao carbono ou aos gases de efeito estufa e seus impactos.

Existem boas razões para usar algum tipo de ponderação por preferência temporal para os impactos do aquecimento global, no lugar de um esquema de desconto igual a zero. O acúmulo de gases de efeito estufa na atmosfera inicia uma sequência de impactos (incluindo aumentos nas taxas de mortalidade humana), e não apenas um impacto de uma só vez. Se este fluxo de impactos começa mais tarde, em vez de mais cedo, a poupança (vidas humanas, por exemplo) entre os tempos “mais cedo” e “mais tarde” representa um ganho permanente, mesmo que os mesmos indivíduos possam morrer no ano seguinte. A lógica é diretamente análoga à prática aceita de considerar as emissões de combustíveis fósseis evitadas como poupanças permanentes, mesmo que o mesmo barril de petróleo possa ser queimado no próximo ano. Aplicando mesmo um desconto muito pequeno aumentaria enormemente o impacto do grande pulso inicial de emissões de hidrelétricas em comparação com o impacto das

emissões distribuídas uniformemente no tempo da energia gerada a partir de combustíveis fósseis.

A longa vida atmosférica de alguns gases de efeito estufa, especialmente a vida média de 125 anos de CO₂ (Albritton et al., 1995), significa que os impactos do aquecimento global continuarão por muito tempo depois de uma emissão ocorrer. Mesmo que as emissões sejam muito reduzidas, a carga atmosférica restante de emissões passadas continuaria a provocar secas, enchentes e outros impactos. Estas características das mudanças climáticas contribuem para a justificativa de alguma forma de desconto ou outra ponderação pela preferência temporal.

Embora não seja tratado de forma explícita, o desconto está implícita na ênfase da UNFCCC no balanço anual de emissões líquidas, o que implica que este será o critério para todas as penalidades negociadas depois como protocolos no âmbito da Convenção. Isso está implícito no acordo de todos os países para realizar inventários dos fluxos anuais de emissões (ao invés da emissão líquida comprometida, o que capturaria as diferenças de longo prazo entre a geração hidrelétrica e termelétrica). O critério de balanço anual implica um desconto, porque os países do mundo, de fato, aplicam taxas de desconto ao considerar dinheiro. Isso significa que, do ponto de vista do planejamento nacional, os custos financeiros dos impactos climáticos, os custos financeiros das medidas de mitigação e os custos financeiros de quaisquer multas ou impostos sobre as emissões seriam tratados desta forma.

Entre as implicações do critério de balanço anual (e, portanto, o desconto) é de que o atraso na negociação de protocolos para implantar multas e medidas semelhantes cria uma motivação para construir projetos hidrelétricos agora, ao invés de construí-los mais tarde. Desta forma, o grande pulso de emissões não é contado contra o balanço anual de emissões líquidas do país.

Supondo-se que uma taxa de desconto maior que zero é aplicada, o valor escolhido para a taxa teria uma grande influência sobre as escolhas energéticas indicadas como preferíveis. Da mesma forma como acontece no caso de desconto para cálculos financeiros, hidrelétricas serão indicadas como mais atraentes do que a geração térmica se taxas de desconto mais baixas são usadas. Nos cálculos financeiros, os proponentes de hidrelétricas geralmente argumentam fortemente para as taxas de desconto mais baixas do que as utilizadas para outros tipos

de investimentos. Devido aos longos prazos entre aplicações financeiras e o início de receitas da venda de energia elétrica, o desenvolvimento hidrelétrico, muitas vezes, fica pouco atraente no caso de aplicar taxas de desconto mais elevadas. Proponentes de hidrelétricas, no entanto, não defendem uma taxa de desconto zero na esfera financeira. A mesma tem de ser aplicada aos benefícios e impactos na esfera de aquecimento global.

Segundo alguns, a taxa de desconto utilizada para o carbono deve ser a mesma que é utilizada para o dinheiro (B. Solberg, declaração pública, 1994). A taxa de desconto utilizada para o carbono pode ser diferente (ou seja, inferior) daquela que é usada para dinheiro (D. Ahuja, comunicação pessoal, 1992); trabalhos anteriores sobre potenciais de aquecimento global tem usado uma taxa de desconto de 5% (Lashof & Ahuja, 1990).

As taxas de desconto na faixa de 10-12% são comuns em análises financeiras de grandes projetos de desenvolvimento na Amazônia. Alguns economistas do Banco Mundial até recomendam o uso de uma taxa de desconto de 15% para projetos na Amazônia brasileira (Skillings & Tcheyan, 1979). Estas e outras taxas de desconto representam ajustes do valor real, isto é, após a correção pela inflação. Minha preferência (Fearnside, 2002), sob um esquema alternativo de preferência temporal tem um efeito integral (área sob a curva de ponderação temporal), equivalente a uma taxa de desconto de 1,24%.

As taxas de desconto na faixa utilizada para cálculos financeiros teriam um efeito dramático sobre a atratividade de geração hidrelétrica a partir de uma perspectiva de aquecimento global (Fig. 6). A uma taxa de desconto anual de 15%, o combustível fóssil se torna mais atraente, no caso dos cálculos atuais para Tucuruí. A taxa de desconto a que esta mudança de preferência poderia ocorrer seria menor se fosse feita uma correta contabilização de muitas fontes de emissões de Tucuruí (construção, desmatamento deslocado, etc.). Também deve ser lembrado que Tucuruí é melhor do que a média das barragens.

O desconto teria um efeito significativo sobre a importância dada às emissões provenientes da fase de construção das hidrelétricas, como as emissões do concreto e aço e do transporte de materiais. Como estas emissões ocorrem antes das barragens serem fechadas, o ano da emissão é negativa e seu impacto terá que ser inflado, ao invés de descontada, para normalizá-los para o ano zero. Em comparação com

os combustíveis fósseis, o longo tempo de espera da construção de uma barragem hidrelétrica, bem como as maiores exigências para materiais, fará com que esse fator pese contra hidrelétricas.

Planos de expansão e desenvolvimento da bacia

O presente cálculo considerou apenas a configuração atual [*em 1997*] da barragem (Tucuruí-I). Novos aumentos na produção (e em impactos) podem ocorrer no futuro caso o nível normal de operação fosse aumentado para permitir a instalação de mais turbinas. A produção de energia e os impactos podem também aumentar devido à construção de barragens adicionais a montante de Tucuruí, regulando assim a vazão do rio, a fim de fornecer mais água durante a estação de vazante. Os impactos adicionais de aumentar o nível da água e/ou os impactos da construção de barragens adicionais teriam que ser levado em conta.

A ELETRONORTE tem planos para expandir a capacidade instalada de Tucuruí para 7.960 MW no projeto Tucuruí-II [Obs.: A capacidade instalada foi aumentada para 8.370 MW em 2010.]. Dentro do conhecimento deste autor, a ELETRONORTE nunca liberou uma cifra para a área do reservatório de Tucuruí a uma cota de 74 m acima do nível médio do mar, que é o nível normal de operação no plano original para o projeto Tucuruí-II. O resultado tem sido que vários autores (incluindo este) calcularam os valores de densidade de potência para a configuração completa de Tucuruí-II usando a área ao nível normal de operação de 72 m adotado para a configuração atualmente [*em 1997*] instalada: Tucuruí-I, de 3.960 MW (por exemplo, Fearnside, 1989b; Goodland, 1980). A ELETRONORTE, desde então, decidiu que as pessoas que se mudaram para a área ao longo da presente margem do reservatório fariam com que elevar o nível de água até 74 m fosse politicamente impossível, e os planos atuais [*em 1997*] para Tucuruí-II visam manter o nível de água em 72 m (John Denys Cadman, comunicação pessoal, 1996). Não se sabe quanto a alteração iria reduzir a quantidade de energia que a configuração de Tucuruí-II poderia produzir anualmente.

Uma indicação da área adicional que seria inundada se o nível da água fosse aumentado para 74 m com Tucuruí-II é dado por um levantamento da vegetação, que considerou 415,37 km² para a área prevista a ser inundada na segunda fase (Revilla Cardenas et al., 1982). Utilizando a área medida

com LANDSAT para Tucuruí-I, podemos calcular que a área de superfície total do reservatório se o nível de água de Tucuruí-II for aumentado seria de 2.662 km². Se as áreas utilizadas no levantamento de vegetação fossem utilizadas, a área total (floresta e leito do rio) seria de 3.047 km².

Além de qualquer outra inundação da área de Tucuruí, o esquema de Tucuruí-II exigiria a regulação da vazão do rio Tocantins, por meio da construção da Barragem de Santa Isabel, no rio Araguaia, o primeiro afluente importante a montante de Tucuruí (Paulo Edgar Dias Almeida, comunicação pessoal, 1991). Os impactos desta deve, portanto, ser considerados na avaliação da proposta de Tucuruí-II. ELETRONORTE tem planos para construir barragens a montante de Tucuruí nos rios Tocantins e Araguaia (ver Junk & de Mello, 1987, p. 370). Os impactos e benefícios desses esquemas mais amplos teriam que ser avaliados juntamente com Tucuruí. O plano completo para o desenvolvimento da bacia do Tocantins/Araguaia visa 26 barragens a montante de Tucuruí. [*Observação acrescentada em 2013: o projeto Tucuruí-II foi lançado, de surpresa, em junho de 1998, sem EIA/RIMA, e em 2002 o nível da água foi elevado para a cota de 74 m.*]

CONCLUSÕES

A hidrelétrica de Tucuruí produz emissões significativas de gases de efeito estufa, embora menos emissões seriam produzidas por combustíveis fósseis, quando são consideradas em um horizonte de tempo de 100 anos. A atratividade relativa da hidrelétrica em comparação com a geração termelétrica, em termos de impacto no aquecimento global, é altamente sensível à taxa de desconto ou outras formas de ponderação de preferência temporal. Este autor considera a natureza dos impactos das mudanças climáticas como sendo adequada a aplicação de algum tipo de ponderação por preferência temporal. Os impactos no aquecimento global de Tucuruí podem até ultrapassar os da geração a partir de combustíveis fósseis, se os impactos são avaliados utilizando as taxas de desconto comuns em análises financeiras (taxas que estão dentro da faixa em discussão sobre o tema, embora não sejam recomendadas por este autor). Como a razão entre benefícios energéticos e impactos no aquecimento global em Tucuruí é mais favorável do que é o caso para a média das barragens existentes na Amazônia brasileira, e também para a média das barragens planejadas, as decisões sobre

o desconto temporal dos impactos no aquecimento global serão fundamentais para as escolhas a serem feitas entre opções energéticas na região.

ANEXO: PROFUNDIDADE E ÁREA DE TUCURUÍ

Área de Tucuruí em seu nível normal de 72 m acima do nível médio do mar é oficialmente indicada para ser 2.430 km² (ELETRONORTE s/d [1987], p. 24-25), que está perto dos 2.247 km² da área medida em 1989 usando imagens LANDSAT-TM (Fearnside, 1995), que é usada nos cálculos neste trabalho. A ELETRONORTE, o monopólio estatal do Brasil de energia para a região norte do Brasil [em 1997], construiu e opera a barragem de Tucuruí. A área do leito do rio era de 321 km², considerando-se um comprimento de reservatório de 170 km e uma largura média de 1.891 m estimados por mim a partir de imagens em escala de 1:1.000.000 de radar aerotransportado de visão lateral (SLAR) (Projeto RADAMBRASIL, 1981). Considerando-se a área da superfície da água medida de imagens LANDSAT, menos a área do leito do rio e a área previamente desmatada (ignorando qualquer desmatamento pré-inundação que não foi feito pela ELETRONORTE), a área de floresta perdida para a inundação foi de 1.926 km². A área de 100 km² desmatada pela ELETRONORTE na área do reservatório também resultou em emissões de gases de efeito estufa de aproximadamente 20.000 t C, que não são consideradas aqui. O enchimento do reservatório durou de 6 de setembro de 1984 a 20 de março de 1985.

A profundidade de levantamento é de 14 m (ELETRONORTE, s/d [1992], p. 5), e a profundidade média do reservatório no nível mínimo de água pode ser calculada em 9,7 m. Esta profundidade média é baseada em um nível mínimo normal de operação de 58,0 m acima do nível médio do mar (ELETRONORTE, s/d. [C. 1983]). Um nível mínimo de operação de 51,6 m (ELETRONORTE, s/d, p. 2-1; ELETRONORTE, s/d [1992]) implica em uma profundidade de rebaixamento de apenas 3,3 m. Área de floresta inundada ao nível mínimo de água é considerada como proporcional ao volume de água nestes dois níveis, a partir de ELETRONORTE (s/d [C. 1983], p. 6).

A área de floresta inundada no nível operacional é de 192.553 ha, e no nível mínimo de água é de

106.787 ha (Fearnside, 1995, Tabela 5). Da área desmatada antes da inundação, 8.000 ha, é presumida estar na zona permanentemente inundada e 2.000 ha na zona sazonalmente inundada.

AGRADECIMENTOS

Este artigo é derivado de uma apresentação no Workshop Internacional sobre Emissões de Gases de Efeito Estufa de Reservatórios Hidrelétricos, Rio de Janeiro, 11-12 de setembro de 1996. Uma versão anterior foi apresentada na Reunião do Grupo Consultivo sobre Avaliação de Emissões de Gases de Efeito Estufa da Cadeia Energética Completa em Hidrelétricas, Energia Nuclear e outras Fontes de Energia, da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA), 12-14 de março de 1996, Montreal, Quebec, Canadá. Esta é uma tradução de Fearnside (1997). Agradeço a P.M.L.A. Graça, S.V. Wilson e a dois revisores anônimos por comentários.

LITERATURA CITADA

- Albritton, D.L., Derwent, R.G., Isaksen, I.S.A., Lal, M. & Wuebbles, D.J. 1995. Trace gas radiative forcing indices. In: *Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios*, J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, J. Bruce, Hoesung Lee, B.A. Callander, E. Haites, N. Harris & K. Maskell (eds.), p. 205-231. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press: 339 p.
- Baxter, R.M. 1977. Environmental effects of dams and impoundments. *Annual Review of Ecology and Systematics* 8: 255-283.
- Buschbacher, R.J. 1984. *Changes in Productivity and Nutrient Cycling following Conversion of Amazon Rainforest to Pasture*. Tese de Ph.D. em ecologia. Athens, Georgia, E.U.A.: University of Georgia: 193 p.
- ELETRONORTE. s/d [1992]. *Ambiente Desenvolvimento Tucuruí*. Brasília, DF, Centrais Elétricas do Norte do Brasil (ELETRONORTE): 32 p.
- ELETRONORTE. s/d [c.1983]. *Usina Hidrelétrica Tucuruí 8.000 MW*. Brasília, DF: Centrais Elétricas do Norte do Brasil (ELETRONORTE): 27 p.
- ELETRONORTE. s/d [1987]. *Livro Branco sobre o Meio Ambiente da Usina Hidrelétrica de Tucuruí*. Brasília, DF: Centrais Elétricas do Norte do Brasil (ELETRONORTE): 288 p.
- ELETRONORTE. s/d. *UHE Tucuruí: Plano de Utilização do Reservatório, Caracterização e Diagnóstico do Reservatório e de sua Área de Influência*. TUC-10-263-46-RE Volume 1 - Texto. Brasília, DF: Centrais Elétricas do Norte do Brasil (ELETRONORTE): paginação irregular.

- ELETRONORTE/MONASA/ENGERIO. 1976. Estudos Amazônia, Relatório Final Volume IV: Aproveitamento Hidrelétrico do Rio Uatumã em Cachoeira Balbina, Estudos de Viabilidade. Brasília, DF: Centrais Elétricas do Norte do Brasil (ELETRONORTE)/ MONASA Consultoria e Projetos Ltda./ENGE-RIO Engenharia e Consultoria: paginação irregular.
- Fearnside, P.M. 1984. Land clearing behaviour in small farmer settlement schemes in the Brazilian Amazon and its relation to human carrying capacity. In: *Tropical Rain Forest: The Leeds Symposium*, A.C. Chadwick & S.L. Sutton (eds.), p. 255-271. Leeds, Reino Unido: Leeds Philosophical and Literary Society: 335 p.
- Fearnside, P.M. 1986. Agricultural Plans for Brazil's Grande Carajás Program: Lost Opportunity for Sustainable Development? *World Development* 14: 385-409.
- Fearnside, P.M. 1989a. The charcoal of Carajás: Pigiron smelting threatens the forests of Brazil's Eastern Amazon Region. *Ambio* 18: 141-143.
- Fearnside, P.M. 1989b. Brazil's Balbina Dam: Environment versus the legacy of the pharaohs in Amazonia. *Environmental Management* 13: 401-423.
- Fearnside, P.M. 1990. Environmental destruction in the Brazilian Amazon. In: *The Future of Amazonia: Destruction or Sustainable Development?* D. Goodman & A. Hall (eds.), p. 179-225. London, Reino Unido: Macmillan: 419 p.
- Fearnside, P.M. 1995. Hydroelectric dams in the Brazilian Amazon as sources of 'greenhouse' gases. *Environmental Conservation* 22: 7-19.
- Fearnside, P.M. 1996a. Amazonia and global warming: Annual balance of greenhouse gas emissions from land-use change in Brazil's Amazon region. In: *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*. J. Levine (ed.). p. 606-617. Cambridge, Massachusetts, E.U.A.: MIT Press: 902 p.
- Fearnside, P.M. 1996b. Hydroelectric dams in Brazilian Amazonia: Response to Rosa, Schaeffer & dos Santos. *Environmental Conservation* 23(2): 105-108.
- Fearnside, P.M. 1997. 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. doi:10.1017/S0376892997000118
- Fearnside, P.M. 2002. Time preference in global warming calculations: A proposal for a unified index. *Ecological Economics* 41(1): 21-31. doi:10.1016/S0921-8009(02)00004-6
- Goodland, R.J.A. 1980. Environmental ranking of Amazonian development projects in Brazil. *Environmental Conservation* 7: 9-26.
- 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. & de Mello, J.A.N. 1987. Impactos ecológicos das represas hidrelétricas na bacia amazônica brasileira. In: *Homem e Natureza na Amazônia*, G. Kohlhepp & A. Schrader (eds.), p. 367-385. Tübinger Geographische Studien 95 (Tübinger Beiträge zur Geographischen Lateinamerikaforschung 3). Tübingen, Germany: Geographisches Institut, Universität Tübingen: 507 p.
- 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.
- Klinge, H. & Rodrigues, W.A. 1973. Biomass estimation in a central Amazonian rain forest. *Acta Científica Venezolana* 24: 225-237.
- Lashof, D.A. & Ahuja, D.R. 1990. Relative global warming potentials of greenhouse gas emissions. *Nature* 344: 529-531.
- Leentvaar, P. 1966. The Brokopondo research project, Suriname. In: *Man-Made Lakes*, R.H. Lowe-McConnell (ed.). London, Reino Unido: Academic Press: 218 p.
- Lovejoy, T.E., Rankin, J.M., Bierregaard, Jr., R.O., Brown, Jr., K.S., Emmons, L.H. & van der Voort, M.E. 1984. Ecosystem decay of Amazon forest remnants. In: *Extinctions*, M.H. Nitecki (ed.), p. 295-325. Chicago, Illinois, E.U.A.: University of Chicago Press.
- Martius, C., Fearnside, P.M., Bandeira, A.G. & Wassmann, R. 1996. Deforestation and methane release from termites in Amazonia. *Chemosphere* 33: 517-536.
- Martius, C., Wassmann, R., Thein, U., Bandeira, A.G., Rennenberg, H., Junk, W.J. & Seiler, W. 1993. Methane emission from wood-feeding termites in Amazonia. *Chemosphere* 26(1-4): 623-632.
- Monosowski, E. 1990. Lessons from the Tucuruí experience. *Water Power and Dam Construction* Fevereiro de 1990: 29-34.
- Mougeot, L.J.A. 1990. Future hydroelectric development in Brazilian Amazonia: Towards comprehensive population resettlement. In: *The Future of Amazonia: Destruction or Sustainable Development?* D. Goodman & A. Hall (eds.), p. 90-129. London, Reino Unido: MacMillan: 419 p.
- 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.
- Revilla Cardenas, J.D., Kahn, F.L. & Guillaumet, J.L. 1982. Estimativa da fitomassa do reservatório da UHE de Tucuruí. In: *Projeto Tucuruí, Relatório Semestral, Período janeiro/junho 1982, Vol. 2: Limnologia, Macrófitas, Fitomassa, Degradação da Fitomassa, Doenças Endêmicas, Solos*, p. 1-11. Manaus, AM: Centrais Elétricas do Norte do Brasil (ELETRONORTE) & Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA): 32 p.
- Pereira, A. 1989. Étude des données limnologiques de la retenue de Tucuruí, Amazonie-Brésil. Rapport de Stage de D.E.A. Techniques et Gestion de l'Environnement. Cayenne, Guiana Française: CERGRENE-ENPC.

- Pinto, L.F. 1982. *Carajás, O Ataque ao Coração da Amazônia*, 2ª edição. Rio de Janeiro, RJ: Editora Marca Zero: 140 p.
- Projeto RADAMBRASIL 1981. Mosaico semi-controlado de Radar. Escala de mapa: 1:250.000. Folhas SA-22-ZC, SB-22-XA, SB-22-XB & SB-22-SD. Rio de Janeiro, RJ: Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM).
- Rosa, L.P. & Schaeffer, R. 1994. Greenhouse gas emissions from hydroelectric reservoirs. *Ambio* 23: 164-165.
- 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. A model of greenhouse gas emissions from hydroelectric plants and an application to dams in the Amazon region of Brazil. Rio de Janeiro, RJ: Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ): 17 p.
- Rosa, L.P., Schaeffer, R. & dos Santos, M.A. 1996b. Are hydroelectric dams in the Brazilian Amazon significant sources of 'greenhouse' gases? *Environmental Conservation* 23: 2-6.
- 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* No. 9: 109-157
- Roulet, M. 1992. Environnement des Barrages Hydroélectriques: Analyse du Projet d'Aménagement Amazonien de Petit-Saut en Guyane Française. Montreal, Canada: Rapport de Stage de la maîtrise en Sciences de l'Environnement, Université du Québec à Montreal: 113 p.
- Skillings, R.F. & Tcheyan, N.O. 1979. Economic development prospects of the Amazon Region of Brazil. Baltimore, Maryland, E.U.A.: Center of Brazilian Studies, School of Advanced International Studies, Johns Hopkins University, Occasional Paper No. 9.
- Tadei, W.P., Scarpassa, V.M. & Rodrigues, I.B. 1991. Evolução das populações de *Anopheles* e de *Mansonia*, na área de influência da Usina Hidrelétrica de Tucuruí (Pará). *Ciência e Cultura* 43(7) suplemento: 639-640.