

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

Please cite as:
Favor citar como:

Fearnside, P.M. & S. Pueyo. 2015. Subestimação das emissões de gases de efeito estufa de represas tropicais. pp. 221-226. 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

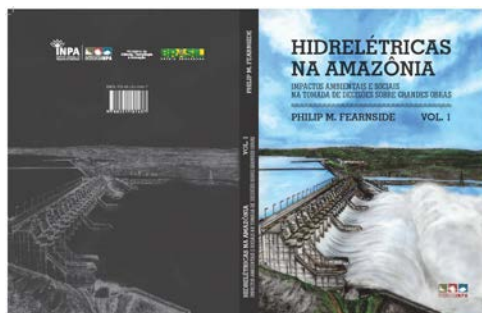
Tradução de: Fearnside, P.M. & S. Pueyo. 2012. Underestimating greenhouse-gas emissions from tropical dams. *Nature Climate Change* 2(6): 382–384. doi:10.1038/nclimate1540]

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 32



Subestimação das emissões de gases de efeito estufa de represas tropicais

Philip M. Fearnside¹ & Salvador Pueyo²

¹Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), Av, André Araújo, 2936, CEP 69,067-375 Manaus, Amazonas, Brasil.

²Institut Català de Ciències del Clima (IC3), C / Doctor Trueta 203, 08005 Barcelona, Catalunya, Espanha; endereço atual: Departamento de Ecologia da Universidade de Barcelona, Catalunya, Espanha.

Tradução de:

Fearnside, P.M. & S. Pueyo. 2012. Underestimating greenhouse-gas emissions from tropical dams. *Nature Climate Change* 2(6): 382–384. doi:10.1038/nclimate1540

Emissões de hidrelétricas tropicais são frequentemente subestimadas e podem exceder as dos combustíveis fósseis durante décadas.

Hidrelétricas tropicais, como as da Amazônia, emitem quantidades significativas de gases de efeito estufa, especialmente o metano (Fearnside, 2002, 2009a; Abril *et al.*, 2005; Kemenes *et al.*, 2011). Essas emissões foram subestimadas ou ignoradas em muitas computações de gases-estufa em nível global e nacional. Se qualquer justificativa é dada para omitir todo ou parte dessas emissões, geralmente é que elas são “controversas”, “incertas” ou “sem consenso” (por exemplo, IPCC, 2012, p. 84). No entanto, enquanto a incerteza sobre as quantidades emitidas é substancial (Demarty & Bastien, 2011), precisam ser incluídos em toda a contabilidade com base nos melhores dados e métodos de cálculo disponíveis. Grande parte da variação nas emissões atribuídas a barragens tropicais resulta de omissões e erros na contabilidade, ao invés de ser variação nas medidas físicas (que também estão sujeitas a problemas metodológicos). O fato de que as emissões substanciais estão envolvidas dificilmente pode ser considerado “incerto”, tendo sido medido diretamente em reservatórios como Balbina (no Brasil) (Kemenes *et al.*, 2011), e Petit Saut, (na Guiana Francesa) (Abril *et al.*, 2005). Emissões de barragens são de dois tipos: de superfície do reservatório ou emissões “a montante” e emissões da água que passa pelas turbinas e vertedouros (“desgaseificação” ou emissões “a jusante”). Quando as emissões de barragens não são omitidas completamente, frequentemente são quantificadas considerando apenas as emissões da superfície do reservatório, como é o caso em estimativas da ELETROBRÁS (Brasil, ELETROBRÁS, 2000). O recente relatório especial do IPCC sobre energias renováveis apresenta avaliações do ciclo de vida para várias tecnologias, e para o caso típico (*ou seja.*, o percentil de 50%), as hidrelétricas são indicadas como tendo a metade ou menos do impacto em relação a qualquer outra fonte, incluindo energia do sol, do vento e dos marés (IPCC, 2012, p. 982). A base de dados utilizada para esta classificação otimista não é clara a partir do relatório.

O carbono que é emitido na forma de CO₂ pode vir de dois tipos de fontes de: 1) fontes fixas que produzem uma emissão de uma só vez, tais como as árvores mortas por alagamento do reservatório e os estoques de carbono no solo (Fig. 1), e 2) de fontes renováveis, tais como o carbono que é retirado da atmosfera através da fotossíntese por macrófitas

(plantas aquáticas), o fitoplâncton ou algas no reservatório, árvores na bacia que produzem serapilheira que é arrastada para o reservatório pela água da chuva, ou vegetação no zona de deplecionamento (a área que é exposta temporariamente cada vez que o nível de água é rebaixado no reservatório). O CO₂ oriundo de fontes fixas deve ser contado como uma contribuição ao aquecimento global, especialmente decomposição de árvores mortas que ficam projetadas para fora da água em reservatórios amazônicos (mas têm sido frequentemente omitidas). Em contraste, o CO₂ a partir das fontes renováveis não é uma emissão líquida, sendo que esta quantidade de CO₂ é exatamente a mesma que foi removida da atmosfera quando a biomassa foi formada (o que não foi incluído na contabilização). Por outro lado, toda a emissão de metano faz uma contribuição líquida para o aquecimento global. A função do reservatório na transformação de CO₂ em metano de forma renovável dá às hidrelétricas a função de uma “fábrica de metano”, removendo continuamente o carbono da atmosfera, na forma de CO₂, e retornando-o na



Figura 1. As árvores mortas no reservatório de Samuel, em Rondônia. A decomposição das árvores acima da água libera CO₂ e representa uma fonte fixa (não renovável) de carbono.

forma de CH_4 , com um impacto muito maior sobre o aquecimento global (Fearnside, 2008). O metano é formado quando a matéria orgânica se decompõe em condições de anoxia, tal como nos sedimentos do fundo de um reservatório. A vegetação mole que cresce quando a zona de rebaixamento é exposta irá decompor sobre condições anóxicas no fundo do reservatório, liberando metano.

A água num reservatório tropical estratifica termicamente, com uma camada de água morna (o epilímnio), nos 2-10 m superiores onde a água está em contato com o ar e que contém oxigênio, e uma camada mais fria (o hipolímnio), na parte inferior, onde qualquer oxigênio se esgota rapidamente e praticamente toda a decomposição produz o metano em vez de CO_2 . A água que passa pelas turbinas e vertedouros sai a partir da camada inferior (Fig. 2). Emissões a jusante ocorrem quando a água é liberada sobre pressão abaixo da barragem. Assim como bolhas emergem quando é aberta uma garrafa de refrigerante, a liberação de pressão reduz a solubilidade dos gases, fazendo com que as bolhas se formam (lei de Henry) (Fearnside, 2004). Mais

lentamente, o aquecimento da água do rio abaixo da barragem provoca mais liberação. Emissões a jusante foram omitidas em uma série de compilações globais de estimativas de impactos de barragens, tais como as lideradas por St. Louis *et al.* (2002), Batsviken *et al.* (2011) e Barros *et al.* (2011). A proporção da emissão de metano a montante e a jusante depende da área do reservatório e a magnitude do fluxo do rio: emissão a montante é proporcional à área do reservatório, mas a emissão a jusante é proporcional à vazão do rio. Em Balbina, onde a área do reservatório é extraordinariamente grande (cerca de 3.000 km^2) e a vazão média muito pequena ($657 \text{ m}^3/\text{s}$), cerca da metade (53%) da emissão de metano é a jusante¹³. Em Tucuruí, com aproximadamente a mesma área como reservatório, mas com 17 vezes mais vazão que em Balbina, as emissões a jusante representam 88-93% do CH_4 (Fearnside, 2002, p. 85).

Quando as emissões a jusante são incluídas nas estimativas, frequentemente têm sido subestimadas por métodos que deixam passar uma porção maior da emissão sem ser medida. Grande parte

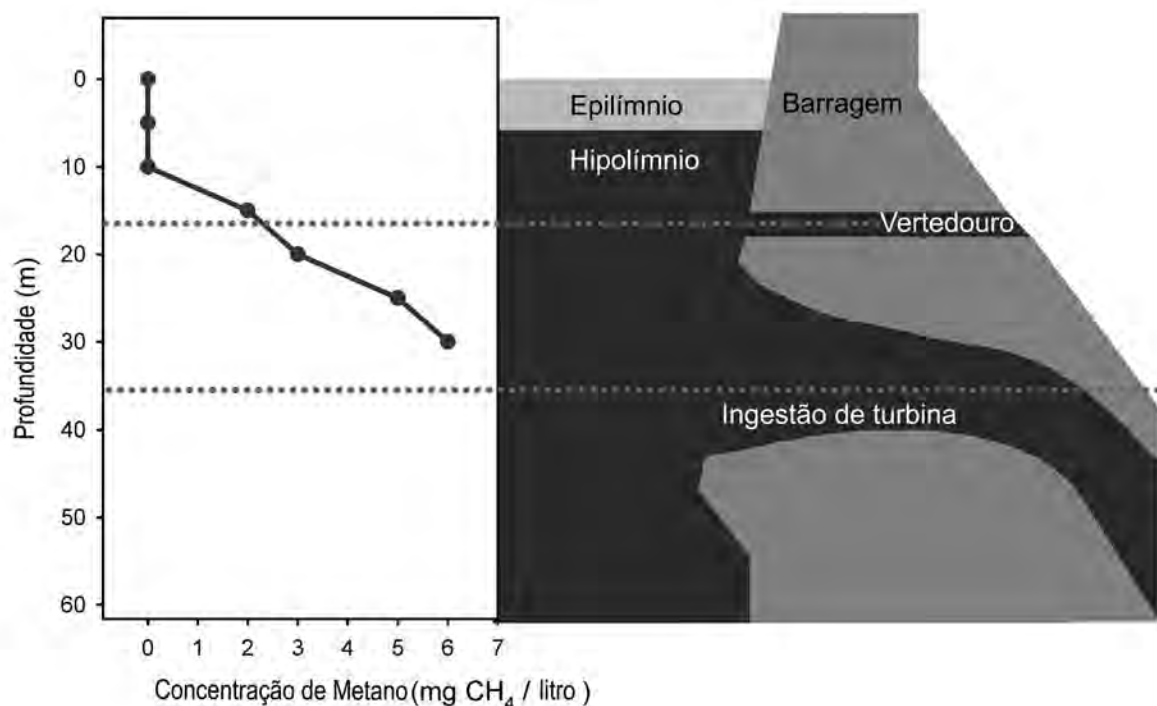


Figura 2. Água rica em metano é extraída a partir de baixo da termoclina que divide a coluna de água em uma camada superficial (o epilímnio) e uma camada inferior anóxica (o hipolímnio). A termoclina impede que a água fria no fundo do reservatório alcançasse a superfície. Um desenho da barragem de Tucuruí (à direita) mostra as profundidades dos vertedouros e das turbinas no momento da medição de 1989 das concentrações de metano por José Tundisi (à esquerda; dados em 23). O nível da água foi levantado por 2 m adicionais desde 2002. A liberação da pressão e o contato com o ar com uma concentração muito menor de metano, quando a água emerge, permita que esse gás “desgaseifique” para a atmosfera.

do metano é liberado imediatamente, assim que a água emerge das turbinas, e até mesmo dentro das turbinas, fazendo com que estimativas baseadas em medições de fluxo por amostradores que flutuam na superfície da água do rio a alguma distância a jusante (por exemplo, dos Santos *et al.*, 2008), inevitavelmente, perdem muito desta emissão. O único meio prático de evitar esta distorção é calcular a emissão imediata da “desgaseificação” a partir da diferença na concentração de CH₄ na água no reservatório na profundidade da entrada da turbina e na água abaixo da barragem (por exemplo, Fearnside, 2008).

Um fator metodológico que afeta todas as estimativas baseadas em concentração até agora essencialmente duplica a emissão de metano de água que passa através dos vertedouros e turbinas em barragens típicas da Amazônia. O efeito é dependente da profundidade: a concentração de CH₄ na água ao nível da turbina (normalmente perto do fundo do reservatório) é crítica, e esta concentração tem sido, tradicionalmente, medida na água, que é levada para a superfície em uma garrafa Ruttner, a partir do qual uma amostra é retirada com uma seringa e analisada quimicamente. Qualquer metano que saia da solução enquanto a garrafa está sendo emergida é perdido. Um dispositivo de amostragem apelidado de “garrafa Kemenes” captura e mede esse metano, gerando valores de concentração de CH₄ a uma profundidade de turbina típica de 30 m que são aproximadamente o dobro daqueles de medições feitas usando garrafas Ruttner. No caso de Balbina, isso resulta em uma emissão média de desgaseificação nas turbinas calculada a partir diferença de concentração (usando garrafas Kemenes) que é 116% maior do que a média com base em amostragem simultânea com garrafas Ruttner (Kemenes *et al.*, 2011).

A importância das emissões liberadas imediatamente na saída da turbina é ilustrada pelos resultados em Balbina². Neste caso, a tomada de água das turbinas na barragem inclui uma estrutura em forma de funil, que capta a água na profundidade de 14 a 30 m. Considerando-se as concentrações de CH₄ integradas ao longo de todo o perfil do hipólímnio, a quantidade liberada a jusante (por ebulição imediata nas turbinas, acrescida por difusão no rio a jusante) seria 2,2 vezes maior do que a emissão pela difusão jusante sozinha se a liberação imediata baseia-se em amostras de garrafa Ruttner, ou 3,4 vezes mais, se for com base em amostras de garrafa Kemenes. Se o cálculo baseia-se na localização da soleira da entrada da turbina a 30 m de profundidade, os multiplicadores

correspondentes seriam 7,8 e 15,6, respectivamente. Em outras palavras, as estimativas de emissões a jusante com base apenas em fluxos capturados por câmaras de superfície no rio a jusante da barragem incluem menos da metade, e, possivelmente, tão pouco quanto um dezesseisavo da emissão real a jusante.

Vários erros matemáticos resultaram pelas autoridades elétricas do Brasil para estimar a magnitude das emissões de superfície dos reservatórios em um nível de apenas um quarto do que deveria ser (ver explicação detalhada em Pueyo & Fearnside, 2011). A ELETROBRÁS calculou as emissões de superfície de CH₄ por ebulição para cada uma das 217 grandes barragens existentes no Brasil em 2000, através da aplicação de uma correção de lei de potência para uma média dos valores medidos (em g/m²/d) baseado em medidas em sete reservatórios (Brasil, ELETROBRÁS, 2000). A lei de potência é usada para capturar o efeito de eventos raros, mas de grande impacto. Por exemplo, no caso de sismos ocorrem muitos pequenos tremores e apenas um pequeno número de grandes terremotos. Usando informações sobre a frequência de terremotos medidos em diferentes magnitudes, pode-se calcular a frequência de terremotos muito maiores que são, inevitavelmente, sub-representados nos dados disponíveis. O mesmo se aplica para as emissões de metano a partir de uma superfície de reservatório, onde a maioria das medições só irá encontrar uma emissão modesta, mas ocorre um pequeno número de eventos de emissão muito grandes. Em outras palavras, corrigindo para estes eventos raros com a lei de potência irá inevitavelmente aumentar a estimativa de emissão acima da média simples de um conjunto de medições. No entanto, o cálculo da ELETROBRÁS contém nada menos que cinco erros matemáticos, incluindo uma mudança de sinal de positivo para negativo (Pueyo & Fearnside, 2011). O cálculo da ELETROBRÁS reduz a estimativa de superfície do reservatório em 76% abaixo da média aritmética simples, enquanto uma correta aplicação da lei de potência para os mesmos dados tornaria a estimativa corrigida 345% maior do que a estimativa ELETROBRÁS (Pueyo & Fearnside, 2011). Reservatórios hidrelétricos no Brasil, em 2000, totalizaram 33 × 10³ km², uma área maior do que a Bélgica. A diferença entre a estimativa ELETROBRÁS da emissão de metano a partir desta superfície (0,22 × 10⁶ t/ano) e a correção do cálculo (0,98 × 10⁶ t/ano) é equivalente a 7,0 × 10⁶ t de carbono CO₂-equivalente por ano, ou uma emissão aproximadamente igual ao da Grande São Paulo

(Pueyo & Fearnside, 2011), se calculado utilizando um potencial de aquecimento global (GWP) de 34 em um horizonte de tempo de 100 anos (Shindell, D. T. *et al.*, 2009). A magnitude da subestimação no cálculo da ELETROBRÁS seria equivalente a $5,2 \times 10^6$ t de carbono CO₂-equivalente, se se usa o GWP mais baixo de 25 atualmente adotada pela Convenção do Clima para o período de 2013-2017, mas que omite os efeitos indiretos do metano [Obs. Essa magnitude seria muito maior se considerado o GWP de 86 para 20 anos do quinto relatório de IPCC, liberado em setembro de 2013].

O Plano Decenal de Expansão de Energia, do Ministério das Minas e Energia, abrangendo o período 2011-2020, prevê a construção de mais 48 grandes barragens, dos quais 30 seriam na Amazônia Legal (Brasil, MME, 2011, p. 285). Isto significa a construção de uma barragem a cada quatro meses na Amazônia. A construção de barragens está se deslocando para áreas tropicais em uma escala global, incluindo os planos da ELETROBRÁS para construir mais de uma dezena de barragens no Peru e em outros países da Amazônia. Represas tropicais emitem mais gases de efeito estufa do que as barragens em outras zonas (*e.g.*, Del Sontro *et al.*, 2010; Barros *et al.*, 2011).

Barragens na Amazônia estão sendo promovidas, em parte, com base em um suposto benefício para mitigar o aquecimento global (Brasil, CIMC, 2008, p. 32-33), incluindo a intenção de captação de recursos de mitigação em larga escala no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo do Protocolo de Quioto (Brasil, CIMC, 2008, p. 118). Infelizmente, estas barragens podem vir a ter emissões cumulativas que excedem os de geração de combustível fóssil, durante períodos que podem se estender por várias décadas, tornando-as indefensáveis com base na mitigação do aquecimento global (Fearnside, 2013). No caso do Brasil, a floresta amazônica está sob risco das consequências do aquecimento global nesta escala de tempo (Fearnside, 2009b). O período de tempo é crítico para lidar com o aquecimento global: barragens produzem uma grande emissão nos primeiros anos, seguido por uma emissão inferior que é mantida indefinidamente, enquanto que a geração a partir de combustíveis fósseis produz emissões a uma taxa constante. A “dívida” de gás de efeito estufa criada pela barragem, nos primeiros anos, quando as emissões são muito mais elevadas do que os da geração de combustíveis fósseis, pode levar décadas para serem compensados depois

das emissões da barragem estabilizarem em um nível inferior ao da geração com combustíveis fósseis (Fearnside, 2009a). As consequências são graves de esperar décadas para começar a efetiva redução das emissões globais.

Controlar o aquecimento global exigirá medidas de mitigação que são suficientes para manter a concentração atmosférica de gases de efeito estufa abaixo de um nível definido como “perigoso”. Todas as emissões devem ser mitigadas, sejam ou não o resultado de ações humanas deliberadas, tais como a construção de represas, e independentemente de se é obrigatório ser informado nos inventários nacionais exigidos pela Convenção de Clima. Se qualquer uma dessas emissões for ignorada ou subestimada, em seguida, as quotas nacionais (quantidades atribuídas) negociados para reduzir as emissões serão insuficientes, e as temperaturas globais continuarão a aumentar, juntamente com todos os impactos que isso implica. Entre as questões a serem enfrentadas está a contagem de todas as emissões de barragens, e a inclusão obrigatória delas nos inventários nacionais. As emissões provenientes de hidrelétricas tropicais significam que esta não é energia “limpa” e que os países precisam se comprometer a fazer cortes mais profundos nas suas emissões de gases de efeito estufa antropogênicos do que eles estavam dispostos a considerar até agora.

AGRADECIMENTOS

As pesquisas dos autores são financiadas exclusivamente por fontes acadêmicas: Conselho Nacional do Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (proc. 304020/2010-9; 573810/2008-7, 575853/2008-5), pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM) (proc. 708565) e pelo INPA (PRJ13.03). SP agradece ao “Centre de Recerca Matemàtica” (CRM) pela hospitalidade durante este trabalho. Agradecemos ao P.M.L.A. Gratos pelos comentários. Esta é uma tradução de Fearnside & Pueyo (2012).

LITERATURA CITADA

- Abril, G., F. Guérin, S. Richard, R. Delmas, C. Galy-Lacaux, P. Gosse, A. Tremblay, L. Varfalvy, M.A. dos Santos & B. Matvienko. 2005. Carbon dioxide and methane emissions and the carbon budget of a 10-years old tropical reservoir (Petit-Saut, French Guiana). *Global Biogeochemical Cycles* 19: GB 4007. doi: 10.1029/2005GB002457

- Barros, N., J.J. Cole, L.J. Tranvik, Y.T. Prairie, D. Bastviken, V.L.M. Huszar, P. del Giorgio & F. Roland. 2011. Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude. *Nature Geoscience* 4: 593-596. doi: 10.1038/NGEO1211
- Bastviken, D., L.J. Tranvik, J.A. Downing, P.M. Crill & A. Enrich-Prast. 2011. Freshwater methane emissions offset the continental carbon sink. *Science* 331: 50.
- Brasil, CIMC (Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima). 2008. *Plano Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC – Brasil*. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, DF. 129 p. [Disponível em: http://www.mma.gov.br/estruturas/smcq_climaticas/_publicacao/141_publicacao07122009030757.pdf]
- Brasil, ELETROBRÁS (Centrais Elétricas Brasileiras S/A). 2000. Emissões de dióxido de carbono e de metano pelos reservatórios hidrelétricos brasileiros: Relatório final. *Relatório Técnico*. ELETROBRÁS, DEA, DEEA, Rio de Janeiro, RJ. 176 p. Disponível em: <http://wwwq2.eletronbras.com/elb/services/eletronbras/ContentManagementPlus/FileDownload.ThrSvc.asp?DocumentID=%7BCAFECBF7-6137-43BC-AAA2-35181AAC0C64%7D&ServiceInstUID=%7B3CF510BA-805E-4235-B078-E9983E86E5E9%7D>.
- Brasil, MME (Ministério de Minas e Energia). 2011. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2020*. MME, Empresa de Pesquisa Energética. Brasília, DF. 2 vols.
- Del Sontro, T., D.F. McGinnis, S. Sobek, I. Ostrovsky & B. Wehrli. 2010. Extreme methane emissions from a Swiss hydropower reservoir: Contribution from bubbling sediments. *Environ. Sci. and Technol.* 44: 241-2425. doi: 10.1021/es9031369
- Demarty, M. & Bastien, J. (2011) GHG emissions from hydroelectric reservoirs in tropical and equatorial regions: Review of 20 years of CH₄ emission measurements. *Energy Policy* 39: 4197-4206.
- dos Santos, M.A., L.P. Rosa, B. Matvienko, E.O. dos Santos, C.H.E. D’Almeida Rocha, E. Sikar, M.B. Silva & M.P.B. Ayr Júnior. 2008. Emissões de gases de efeito estufa por reservatórios de hidrelétricas. *Oecologia Brasiliensis* 12(1): 116-129.
- 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. 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. 2004. Greenhouse gas emissions from hydroelectric dams: Controversies provide a springboard for rethinking a supposedly “clean” energy source. *Climatic Change* 66(2-1): 1-8.
- Fearnside, P.M. 2008. Hidrelétricas como “fábricas de metano”: O papel dos reservatórios em áreas de floresta tropical na emissão de gases de efeito estufa. *Oecologia Brasiliensis* 12(1): 100-115.
- Fearnside, P.M. 2009a. As hidrelétricas de Belo Monte e Altamira (Babaquara) como fontes de gases de efeito estufa. *Novos Cadernos NAEA* 12(2): 5-56.
- Fearnside, P.M. 2009b. A vulnerabilidade da floresta amazônica perante as mudanças climáticas. *Oecologia Australis* 13(4): 609-618. doi: 10.4257/oeco.2009.1304.05
- Fearnside, P.M. 2013. Carbon credit for hydroelectric dams as a source of greenhouse-gas emissions: The example of Brazil’s Teles Pires Dam. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 18(5): 691-699. doi: 10.1007/s11027-012-9382-6
- Fearnside, P.M. & S. Pueyo. 2012. Underestimating greenhouse-gas emissions from tropical dams. *Nature Climate Change* 2(6): 382-384. doi:10.1038/nclimate1
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2012. *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. O. Edenhofer, R.P. Madruga, Y. Sokona, Kristin Seyboth, P. Eickemeier, P. Matschoss, G. Hansen, S. Kadner, S. Schlomer, T. Zwickel & C. von Stechow (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido. 1076 p. [http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/srren_full_report.pdf]
- Kemenes, A., B.R. Forsberg & J.M. Melack. 2007. Methane release below a tropical hydroelectric dam. *Geophysical Research Letters* 34: L12809. doi: 10.1029/2007GL029479. 55.
- Kemenes, A., B.R. Forsberg & J.M. Melack. 2011. CO₂ emissions from a tropical hydroelectric reservoir (Balbina, Brazil). *Journal of Geophysical Research* 116, G03004, doi: 10.1029/2010JG001465
- Pueyo, S. & P.M. Fearnside. 2011. Emissões de gases de efeito estufa dos reservatórios de hidrelétricas: Implicações de uma lei de potência. *Oecologia Australis* 15(2): 114-127. doi: 10.4257/oeco.2011.1502.02
- Rosa, L.P., M.A. dos Santos, J.G. Tundisi & B.M. Sikar. 1997. 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. 111 p.
- Saint Louis, V.C., C. Kelly, E. Duchemin, J.W.M. Rudd & D.M. Rosenberg. 2002. Reservoir surface as sources of greenhouse gases to the atmosphere: a global estimate. *Bioscience* 20: 766-775.
- Shindell, D.T., G. Faluvegi, D.M. Koch, G.A. Schmidt, N. Unger & S.E. Bauer. 2009. Improved attribution of climate forcing to emissions. *Science* 326: 716-718.