

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

Please cite as:
Favor citar como:

Fearnside, P.M. 2019. Hidrelétricas em florestas tropicais como fontes de gases de efeito estufa. pp. 69-86. In: P.M. Fearnside (ed.) *Hidrelétricas na Amazônia: Impactos Ambientais e Sociais na Tomada de Decisões sobre Grandes Obras*. Vol. 3. Editora do INPA, Manaus. 148 p.

[Tradução de: Fearnside, P.M. 2016. Greenhouse gas emissions from hydroelectric dams in tropical forests. p. 428-438. In: J. Lehr & J. Keeley (Eds.) *Alternative Energy and Shale Gas Encyclopedia*. John Wiley & Sons Publishers, New York, E.U.A. 912 p. Versão anterior: Fearnside, P.M. 2019. Hidrelétricas em florestas tropicais como fontes de gases de efeito estufa. p. 77-110. In: V. Galucio & A. Prudente (Eds.) *Biota Amazônica - Museu Goeldi 150 Anos*. Museu Paraense Emílio Goeldi- MPEG, Belém, Pará.]

ISBN: 978-85-211-0XXX-X (impresso), ISBN: 978-85-211-0XXX-X (*on-line*)

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/2019/Hidro-v3/Livro_Hidrelétricas_Vol_3.pdf

Capítulo 5

Hidrelétricas em florestas tropicais como fontes de gases de efeito estufa

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. 2016. Greenhouse gas emissions from hydroelectric dams in tropical forests. p. 428-438. In: J. Lehr & J. Keeley (Eds.) *Alternative Energy and Shale Gas Encyclopedia*. John Wiley & Sons Publishers, New York, E.U.A. 912 p.

Versão anterior:

Fearnside, P.M. 2019. Hidrelétricas em florestas tropicais como fontes de gases de efeito estufa. p. 77-110. In: V. Galucio & A. Prudente. (Eds.) *Biota Amazônica - Museu Goeldi 150 Anos*. Museu Paraense Emílio Goeldi-MPEG, Belém, Pará.

RESUMO

Hidrelétricas não são necessariamente fontes de “energia limpa” porque podem produzir diferentes gases de efeito estufa em quantidades substanciais. No caso do dióxido de carbono (CO_2), há uma grande emissão nos primeiros anos pela decomposição das árvores deixadas nos reservatórios que projetam acima do nível da água. Algumas emissões de dióxido de carbono que ocorreriam no rio natural, sem barragem, são evitadas pelo armazenamento de carbono através de sedimentação dentro do reservatório. O crescimento de biomassa na zona de deplecionamento no reservatório fornece uma fonte de carbono para emissão de CO_2 , quando a biomassa se decompõe sobre condições aeróbicas. No entanto, esta parte da emissão não representa uma contribuição líquida para o aquecimento global, porque a mesma quantidade de carbono foi removida da atmosfera pela fotossíntese quando a biomassa foi produzida. Emissões de CO_2 também vêm de materiais e energia utilizados durante a construção da barragem. O balanço de carbono da floresta pré-barragem, com perda de absorção de carbono por florestas tropicais em áreas que são inundadas, já não é considerado um fator significativo, mas no caso das barragens planejadas em áreas com solos relativamente férteis perto dos Andes este fator seria acrescentado ao impacto. Óxido nítrico (N_2O) é emitido por reservatórios em uma taxa três vezes maior do que a taxa emitida pelas florestas tropicais. Isso é adicionado ao impacto líquido de hidrelétricas em áreas de floresta tropical, como a Amazônia. Emissões de metano (CH_4) representam uma contribuição líquida para o aquecimento global porque, ao contrário de CO_2 , este gás não é removido da atmosfera quando a biomassa é produzida. O metano tem um impacto muito maior sobre o aquecimento global quando comparado ao dióxido de carbono. Fontes de carbono para produção de metano são de dois tipos: renováveis e não renováveis. As fontes não renováveis de carbono, tais como o solo e a biomassa inicial da vegetação terrestre que é inundada, geram um grande pulso de emissão nos primeiros anos, mas depois disso as emissões diminuem para níveis baixos. As fontes renováveis, no entanto, podem continuar a converter CO_2 atmosférico em CH_4 ao longo de toda a vida da barragem, fazendo com que a barragem funcione como uma “fábrica de metano”. Fontes renováveis de carbono incluem as ervas e gramíneas que crescem na zona de deplecionamento, quando essa zona está exposta a cada ano. Além dessas, existem

ainda macrófitas (plantas aquáticas) que crescem e morrem no reservatório, algas e fungos, poluição da água nos reservatórios, folhas e outras formas de matéria orgânica da produção primária a montante da barragem que são carregadas para o reservatório pelo escoamento da água. O cálculo das emissões líquidas de metano requer correção para a perda de fluxos no pré-reservatório, incluindo solos florestais, cupins e quaisquer áreas úmidas que foram inundadas. Nem todo o metano produzido é emitido, porque uma parte é oxidada para CO_2 antes de ser emitido para a atmosfera. As vias de liberação de metano são de dois tipos: as emissões de superfície do reservatório (difusão e ebulição) e as emissões a jusante (emissões em vertedouros, turbinas e no rio abaixo da barragem). Existem propostas para capturar e usar parte deste metano, mas nenhuma dessas propostas tem sido implementada até agora. Comparações com combustíveis fósseis exigem quantificação não só da magnitude, mas também do timing das emissões, incluindo emissões diretas e indiretas. A importância do tempo é essencial porque as barragens e os combustíveis fósseis diferem no tempo da ocorrência da emissão. As hidrelétricas produzem emissões antes que qualquer eletricidade seja gerada e têm um pico muito grande de emissão nos primeiros anos, enquanto as usinas termelétricas produzem quase a totalidade das suas emissões ao longo da vida da usina em proporção direta à eletricidade que é produzida. Outros impactos das barragens também diferem dos combustíveis fósseis e de outros alternativos energéticos, tanto em magnitude como em natureza e perfil temporal. Esta é uma tradução atualizada de Fearnside (2016a).

INTRODUÇÃO

Embora as represas hidrelétricas sejam, muitas vezes, apresentadas como fontes de energia “verde”, ou seja, uma fonte de energia sem emissões de gases de efeito estufa, na verdade, estas emitem quantidades substanciais de gases (e.g., Fearnside, 2007, 2009; Gunkel, 2009). Os montantes emitidos variam muito, dependendo da localização geográfica, idade do reservatório, entradas externas de nutrientes e de carbono e características do reservatório, como fluxo de água, tempo, reposição, área, profundidade, flutuações do nível da água, posicionamento das turbinas e vertedouros (Barros *et al.*, 2011; de Faria *et al.*, 2015). Barragens em áreas tropicais emitem mais metano do que aquelas em áreas de clima temperado

ou boreal (Barros *et al.*, 2011; Matthews *et al.*, 2005). Bastviken *et al.* (2011) estimaram que reservatórios cubram uma superfície de 500.000 km² em todo o mundo e emitam 20 milhões de toneladas de metano (CH₄) anualmente. Isso é equivalente a 185 milhões de toneladas de carbono “equivalente”, ou seja, carbono na forma de CO₂, se for calculado usando o potencial de global aquecimento (GWP) apresentado no quinto relatório de avaliação (AR5), do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – IPCC. Isto considera o valor de 34 para o GWP de 100 anos para metano, ou seja, uma tonelada de metano tem o mesmo impacto sobre aquecimento global que 34 toneladas de CO₂ se o cálculo for feito ao longo de um período de 100 anos. No entanto, se o cálculo for feito para 20 anos o GWP de metano sobe para 86 (Myhre *et al.*, 2013, p. 714) e o impacto desta emissão mundial sobe para 1,7 bilhões de toneladas de carbono na forma de CO₂. Esses valores para o GWP de metano incluem o efeito da retroalimentação entre o clima e o carbono, que o quinto relatório do IPCC confirma como sendo uma parte real do sistema climático, embora muitos diplomatas, inclusive os brasileiros, queiram usar o valor de 28 para 100 anos sem essas retroalimentações, subestimando o impacto das barragens.

Os números acima para emissões globais só incluem as emissões das superfícies dos reservatórios através de ebulição (bolhas) e difusão (emanação) – sem considerar as emissões que ocorrem quando a água com alta concentração em metano emerge (sob pressão) de um nível profundo na coluna de água através das turbinas e vertedouros, que podem mais do que dobrar o total (*e.g.*, Abril *et al.*, 2005; Fearnside, 2009; Kemenes *et al.*, 2008). No entanto, a elaboração de uma estimativa global é dificultada pela grande quantidade de informação específica necessária para estimar as emissões de cada represa.

Os fatores mencionados acima – omissão das principais fontes de emissões, tais como turbinas, emissões muito maiores de metano de barragens tropicais em comparação com outras regiões e, a desconsideração ou minimização da importância do tempo – explicam a conclusão do IPCC, no Relatório Especial sobre Fontes Renováveis de Energia e Mitigação da Mudança Climática. Este relatório conclua que a geração de energia hidrelétrica tem impacto de apenas 4 g CO₂-equivalente / KWh de eletricidade gerada, que é a metade ou menos em comparação com qualquer outra fonte, incluindo energia eólica (12 g CO₂-equivalente / KWh) e solar fotovoltaico (46 g

CO₂-equivalente / KWh) (Moomaw *et al.*, 2012, p. 982). Entre outros problemas (ver Fearnside, 2015a) na revisão do IPCC, nenhuma das 11 fontes usadas para cobrir todas as zonas climáticas do mundo parece representar as represas tropicais (Moomaw *et al.*, 2012, p. 986). As fontes usadas eram para barragens nos EUA (Barnthouse *et al.*, 1994; Rhodes *et al.*, 2000; Denholm & Kulcinski, 2004; Horvath, 2005; Pacca, 2007), Europa (Dones *et al.*, 2005, 2007; Vattenfall, 2008), China (Zhang *et al.*, 2007), Brasil (região Sul)/Paraguai (Ribeiro & Silva, 2010), e uma fonte sem dados sobre barragens específicas (IEA, 1998). No entanto, são em áreas tropicais como a Amazônia que é esperado o maior desenvolvimento hidrelétrico do mundo nas próximas décadas.

A revisão que se segue concentra em barragens em áreas de floresta tropical na América do Sul (Figura 1). Grande parte das informações é aplicável para outras áreas tropicais e, em certa medida, para áreas subtropicais e outras áreas. A rápida expansão das barragens planejadas na Amazônia torna os avanços na medição e modelagem de emissões hidrelétricas uma prioridade urgente. O Plano Decenal 2013-2022 do Brasil para a expansão de energia prevê 18 grandes barragens novas na Amazônia Legal (Brasil, MME, 2013).

TIPOS DE EMISSÃO

Dióxido de carbono (CO₂)

Hidrelétricas emitem gases de efeito estufa de várias maneiras ao longo das suas vidas. Em primeiro lugar, há as emissões ligadas à construção da barragem devido ao uso de cimento, aço e combustíveis. Estas emissões são maiores do que aquelas para uma instalação equivalente que gera a mesma quantidade de eletricidade a partir dos combustíveis fósseis ou a partir de fontes alternativas, como eólica e solar. As emissões da construção da barragem ocorrerem por vários anos antes do início de geração de energia elétrica – mais do que o tempo necessário para outras fontes. Como o tempo tem valor para impactos do aquecimento global, esta diferença temporal acrescenta-se ao impacto das hidrelétricas em relação à maior parte das outras fontes (Fearnside, 1997). As emissões de construção são estimadas em 0,98 milhões de toneladas de equivalentes de carbono em forma de CO₂ para a represa de Belo Monte e 0,78 milhões de toneladas para a represa de Babaquara/

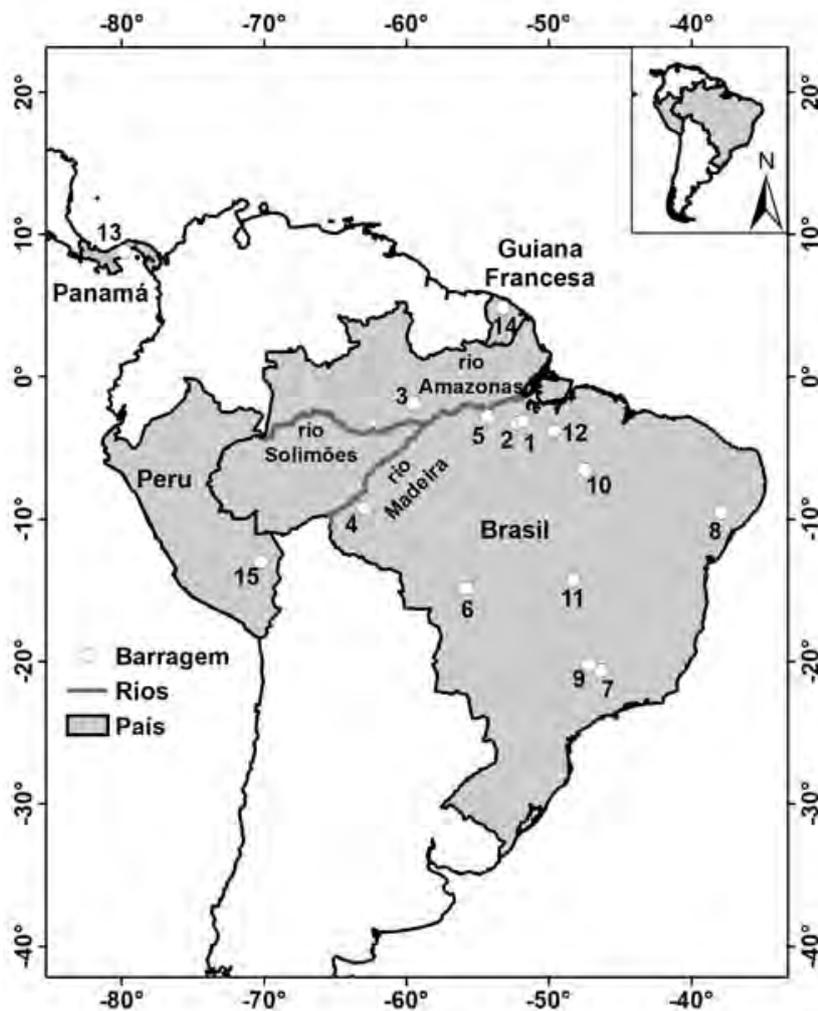


Figura 1. Locais das barragens mencionadas no texto. Legenda: 1 = Belo Monte (Vitória do Xingu-PA), 2 = Babaquara (“Altamira”) (Altamira-PA), 3 = Balbina (Presidente Figueiredo-AM), 4 = Samuel (Candeias do Jamari-RO), 5 = Curuá-Una (Santarém-PA), 6 = Manso (Chapada dos Guimarães e Nova Brasilândia-MT), 7 = Furnas (São José da Barra e São João Batista do Glória-MG), 8 = Xingó (Piranhas-AL e Canindé de São Francisco-SE), 9 = Peixoto (“Mascarenhas de Moraes”) (Ibiraci-MG), 10 = Estreito (Estreito-MA e Palmeiras-TO), 11 = Serra da Mesa (Minaçu-GO), 12 = Tucuruí (Tucuruí-PA), 13 = Fortuna (“Edwin Fabrega”) (Chiriquí, Panamá), 14 = Petit Saut (Sinnamary e Kourou, Guiana Francesa), 15 = Inambari (Madre de Dios, Peru).

Altamira, se calculado sem a ponderação por tempo (Fearnside, 2009).

Quando uma paisagem é inundada por um reservatório, as emissões líquidas da paisagem pré-barragem devem ser subtraídas dos fluxos de gás correspondente do reservatório, a fim de avaliar o impacto líquido da barragem. Em áreas de floresta tropical, o balanço de carbono da floresta é um fator crítico. Na década de 1990, muitos acreditavam que a floresta amazônica seria um grande sumidouro de carbono atmosférico, aumentando assim o impacto líquido sobre o aquecimento global da conversão de floresta para outros usos, incluindo reservatórios. No entanto, a correção de uma série de problemas nas técnicas de medição posteriormente reduziu as

estimativas de absorção pela floresta em mais de cinco vezes, e a floresta já não é pensada como um grande sumidouro de carbono, em média (e.g., Araújo *et al.*, 2002; Fearnside, 2000; Kruijt *et al.*, 2004).

A quantidade de absorção de carbono pela floresta amazônica varia substancialmente entre locais (Ometto *et al.*, 2005). As maiores taxas de captação foram estimadas a partir de medições de crescimento de árvores no Peru e Equador (Phillips *et al.*, 1998, 2004). Diferente do Brasil, onde o Experimento em Grande Escala Atmosfera-Bioesfera (LBA) montou uma série de torres na floresta com equipamentos para medir fluxos de CO₂ usando correlação de vórtices, não há nenhuma torre em Peru e Equador para medições comparáveis. As taxas de absorção

diminuem desde os Andes até o Oceano Atlântico, um padrão que tem sido atribuído a uma gradiente correspondente à fertilidade do solo (Malhi *et al.*, 2006). Em 2010, o Brasil assinou um acordo com Peru para permitir que a companhia de eletricidade do governo brasileiro (ELETROBRÁS) construísse as primeiras seis barragens entre as mais de uma dezena que estão planejadas na Amazônia peruana.

Emissões de desmatamento podem ser substanciais, como resultado do deslocamento da população e estimulação do desmatamento no entorno das novas barragens junto com as suas estradas de acesso, como ocorreu na hidrelétrica de Tucuruí (Fearnside, 2001). Emissões deslocadas podem ocorrer pelo uso perdido da terra que foi inundada, assim levando a população que antes habitava a área para estabelecer propriedades rurais em outros locais onde desmatam e emitem gases de efeito estufa. Também há emissões do uso perdido da água, por exemplo, para substituir os peixes que anteriormente foram produzidos no rio natural sem barragens. Esta é uma preocupação para as barragens no rio Madeira (Fearnside, 2014a). Além de bloquear a migração de peixes para suas áreas de reprodução (*e.g.*, Barthem *et al.*, 1991), as barragens retêm sedimentos associados a nutrientes que sustentam a cadeia trófica para peixes a jusante (Forsberg *et al.*, 2017; Latrubesse *et al.*, 2017).

Outra importante fonte de emissão é o carbono liberado da decomposição acima da água, das árvores que são mortas por inundações (Abril *et al.*, 2013). As árvores são, geralmente, deixadas em pé no reservatório, onde se projetam acima da água e apodrecem na presença de oxigênio, liberando o carbono na forma de CO₂. Árvores adicionais são mortas perto da orla, na floresta que não é inundada, incluindo a floresta nas ilhas no reservatório, devido ao aumento do lençol freático. Esta adição de CO₂ é maior em reservatórios com margens irregulares e muitas ilhas, como a hidrelétrica de Balbina (Feitosa *et al.*, 2007). A liberação do carbono pela morte das árvores começa no enchimento do reservatório (bem antes de qualquer geração de eletricidade) e a maior parte das emissões ocorre dentro dos primeiros anos de vida do reservatório. O valor do tempo, portanto, faz deste impacto inicial um fator substancial contra as hidrelétricas em comparação com a geração a partir de combustíveis fósseis, que liberam grande maioria das suas emissões na mesma hora em que a eletricidade é produzida (*e.g.*, Fearnside, 1997). Em 1990 (ano padrão para os inventários iniciais de gases de efeito estufa no âmbito da Convenção do

Clima), a emissão anual de decomposição acima da água das árvores inundadas (sem contar a mortalidade na orla) foi estimada em 6,4 milhões de toneladas de carbono para Balbina (Fearnside, 1995), 1,1 milhões de toneladas para Samuel (Fearnside, 2005a) e 2,5 milhões de toneladas para Tucuruí (Fearnside, 2002). A represa Babaquara/Altamira, que ‘oficialmente’ não está planejada para construção rio acima de Belo Monte, mas que tudo indica que seja planejada na realidade (Fearnside, 2017a,b,c), seria susceptível de se tornar a “campeã de todos os tempos” para essas emissões, com uma média nos primeiros dez anos, em conjunto com Belo Monte, estimada em 9,6 milhões de toneladas de emissões de carbono por ano em forma de CO₂ da decomposição acima da água das árvores inundadas, mais 0,07 milhões de toneladas de emissões das árvores afetadas ao longo da margem do reservatório (Fearnside, 2009).

A água no reservatório também emite dióxido de carbono por meio de borbulhamento e difusão através da superfície do reservatório ou da água sendo lançada através das turbinas e vertedouros. Este CO₂ vem de várias fontes e é importante evitar a dupla contagem do carbono. Uma parte deriva da decomposição subaquática das árvores inicialmente presentes no reservatório, liberado diretamente como CO₂, se a biomassa da árvore se decompõe na camada superficial da água que contém oxigênio, ou indiretamente se a biomassa decompõe-se nas camadas profundas, onde há pouco ou nenhum oxigênio e o carbono é liberado como metano. Uma parte desse metano é posteriormente convertida em CO₂ por bactérias nas camadas superficiais. Acredita-se que esta via, da biomassa das árvores para metano dissolvido e posteriormente para CO₂ dissolvido, seja a principal fonte de CO₂ liberado da água em Balbina (Kemenes *et al.*, 2011).

O dióxido de carbono também é liberado a partir do carbono no solo das áreas inundadas. Como no caso das árvores, esta é uma fonte fixa que futuramente se esgotará. Da mesma forma, a emissão é maior nos primeiros anos. Pesquisadores na barragem de Petit Saut, na Guiana Francesa, acreditam que o carbono do solo seja a principal fonte para CH₄ e CO₂ produzidos no pulso inicial de emissão após o alagamento (Tremblay *et al.*, s/d [C. 2005]).

Emissões de CO₂ da água incluem o carbono lançado a partir de fontes renováveis, para além daquelas fontes fixas, tais como, árvores e carbono no solo. Carbono também entra no reservatório como

carbono orgânico dissolvido (a partir de lixiviação) e em sedimentos vindo da erosão do solo ao longo da bacia hidrográfica a montante do reservatório. Este carbono está continuamente sendo removido da atmosfera pela fotossíntese da floresta em pé e convertido em carbono orgânico do solo, além das exportações diretas de carbono de biomassa através da deposição de serrapilheira no chão da floresta. Quantidades substanciais da serrapilheira ainda não decomposta são carregadas para os rios durante chuvas torrenciais (Monteiro, 2005). Parte deste carbono é armazenada em sedimentos no fundo do reservatório. Este armazenamento em sedimentos tem sido alegado ser um benefício das barragens, em termos de carbono (*e.g.*, Gagnon, 2002; Mendonça *et al.*, 2016). No entanto, uma contabilidade completa exigiria deduzir a parcela de carbono que, sem a barragem, teria sido transportada rio abaixo e depositada em sedimentos do oceano (Fearnside, 2016b). Uma parte do carbono seria liberada da água no rio a jusante, sendo que a água no rio Amazonas é conhecida como um importante emissor de CO₂ (Richey *et al.*, 2002).

Outras fontes renováveis de carbono incluem a fotossíntese de fitoplâncton, algas e plantas aquáticas (macrófitas) no próprio reservatório. Há também uma fonte renovável de plantas herbáceas que crescem na zona de deplecionamento. Esta zona é o lamaçal que é exposto ao redor da borda do reservatório a cada vez que o nível da água é abaixado para geração de energia na estação seca. Plantas herbáceas macias, tais como as ervas e gramíneas, crescem rapidamente nesta zona quando o nível da água desce. A zona de deplecionamento pode ser vasta: 659,6 km² em Balbina (Feitosa *et al.*, 2007) e 3.580 km² no reservatório Babaquara/Altamira, que 'oficialmente' não está planejado (Fearnside, 2009). Quando a água sobe novamente, as plantas são mortas e depois decompõem-se rapidamente porque são moles (em contraste com a madeira, que contém lignina e se decompõe muito lentamente na água). Quando o oxigênio está presente na água esse carbono será lançado como CO₂, mas porque as ervas estão enraizadas no fundo, muito da decomposição estará na água sem oxigênio na parte inferior do reservatório e produzirá metano. Assim como no caso de metano proveniente de outras fontes, parte deste gás dissolvido será oxidada para CO₂ por bactérias antes de atingir a superfície. O restante será lançado como metano, tornando a zona de deplecionamento uma "fábrica de metano" que continuamente irá

converter CO₂ atmosférico em metano, que é muito mais potente por tonelada de gás em provocar o aquecimento global (Fearnside, 2008).

O CO₂ na água que vem de fontes renováveis, tais como, a serrapilheira na floresta, fitoplâncton, algas, macrófitas e a vegetação de zona de deplecionamento, deve ser distinguido do CO₂ proveniente de fontes fixas iniciais, como as árvores inundadas e o carbono do solo. A parte oriunda de fontes fixas representa uma contribuição líquida para o aquecimento global, tomando cuidado para não contar duas vezes qualquer parte do carbono. A parte proveniente de fontes renováveis, no entanto, não representa uma contribuição ao aquecimento global, porque a mesma quantidade de carbono que foi removido da atmosfera pela fotossíntese está simplesmente sendo retornada para a atmosfera na mesma forma (CO₂) após um período de meses ou anos. Se toda a biomassa das árvores mortas é contada como uma emissão de "desmatamento" ou contada pela diferença de estoques de biomassa entre floresta e "área úmida", como é o caso da metodologia do IPCC (Duchemin *et al.*, 2006; IPCC, 1997) usado no Brasil nos inventários no âmbito da Convenção do Clima (Brasil, MCT, 2004, 2010; Brasil, MCTI, 2015. p. 47), então uma parte do mesmo carbono estará sendo contada duas vezes. Cálculos do impacto do reservatório que contam todo CO₂ como um impacto no aquecimento global (*e.g.*, Saint Louis *et al.*, 2002; Santos *et al.*, 2008; Kemenes *et al.*, 2011) superestimam esta parte da emissão. Pesquisas para melhorar a quantificação das fontes de carbono de onde são derivadas as emissões de CO₂ do reservatório deveriam ser consideradas de alta prioridade. Entretanto, o autor desta revisão optou por contar apenas as emissões de metano da superfície do reservatório e da água passando através das turbinas e vertedouros – não o CO₂ dessas fontes (*e.g.*, Fearnside, 2002, 2005b, 2009). Dióxido de carbono só é contado para decomposição acima da água das árvores mortas.

Óxido nitroso (N₂O)

Óxido nitroso (N₂O) é outro gás de efeito estufa com uma contribuição proveniente de reservatórios porque eles emitem mais que a floresta. As superfícies dos reservatórios da Amazônia emitem, em média, 7,6 kg N₂O km⁻² dia⁻¹ (Lima *et al.*, 2002), ou seja, 27,6 kg ha⁻¹ ano⁻¹. O solo na floresta não inundada emite 8,7 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (Verchot *et al.*,

1999, p. 37). Os reservatórios, portanto, emitem mais de três vezes do que as florestas que eles substituem. Considerando o potencial de aquecimento global mais recente para óxido nitroso do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), cada tonelada de N_2O tem um impacto equivalente a 298 ou 264 toneladas de gás de CO_2 durante um período de 100 anos ou 20 anos, respectivamente (Myhre *et al.*, 2013, p. 714). Reservatórios na Amazônia, portanto, emitem 2,26 ou 2,00 $Mg\ ha^{-1}\ ano^{-1}$ de equivalente de carbono em forma de CO_2 , contra 0,71 ou 0,63 para a floresta, deixando uma emissão líquida de 1,55 ou 1,37 $Mg\ ha^{-1}\ ano^{-1}$ de equivalente de carbono em forma de CO_2 por ano. Para um reservatório de 3.000 km^2 como Balbina, isto representa 465.000 ou 412.000 toneladas de carbono equivalente por ano. As medições das emissões de N_2O do reservatório de Petit-Saut, na Guiana Francesa, e o reservatório de Fortuna, no Panamá, indicam emissões em torno de duas vezes aquelas de solos de floresta tropical (Guérin *et al.*, 2008). As emissões dos solos florestais variam consideravelmente entre locais, indicando a importância das medições específicas para cada local para estimar as emissões pré-barragem. Ao contrário de CO_2 e CH_4 , quase toda a emissão N_2O de barragens ocorre através da superfície do reservatório e não de degaseificação a jusante (Guérin *et al.*, 2008). O intervalo de emissão é grande: considerando apenas as emissões da superfície do reservatório, o impacto sobre aquecimento global de N_2O varia de 29 a 31% das emissões totais de superfície, considerando o CO_2 , CH_4 e N_2O em quatro reservatórios em áreas de floresta tropical: Tucuruí, Samuel, Petit Saut e Fortuna (Guérin *et al.*, 2008). Em reservatórios que não são localizados em áreas de floresta tropical, as emissões de N_2O são muito mais baixas.

Metano (CH_4)

Emissões de metano representam uma grande contribuição de hidrelétricas para o aquecimento global (*e.g.*, Abril *et al.*, 2005). O metano (CH_4) é formado quando a matéria orgânica decompõe-se sem o oxigênio estar presente, por exemplo, no fundo de um reservatório. A água em um reservatório estratifica em duas camadas: uma camada de superfície (o epilímnio) onde a água é mais quente e está em contato com o ar, e uma camada de fundo (o hipolímnio), que se encontra abaixo de uma separação, conhecida como o “termoclina”, porque a água abaixo deste ponto é muito mais fria (Tucci,

2005, p. 593-666). Se for expressa em termos de teor de oxigênio dissolvido, a separação, que ocorre aproximadamente na mesma profundidade, de 2 a 10 m, é conhecida como o “oxiclina”. A água abaixo do termoclina ou oxiclina não se mistura com a água de superfície, exceto em caso de eventos ocasionais onde a estratificação rompe e a água da camada inferior sobe até a superfície, matando muitos peixes (Ribeiro, 2012). Na Amazônia, isso ocorre durante friagens, que representam uma característica climática no oeste, mas não na parte oriental, da Amazônia (Oliveira *et al.*, 2004). Balbina situa-se aproximadamente no limite Oriental deste fenômeno e passou por várias mortandades de peixes quando a água foi revirada durante as friagens. Em condições normais, com a água fria na parte inferior permanecendo isolada abaixo do termoclina, o oxigênio dissolvido na água da camada inferior é rapidamente esgotado quando são oxidadas as primeiras folhas e outros tipos de matéria orgânica no fundo do reservatório, e posteriormente praticamente toda a decomposição forçadamente termina em CH_4 ao invés de CO_2 . Altas concentrações de gases podem ser dissolvidas na água da parte inferior do reservatório, porque a água está fria e sobre alta pressão (Fearnside & Pueyo, 2012).

Lagos naturais e áreas úmidas, incluindo a várzea e o pantanal, são fontes globais significativas de metano (Devol *et al.*, 1990; Hamilton *et al.*, 1995; Melack *et al.*, 2004; Wassmann & Martius, 1997). Um reservatório hidrelétrico, no entanto, é uma fonte substancialmente maior de CH_4 por área de água por causa de uma diferença crucial: a água que sai do reservatório é retirada do fundo em vez da superfície. Tanto os lagos naturais como os reservatórios emitem CH_4 por bolhas e difusão na superfície, mas no caso dos reservatórios, há uma fonte adicional de CH_4 a partir da água que passa através das turbinas e vertedouros. Estes retiram água abaixo do termoclina, onde ela está saturada com metano. O reservatório é como uma banheira, onde se puxa a tampa e a água escoar para fora da parte inferior ao invés de transbordar da superfície como em um lago natural. Porque a água que emerge das turbinas está sobre alta pressão, a repentina queda na pressão quando despejada a jusante fará com que a maior parte do metano forme bolhas que são liberadas para a atmosfera. Em um prazo mais longo, o aquecimento da água que flui a jusante abaixo da represa irá resultar em redução na solubilidade e aumento da liberação de gás (princípio de Le Chatelier).

Para o gás na água fluindo a jusante, abaixo de uma barragem, a liberação de gases para a atmosfera é suficientemente rápida para que a maior parte do CH₄ escape de conversão em CO₂ por bactérias na água. Na verdade, o grande lançamento é imediatamente abaixo das turbinas e até mesmo dentro das próprias turbinas. Esta é a razão pela qual as medições de fluxo de gás da superfície da água no rio abaixo da represa não são suficientes para medir o impacto das emissões de água que passa através das turbinas — grande parte das emissões está escapando da medição. Esta é a explicação principal, por exemplo, que o grupo de pesquisa montado por FURNAS (uma empresa de energia que abastece 40% da eletricidade do Brasil) foi capaz de alegar que hidrelétricas foram “100 vezes” melhores do que os combustíveis fósseis em termos de aquecimento global (Garcia, 2007). Tais valores baixos de emissões são, em parte, porque as barragens estudadas foram no Cerrado e não em floresta tropical, e as estimativas omitem as emissões de desgaseificação nas turbinas e vertedouros (Ometto *et al.*, 2011, 2013). Na verdade, as medições de fluxo começaram a ser feitas a distâncias abaixo da represa que variam 50 m para as barragens de Furnas, Estreito e Peixoto (Santos *et al.*, 2009, p. 835) e 500 m para as barragens de Serra da Mesa e Xingó (Silva *et al.*, 2007). O grupo do projeto de FURNAS também ignorou as emissões que ocorrem mais de 1 km abaixo das barragens (Ometto *et al.*, 2011). A única maneira de estimar a liberação sem tais vieses é basear a estimativa na diferença entre a concentração de CH₄ na água acima e abaixo da barragem (*e.g.*, Fearnside, 2002; Kemenes *et al.*, 2007).

Estimativas do impacto das barragens da Amazônia sobre o aquecimento global têm variado por muitas vezes. A maioria das pessoas, ao ouvir sobre as diferentes estimativas através da imprensa, não terá nenhuma informação sobre como as medições subjacentes foram feitas e o que está incluído ou omitido nas estimativas. Examinar os estudos originais em todos os lados do debate é essencial. Ambos os lados do debate extensivo sobre emissões de gases de efeito estufa estão disponíveis na seção “Controvérsias Amazônicas” do site <http://philip.inpa.gov.br>.

Uma breve revisão das razões para os resultados muito díspares está em ordem. Primeiro, a omissão das emissões da água que passa através das turbinas e vertedouros é uma que deveria ser óbvia. Essa omissão tem sido uma característica de longa data das estimativas oficiais brasileiras, como foi destacado

durante o memorável debate sobre este tema na revista *Climatic Change* (ver: Rosa *et al.*, 2004, 2006; Fearnside, 2004, 2006a). A mesma omissão se aplica para as emissões de gases de efeito estufa por barragens estimadas na primeira comunicação nacional do Brasil no âmbito da Convenção do Clima (Brasil, MCT, 2004; Rosa *et al.*, 2002), com resultados mais do que dez vezes inferiores às estimativas do autor desta revisão para barragens como Tucuruí e Samuel (Fearnside, 2002, 2005a). Omissão das turbinas e vertedouros nos valores oficiais foi a principal explicação. O importante papel desempenhado pelas emissões da água lançada pelas turbinas é evidente a partir de medições diretas feitas acima e abaixo das barragens de Petit Saut, na Guiana Francesa (Abril *et al.*, 2005; Delmas *et al.*, 2004; Galy-Lacaux *et al.*, 1997, 1999; Guérin, 2006) e, no Brasil, de Balbina (Kemenes *et al.*, 2007, 2008, 2011) e de Tucuruí, Curuá-Una e Samuel (Kemenes *et al.*, 2016).

A disponibilidade muito maior de dados relevantes às emissões da superfície dos reservatórios, em comparação com as emissões da água que passa pelas turbinas e pelos vertedouros, faz com que estimativas que tentam generalizar para barragens amazônicas em geral tendam a considerar apenas as emissões da superfície dos reservatórios (*e.g.*, de Faria *et al.*, 2015; Vilela & Reid, 2017). Isto subestima o impacto das barragens (*e.g.*, Fearnside, 2016c; Kemenes *et al.*, 2016).

No primeiro inventário do Brasil de gases de efeito estufa, as emissões de hidrelétricas foram calculadas para nove barragens, mas os resultados foram confinados a uma caixa de texto e não foram incluídos no total das emissões do país (Brasil, MCT, 2004, p. 152-153). No segundo e terceiro inventários nacionais (Brasil, MCT, 2010; Brasil, MCTI, 2015, p. 47), as emissões de hidrelétricas foram omitidas completamente como emissores de CH₄ e N₂O, embora o carbono nas árvores inundadas fosse contado como uma emissão de CO₂. Em muitas discussões do papel das barragens no aquecimento global, o impacto da liberação de CO₂ das árvores mortas pela inundação do reservatório é uma grande omissão.

O exagero da emissão pré-barragem é outra maneira que as emissões líquidas de barragens podem ser subestimadas. Como já mencionado, as emissões naturais das áreas úmidas são importantes fontes de metano, e isto tem sido usado para argumentar que a paisagem inundada por uma represa teria emitido grandes quantidades de metano de

qualquer maneira se não tivesse sido construída a barragem. Por exemplo, a Associação Internacional de Energia Hidrelétrica (IHA), que representa a indústria hidrelétrica mundial, considerou as emissões de hidrelétricas sendo uma questão de “soma zero”, porque essas não excederiam as emissões pré-barragem (Gagnon, 2002). No estudo de impacto ambiental (EIA) para a represa de Belo Monte, a área que estava para ser inundada foi presumida de estar emitindo $48 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ antes da criação do reservatório, com base em dois conjuntos de medições de emissão da superfície do rio e solo em locais próximos à margem do rio (Brasil, ELETROBRÁS, 2009, Apêndice 7.1.3-1; Ver Fearnside, 2011). A maior parte das medições de emissão do solo na estação chuvosa foi nas áreas alagadas, que recentemente tinham sido expostas pelo abaixamento do nível da água (Brasil, ELETROBRÁS, 2009, Apêndice 7.1.3-1, p. 72), resultando em alta emissão de CH_4 e influenciando fortemente a média usada para toda a área terrestre, que estava para ser inundada pelo reservatório de Belo Monte. No entanto, hidrelétricas normalmente são construídas em locais com solos bem drenados, sendo escolhidos locais com corredeiras e cachoeiras, ao invés de locais planos das zonas úmidas. Isso ocorre porque a topografia íngreme resulta em maior geração de energia. Os solos sazonalmente inundados ao longo do rio não podem ser generalizados para uma área de reservatório, que, na Amazônia, é a floresta de terra firme. O solo sob a floresta de terra firme é, geralmente, considerado um sumidouro de metano, em vez de uma fonte (Keller *et al.*, 1991; Potter *et al.*, 1996). Uma estimativa irrealisticamente alta da emissão pré-barragem conduz a uma subestimativa do impacto líquido. No caso do EIA de Belo Monte, as $48 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ é subtraído da estimativa do EIA de $70,7 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para emissão no reservatório, um valor subestimado por várias razões, incluindo o uso como metade da estimativa de um conjunto de medições na hidrelétrica de Xingó, no semi-árido da região nordeste brasileira, onde as emissões seriam inferiores às daquelas de uma represa da Amazônia, deixando apenas $70,7 - 48,0 = 22,7 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ como a emissão líquida oficialmente estimada para Belo Monte.

Outra fonte de subestimação das emissões de energia hidrelétrica no Brasil é uma correção da lei de potência matematicamente errônea que tem sido repetidamente aplicada no cálculo das emissões de ebulição e difusão das superfícies dos reservatórios. Isto decorre de uma tese de doutorado

(Santos, 2000), que é a base de um relatório da ELETROBRÁS (Brasil, ELETROBRÁS, 2000). O relatório calcula e tabula as emissões para todas as 223 grandes barragens no Brasil naquela época, com uma superfície total de 32.975 km^2 de água, uma área maior que a Bélgica. A correção continuou a ser aplicada (*e.g.*, Santos *et al.*, 2008). Estes ajustes da ELETROBRÁS reduzem as estimativas de emissão para superfícies em 76% em comparação com a média simples dos valores medidos nos dados do mesmo estudo (ver Pueyo & Fearnside, 2011). O problema é que as bolhas da superfície do reservatório normalmente ocorrem em episódios esporádicos com borbulhamento intenso durante um curto período, seguido por longos períodos com poucas bolhas. Como o número de amostras é inevitavelmente insuficiente para representar esses eventos relativamente pouco frequentes, pode-se aplicar uma correção da lei de potência para os dados de medição. No entanto, os eventos raros, porém de alto impacto, aumentam, ao invés de diminuir as emissões. Na verdade, há pelo menos cinco grandes erros matemáticos no cálculo da ELETROBRÁS, incluindo uma inversão do sinal de positivo para negativo. A subestimativa dos erros na aplicação da correção pela lei de potência aplica-se não só ao metano, mas também a propagação de CO_2 , porém nem toda essa emissão é uma contribuição líquida ao aquecimento global. A correta aplicação da lei de potência resulta em estimativas das emissões de superfície de metano que são 345% mais elevadas do que as estimativas da ELETROBRÁS (ver: Pueyo & Fearnside, 2011).

O método inadequado de amostragem é outra maneira que pode levar a estimativa de emissões várias vezes mais baixas do que deveriam ser (Fearnside & Pueyo, 2012). Como já mencionado, a tentativa de estimar as emissões de turbinas e vertedouros apenas por meio de medições de fluxo da superfície abaixo da barragem, está fadado a perder grande parte das emissões, resultando em grande subestimativa do impacto total. Este é um fator importante na baixa estimativa por FURNAS e ELETROBRÁS. Estimativas (incluindo as minhas), mesmo sendo baseadas em concentração, têm subestimado as emissões devido ao método de amostragem utilizado para obter a água de perto do fundo do reservatório. O método quase universal é a garrafa de Ruttner, que é um tubo com “portas” que se abrem em cada extremidade. O tubo é abaixado por meio de um cabo com as duas portas abertas e, em seguida, as portas são fechadas e a garrafa é puxada para cima até a superfície. Então, uma

amostra da água é removida para análise química. O problema é que gases dissolvidos na água sobre pressão formarão bolhas no interior da garrafa Ruttner quando esta está sendo puxada para a superfície. O gás vaza para fora em torno das portas (que não são herméticas) e, em qualquer caso, seria perdido quando a água é removida (com uma seringa) para uma determinação tipo “espaço de cabeça” (“*head-space*”) do volume de gás para a análise química. Esse problema foi recentemente abordado por Kemenes *et al.* (2011). Alexandre Kemenes inventou uma “garrafa Kemenes”, que recolhe a água em uma seringa que é abaixada para a profundidade desejada. A seringa tem um mecanismo de mola que tira a água para a amostra, e as bolhas de gás que emergem quando a amostra é levantada até a superfície são capturadas e medidas. Uma comparação entre os dois métodos de amostragem indica que a concentração de metano média para uma amostra tirada de 30 m de profundidade é 116% superior, se for medida com a garrafa Kemenes, assim mais do que dobrando a quantidade de metano estimada para passar através das turbinas em Balbina. A diferença seria ainda maior para reservatórios com turbinas mais profundas, como em Tucuruí.

Outro fator importante que afeta o impacto calculado para hidrelétricas é o potencial de aquecimento global (GWP) do metano. Este é o fator de conversão para traduzir toneladas de metano em toneladas de CO₂-equivalentes. Os valores para esse conversor aumentaram em sucessivas estimativas do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). As conversões baseiam-se no horizonte de tempo de 100 anos adotado pelo Protocolo de Quioto. O relatório intercalar de 1994 do IPCC estimou um valor de 11 para o GWP do metano, ou seja, o lançamento de uma tonelada de metano teria o mesmo impacto sobre o aquecimento global que a liberação de 11 toneladas de CO₂ (Albritton *et al.*, 1995). Isto foi aumentado para 21 em 1995 no segundo relatório de avaliação utilizado pelo Protocolo de Quioto (Schimel *et al.*, 1996). Em 2001, o valor GWP aumentou para 23 no terceiro relatório de avaliação (Ramaswamy *et al.*, 2001) e depois para 25, em 2007, no quarto relatório de avaliação (Forster *et al.*, 2007). No quinto relatório de avaliação (AR5) esse valor aumentou para 28, se calculado da mesma forma (horizonte de tempo de 100 anos e sem considerar as retroalimentações entre o carbono e o clima em resposta a emissões de CH₄), mas também relata um valor de 34 quando essas retroalimentações são incluídas (Myhre *et al.*, 2013, p. 714). O intervalo de incerteza para esta

estimativa estende-se para um valor de mais de 40 (Shindell *et al.*, 2009). O AR5 calcula também um valor de 86 para o GWP do metano se o horizonte de tempo é reduzido para 20 anos (Myhre *et al.*, 2013, p. 714). Este horizonte de tempo mais curto é muito mais relevante para o estabelecimento de políticas de mitigação do aquecimento global, sendo que são as emissões neste período que determinarão se a temperatura média global ultrapassará o limite acordado em Paris em 2015 como sendo “perigoso”: um nível “bem abaixo” do marco de 2° C acima da média pré-industrial (Fearnside, 2017d). Em comparação com o valor de 21 adotado pelo Protocolo de Quioto para o primeiro período de compromisso (2008-2012), o valor de 34 representa um aumento de 62%, enquanto o valor de 86 efetivamente quadruplica o impacto das hidrelétricas tropicais. Para hidrelétricas tropicais, as emissões de metano representam a maior parte do impacto, enquanto para os combustíveis fósseis quase toda a emissão é na forma de CO₂.

RECUPERAÇÃO DE METANO

Propostas foram feitas para recuperar e usar uma parte do metano que está sendo produzido em hidrelétricas. Isto seria tanto para reduzir a quantidade de metano liberado para a atmosfera e para gerar eletricidade adicional sem aumentar as emissões globais (Bambace *et al.*, 2007; Lima *et al.*, 2008). Um projeto visa bombear a água rica em metano tirada do nível abaixo do termoclina (Ramos *et al.*, 2009), enquanto outro projeto iria capturar metano que é desgasificado imediatamente abaixo das turbinas (Kemenes & Forsberg, 2008). Até agora, nenhum sistema de captura de metano tem sido implementado, na prática.

COMPARAÇÕES DE BARRAGENS COM COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS

O valor do tempo é crucial para comparar o impacto no aquecimento global de energia hidrelétrica e dos combustíveis fósseis ou outras fontes de energia. Uma diferença é nos gases emitidos. Uma tonelada de metano tem um impacto instantâneo muito elevado na radiação infravermelha que é emitida pela superfície terrestre (aumentando as temperaturas da superfície da Terra), mas cada molécula permanece na atmosfera apenas por um período médio de 12,4 anos (Myhre *et al.*, 2013, p. 714). Uma tonelada de CO₂ bloqueia muito menos radiação infravermelha do que uma tonelada de CH₄ em termos instantâneos, mas

o tempo médio que uma molécula de CO₂ permanece na atmosfera é aproximadamente dez vezes maior que o tempo médio da molécula de CH₄. Isso se reflete no valor muito mais elevado do GWP do metano em uma base de 20 anos, em comparação com uma base de 100 anos, como no caso do GWP que foi usado pelo Protocolo de Quioto. Qualquer estratégia capaz de impedir que a temperatura média global ultrapassasse o limite de aumento “bem abaixo” de 2° C definido como mudança climática “perigosa” deve incluir a redução das emissões de metano dentro deste período de tempo (Shindell *et al.*, 2012). A tendência geral de omitir e desconsiderar as emissões de metano calculadas com base de 20 anos é uma falha grave em quase toda a discussão de políticas públicas de combate ao efeito estufa (Ocko *et al.*, 2017).

Uma hidrelétrica tem uma tremenda emissão nos primeiros anos, oriundo da morte das árvores, da decomposição subaquática do carbono do solo e das folhas da floresta original, e a explosão das marcrófitas nos primeiros anos devido à fertilidade mais elevada da água. Nos anos seguintes, esta emissão declinará para um nível inferior que será mantido por tempo indeterminado a partir de fontes renováveis, como a inundação anual da vegetação macia na zona de deplecionamento. O grande pico das emissões nos primeiros anos cria uma “dívida” que será lentamente paga com a geração de energia pela barragem para substituir a geração por combustíveis fósseis ao longo dos anos subsequentes. O tempo decorrido pode ser substancial. Por exemplo, no caso de Belo Monte, junto com a primeira represa que seria construída rio acima (Babaquara/Altamira), o tempo necessário para saldar a dívida de emissão inicial é estimado em 41 anos (Fearnside, 2009). Isto considerando o verdadeiro impacto sendo subestimado por ter usado o valor do Protocolo de Quioto de 21 para o GWP do metano e por ter usado concentrações de metano medidas com as tradicionais garrafas Ruttner. Um período de 41 anos tem uma enorme importância para a Amazônia, e os benefícios do limite de aumento da temperatura média, global acordado em Paris, seriam ultrapassados muito antes desse prazo. Uma fonte de energia que leva 41 ou mais anos só para sair de um saldo negativo em termos de aquecimento global dificilmente pode ser considerada como energia “verde”.

Barragens têm muitos outros impactos, além da emissão de gases de efeito estufa, incluindo o deslocamento de populações humanas e a perda dos meios de subsistência (*e.g.*, de pesca) para os moradores

ribeirinhos a montante e a jusante de um reservatório (*e.g.*, WCD, 2000). Reservatórios também destroem a biodiversidade (*e.g.*, Lees *et al.*, 2016) e as terras agrícolas e urbanas (*e.g.*, Magalhães & da Cunha, 2017). Também provocam a metilação de mercúrio que está presente no solo -- um processo que ocorre nas condições anóxicas no fundo dos reservatórios -- levando à acumulação desta forma tóxica de mercúrio em peixes e nos humanos que os consomem (*e.g.*, Leino & Lodenius, 1995). Barragens também perturbam os fluxos de sedimentos e as migrações de peixes, entre outros impactos (veja comentários para barragens individuais em Fearnside, 1989, 1999, 2001, 2005a, 2006b, 2013a, 2014a,b, 2015b).

Enquanto outras fontes de energia também tenham impactos, a destruição ambiental e social provocada por barragens coloca essa opção em uma classe por si só. Além disso, a concentração excessiva dos impactos de hidrelétricas sobre as populações locais que, por acaso, vivem no caminho desta forma de desenvolvimento, representa um custo social que é mais pronunciado no caso das barragens do que para outras opções energéticas, e isso faz com que o impacto de represas seja ainda maior do que seria visto como uma hipotética “média” espalhada por toda a sociedade. A contribuição das barragens para o aquecimento global faz uma adição geralmente pouco apreciada a esses impactos.

Controlar o aquecimento global vai exigir uma contabilidade exata de emissões líquidas em todo o Planeta: a radiação eletromagnética que é deixada de fora ou subestimada implica que as ações de mitigação projetadas para conter o aumento da temperatura dentro de um limite especificado (tais como o limite “bem abaixo” de 2° C atualmente acordado no âmbito da Convenção de Clima) simplesmente falharão em impedir que a temperatura continue a aumentar. A Amazônia é um dos lugares que deverá sofrer as consequências mais graves se falharmos nesta responsabilidade.

CRÉDITO DE CARBONO PARA A ENERGIA HIDRELÉTRICA

Os créditos de carbono que atualmente são concedidos a projetos de energia hidrelétrica através do mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL) é um dos aspectos mais controversos dos esforços para mitigar o aquecimento global no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima

(UNFCCC). As hidrelétricas são uma forma cada vez mais importante de mitigação sob o MDL, e representaram 28% da emissão de créditos de projetos no “*pipeline*” (projeto-duto) para financiamento em 01 de julho de 2014. Espera-se conceder um total anual mundial de 342,8 milhões em reduções certificadas de emissões (CERs), ou seja, de crédito de carbono expresso em toneladas de CO₂-equivalente (UNEP Risø Centre, 2014). Esta quantidade de CO₂-equivalente é igual a 93,5 milhões de toneladas de carbono por ano, ou aproximadamente igual à emissão anual do Brasil a partir de combustíveis fósseis. As regras atuais permitem que projetos hidrelétricos aleguem produzir pouca ou nenhuma emissão (ver Fearnside, 2013b,c). Isto representa uma lacuna significativa, especialmente porque grande parte da futura expansão de hidrelétricas é esperada ocorrer nos trópicos, onde as barragens têm emissões mais altas. Ainda mais importante é o fato de que os países em todo o mundo constroem barragens como parte de programas nacionais de desenvolvimento que não têm nada a ver com preocupações sobre o aquecimento global. A vontade dos governos e empresas para investir grandes somas em barragens, muito antes de qualquer crédito de carbono ser aprovado, também indica que as barragens seriam construídas independentemente de qualquer rendimento adicional oriundo da venda de CREs. Os cálculos financeiros incluídos nos projetos de carbono submetidos ao MDL para substanciar reivindicações de que as barragens seriam construídas apenas por causa da renda do carbono (ou seja, que elas são “adicionais”) estão em desacordo com o comportamento dos governos e das empresas de construção de barragens, indicando deficiências nas metodologias atuais do MDL para a determinação da “adicionalidade” de projetos de energia hidrelétrica (Fearnside, 2013b,c, 2015c). Quando o crédito é concedido a projetos que seriam construídos de qualquer forma, os países que compram o crédito posteriormente emitem essa quantidade de CO₂, sem que a emissão realmente seja compensada, assim, aumentando ainda mais o aquecimento global.

CONCLUSÕES

As hidrelétricas tropicais emitem quantidades substanciais de gases de efeito estufa. Os montantes emitidos variam muito entre barragens, mas as emissões contadas variam ainda mais devido a frequentes omissões nas emissões relatadas, tais como a liberação de metano da água que passa através das

turbinas e vertedouros. Emissões de hidrelétricas ocorrem em um grande pulso nos primeiros anos depois de criar um reservatório, seguido por uma emissão menor, porém sustentada indefinidamente. A comparação com o impacto das emissões de geração de energia de combustíveis fósseis, portanto, depende muito do horizonte de tempo e de qualquer ponderação para preferência de tempo usada na comparação. Mesmo sem qualquer ponderação pela preferência temporal, represas amazônicas podem levar quatro ou mais décadas para “empatar” em termos de seu impacto no efeito estufa, fazendo com que estejam longe de ser energia “verde” que pode ser retratada como mitigadora de aquecimento global. As hidrelétricas também contribuem para o aquecimento global através do crédito de carbono emitido para barragens, porque as emissões são subestimadas ou ignoradas e porque permitem a emissão de gases pelos países compradores do crédito de carbono concedido às represas que seriam construídas, independentemente de qualquer renda extra, oriunda da venda dos créditos.

AGRADECIMENTOS

As pesquisas são financiadas exclusivamente por fontes acadêmicas: Conselho Nacional do Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq: proc. 305880/2007-1; 5-575853/2008 304020/2010-9; 573810/2008-7), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas – FAPEAM (proc. 708565) e Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA:PRJ15.125). Este capítulo é uma tradução de Fearnside (2016c); uma versão anterior foi publicada em Fearnside (2019).

REFERÊNCIAS

- Abril, G., Guérin, F., Richard, S., Delmas, R., Galy-Lacaux, C., Gosse, P., Tremblay, A., Varfalvy, L., Santos, M.A. & Matvienko, B. 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: art. GB 4007, <https://doi.org/10.1029/2005GB002457>
- Abril, G., Parize, M., Pérez, M.A.P. & Filizola, N. 2013. Wood decomposition in Amazonian hydropower reservoirs: An additional source of greenhouse gases. *Journal of South American Earth Sciences* 44: 104–107. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2012.11.007>.
- Albritton, D.L., Derwent, R.G., Isaksen, I.S.A., Lal, M. & Wuebbles, D.J. 1995. Trace gas radiative forcing indices. p. 205–231. In: Houghton, J.T., Meira Filho, J.L.G., Bruce, J.,

- Lee, H., Callander, B.A., Haites, E., Harris, N. & Maskell, K. (Eds.). *Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido. 339 p.
- Araújo, A.C., Nobre, A.D., Kruijt, B., Culf, A.D., Stefani, P., Elbers, J., Dallarosa, R., Randow, C., Manzi, A.O., Valentini, R., Gash, J.H.C. & Kabat, P. 2002. Dual tower longterm study of carbon dioxide fluxes for a central Amazonian rain forest: The Manaus LBA site. *Journal of Geophysical Research* 107(D20): art. 8090. <https://doi.org/10.1029/2001JD000676>
- Bambace, L.A.W., Ramos, F.M., Lima, I.B.T. & Rosa, R.R. 2007. Mitigation and recovery of methane emissions from tropical hydroelectric dams. *Energy* 32: 1038-1046. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.09.008>
- Barnthouse, L.W., Cada, G.F., Cheng, M.D., Easterly, C.E., Kroodsmas, R.L., Lee, R., Shriner, D.S., Tolbert, V.R. & Turner, R.S. 1994. Estimating externalities of the hydro fuel cycles. (Report 6). Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, E.U.A. 205 p. <https://doi.org/10.2172/757384>
- Barros, N., Cole, J.J., Tranvik, L.J., Prairie, Y.T., Bastviken, D., Huszar, V.L.M., del Giorgio, P. & Roland, F. 2011. Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude. *Nature Geoscience* 4: 593-596. <https://doi.org/10.1038/NCEO1211>
- Barthem, R.B., Ribeiro, M.C.L.B. & Petrere Júnior, M. 1991. Life strategies of some long distance migratory catfish in relation to hydroelectric dams in the Amazon Basin. *Biological Conservation* 5: 339-345.
- Bastviken, D., Tranvik, L.J., Downing, J.A., Crill, P.M. & Enrich-Prast, A. 2011. Freshwater methane emissions offset the continental carbon sink. *Science* 331: 50. <https://doi.org/10.1126/science.1196808>
- 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.
- Brasil, ELETROBRÁS (Centrais Elétricas Brasileiras). 2009. *Aproveitamento Hidrelétrico Belo Monte: Estudo de Impacto Ambiental*. Fevereiro de 2009. ELETROBRÁS, Rio de Janeiro, RJ. 36 vols. Disponível em: http://philip.inpa.gov.br/publ_livres/Dossie/BM/BELO%20MONTE.htm
- Brasil, MCT (Ministério da Ciência e Tecnologia). 2004. *Comunicação Nacional Inicial do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima*. MCT, Brasília, DF. 276 p. Disponível em: <http://sirene.mcti.gov.br/documents/1686653/1706391/205854.pdf/5eadb8ca-f316-49ec-9dd1-7ba80754b20d>
- Brasil, MCT (Ministério da Ciência e Tecnologia). 2010. *Segunda Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima*. MCT, Brasília, DF. 2 Vols. 520 p.
- Brasil, MCTI (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação). 2015. *Terceiro Inventário Brasileiro de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa: Relatório de Referência -- Emissões no Setor Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas*. MCTI, Brasília, DF. 342 p. Disponível em: <http://sirene.mcti.gov.br/documents/1686653/1706739/Volume+3.pdf/355d4a1e-9f3c-474a-982e-b4a63312813b>
- Brasil, MME (Ministério das Minas e Energia). 2013. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2022*. MME, Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Brasília, DF. 409 p. http://www.epe.gov.br/PDEE/24102013_2.pdf
- de Faria, F.A.M., Jaramillo, P., Sawakuchi, H.O., Richey, J.E. & Barros, N. 2015 Estimating greenhouse gas emissions from future Amazonian hydroelectric reservoirs *Environmental Research Letters* 10 (12): art. 124019. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124019>
- Delmas, R., Richard, S., Guérin, F., Abril, G., Galy-Lacaux, C., Delon, C. & Grégoire, A. 2004. Long term greenhouse gas emissions from the hydroelectric reservoir of Petit Saut (French Guiana) and potential impacts. p. 293-312. In: Tremblay, A., Varfalvy, L., Roehm, C. & Garneau, M. (Eds.) *Greenhouse Gas Emissions: Fluxes and Processes. Hydroelectric Reservoirs and Natural Environments*. Springer-Verlag, New York, NY, E.U.A. 732 p.
- Denholm, P. & Kulcinski, G.L. 2004. Life cycle energy requirements and greenhouse gas emissions from large scale energy storage systems. *Energy Conversion and Management* 45(13-14): 2153-2172. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.10.014>
- Devol, A.H., Richey, J.E., Forsberg, B.R. & Martinelli, L.A. 1990. Seasonal dynamics in methane emissions from the Amazon River floodplain to the troposphere. *Journal of Geophysical Research* 95: 16.417- 16.426. <https://doi.org/10.1029/JD095iD10p16417>
- Dones, R., Bauer, C., Bolliger, R., Burger, B., Heck, T., Roder, A., Emenegger, M. F., Frischknecht, R., Jungbluth, N. & Tuchschnid, M. 2007. Life cycle inventories of energy systems: results for current systems in Switzerland and Other UCTE countries. (Ecoinvent Report No. 5), Paul Scherrer Institute (PSI), Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Villigen, Suíça. 185 p. Disponível em: http://www.ecolo.org/documents/documents_in_english/Life-cycle-analysis-PSI-05.pdf
- Dones, R., Heck, T., Bauer, C., Hirschberg, S., Bickel, P., Preiss, P., Panis, L.I. & Vlieger, I. de. 2005. *Externalities of Energy: Extension of Accounting Framework and Policy Applications: New Energy Technologies*. (ENG1-CT-2002-00609) Paul Scherrer Institute (PSI), Villigen, Suíça. 76 p. Disponível em: http://www.externe.info/externe_2006/expolwp6.pdf
- Duchemin, É., Huttunen, J.T., Tremblay, A., Delmas, R. & Menezes, C.F.S. 2006. Appendix 3. CH₄ emissions from flooded land: Basis for future methodological development. p. Ap.3.1-Ap.3.8 In: Eggleston, S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T. & Tanabe, K. (Eds.) *Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme Technical Support Unit, Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Kanagawa, Japão, Paginação irregular.

- Fearnside, P.M. 1989. Brazil's Balbina Dam: Environment versus the legacy of the pharaohs in Amazonia. *Environmental Management* 13(4): 401-423. <https://doi.org/10.1007/BF01867675>
- Fearnside, P.M. 1995. Hydroelectric dams in the Brazilian Amazon as sources of 'greenhouse' gases. *Environmental Conservation* 22(1): 7-19. <https://doi.org/10.1017/S0376892900034020>
- 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. <https://doi.org/10.1017/S0376892997000118>
- Fearnside, P. M. 1999. Social impacts of Brazil's Tucuruí Dam. *Environmental Management*. 24(4): 485-495. <https://doi.org/10.1007/s002679900248>
- Fearnside, P.M. 2000. Global warming and tropical land-use change: Greenhouse gas emissions from biomass burning, decomposition and soils in forest conversion, shifting cultivation and secondary vegetation. *Climatic Change* 46(1-2): 115-158. <https://doi.org/10.1023/A:1005569915357>
- Fearnside, P.M. 2001. Environmental impacts of Brazil's Tucuruí Dam: Unlearned lessons for hydroelectric development in Amazonia. *Environmental Management* 27(3): 377-396. <https://doi.org/10.1007/s002670010156>
- 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. <https://doi.org/10.1023/A:1012971715668>
- 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. <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000043174.02841.23>
- Fearnside, P.M. 2005a. Brazil's Samuel Dam: Lessons for hydroelectric development policy and the environment in Amazonia. *Environmental Management* 35(1): 1-19. <https://doi.org/10.1007/s00267-004-0100-3>
- Fearnside, P.M. 2005b. Do hydroelectric dams mitigate global warming? The case of Brazil's Curuá-Una Dam. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 10(4): 675-691. <https://doi.org/10.1007/s11027-005-7303-7>
- Fearnside, P.M. 2006a. Greenhouse gas emissions from hydroelectric dams: Reply to Rosa *et al.* *Climatic Change* 75(1-2): 103-109. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-9016-z>
- Fearnside, P.M. 2006b. Dams in the Amazon: Belo Monte and Brazil's hydroelectric development of the Xingu River Basin. *Environmental Management* 38(1): 16-27. <https://doi.org/10.1007/s00267-005-00113-6>
- Fearnside, P.M. 2007. Why hydropower is not clean energy. *Scitizen*, Paris, França. http://www.scitizen.com/screens/blogPage/viewBlog/sw_viewBlog.php?idTheme=14&idContribution=298
- 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. <https://doi.org/10.4257/oeco.2008.1201.11>
- Fearnside, P.M. 2009. As hidrelétricas de Belo Monte e Altamira (Babaquara) como fontes de gases de efeito estufa. *Novos Cadernos NAEA* 12(2): 5-56. <https://doi.org/10.5801/S21797536>
- Fearnside, P.M. 2011. Gases de efeito estufa no EIA-RIMA da hidrelétrica de Belo Monte. *Novos Cadernos NAEA* 14(1): 5-19. <https://doi.org/10.5801/S21797536>
- Fearnside, P.M. 2013a. Decision-making on Amazon dams: Politics trumps uncertainty in the Madeira River sediments controversy. *Water Alternatives* 6(2): 313-325. <http://www.water-alternatives.org/index.php/alldoc/articles/vol6/v6issue2/218-a6-2-15/file>
- Fearnside, P.M. 2013b. 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. <https://doi.org/10.1007/s11027-012-9382-6>
- Fearnside, P.M. 2013c. Credit for climate mitigation by Amazonian dams: Loopholes and impacts illustrated by Brazil's Jirau Hydroelectric Project. *Carbon Management* 4(6): 681-696. <https://doi.org/10.4155/CMT.13.57>
- Fearnside, P.M. 2014a. Impacts of Brazil's Madeira River dams: Unlearned lessons for hydroelectric development in Amazonia. *Environmental Science & Policy* 38: 164-172. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2013.11.004>
- Fearnside, P.M. 2014b. Brazil's Madeira River dams: A setback for environmental policy in Amazonian development. *Water Alternatives* 7(1): 156-169. <http://www.water-alternatives.org/index.php/alldoc/articles/vol7/v7issue1/244-a7-1-15/file>
- Fearnside, P.M. 2015a. Emissions from tropical hydropower and the IPCC. *Environmental Science & Policy* 50: 225-239. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.03.002>
- Fearnside, P.M. (Ed.). 2015b. *Hidrelétricas na Amazônia: Impactos Ambientais e Sociais na Tomada de Decisões sobre Grandes Obras*. Editora do INPA, Manaus, Amazonas. 2 Vols. Disponível em: <http://philip.inpa.gov.br>
- Fearnside, P.M. 2015c. Tropical hydropower in the Clean Development Mechanism: Brazil's Santo Antônio Dam as an example of the need for change. *Climatic Change* 131(4): 575-589. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1393-3>
- Fearnside, P.M. 2016a. Interactive comment on "Organic carbon burial efficiency in a large tropical hydroelectric reservoir" by Mendonça *et al.* *Biogeosciences Discussions* 12: C9548-C9548. <http://www.biogeosciences-discuss.net/12/C9548/2016/bgd-12-C9548-2016-supplement.pdf>
- Fearnside, P.M. 2016b. Greenhouse gas emissions from Brazil's Amazonian hydroelectric dams. *Environmental Research Letters* 11(1): 011002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/1/011002>

- Fearnside, P.M. 2016c. Greenhouse gas emissions from hydroelectric dams in tropical forests. p. 428-438. In: J. Lehr & J. Keeley (Eds.) *Alternative Energy and Shale Gas Encyclopedia*. John Wiley & Sons, New York, E.U.A. 912 p.
- Fearnside, P.M. 2017a. Planned disinformation: The example of the Belo Monte Dam as a source of greenhouse gases. p. 125-142. In: Issberner, L.-R. & Lena, P. (Eds.) *Brazil in the Anthropocene: Conflicts between Predatory Development and Environmental Policies*. Routledge, Taylor & Francis Group, New York, E.U.A. 364 p.
- Fearnside, P.M. 2017b. Belo Monte: Actors and arguments in the struggle over Brazil's most controversial Amazonian dam. *Die Erde* 148 (1): 14-26 <https://doi.org/10.12854/erde-148-27>
- Fearnside, P.M. 2017c. Brazil's Belo Monte Dam: Lessons of an Amazonian resource struggle. *Die Erde* 148 (2-3) 167-184. <https://doi.org/10.12854/erde-148-46>
- Fearnside, P.M. 2017d. Dams with big reservoirs: Brazil's hydroelectric plans threaten its Paris climate commitments. *The Globalist*, 29 de janeiro de 2017. <http://www.theglobalist.com/dams-climate-change-global-warming-brazil-paris-agreement/>
- Fearnside, P.M. 2019. Hidrelétricas em florestas tropicais como fontes de gases de efeito estufa. p. 35-68. In: A. Prudente & V. Galucio. (Eds.) *Biota Amazônica - Museu Goeldi 150 Anos*. Museu Paraense Emílio Goeldi-MPEG, Belém, Pará.
- Fearnside, P.M. & Pueyo, S. 2012. Underestimating greenhouse-gas emissions from tropical dams. *Nature Climate Change* 2(6): 382-384. <https://doi.org/10.1038/nclimate1540>
- Feitosa, G.S., Graça, P.M.L.A. & Fearnside, P.M. 2007. Estimativa da zona de deplecionamento da hidrelétrica de Balbina por técnica de sensoriamento remoto. p. 6713-6720. In: J.C.N. Epiphanyo, L.S. Galvão & L.M.G. Fonseca (Eds.) *Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Brasil 21-26 abril 2007*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, SP. <http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.13.15.55/doc/6713-6720.pdf>
- Forsberg, B.R., Melack, J.M., Dunne, T., Barthem, R.B., Goulding, M., Paiva, M.V., Sorribas, R.C.D., Silva Jr., U.L. da & Weisser, S. 2017. The potential impact of new Andean dams on Amazon fluvial ecosystems. *PLoS ONE* 12(8): art. e0182254. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182254>
- Forster, P. & 50 outros. 2007. Changes in atmospheric constituents and radiative forcing. p. 129-234. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. & Miller, H.L. (Eds.) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido. 996 p. https://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg1_report_the_physical_science_basis.htm
- Gagnon, L. 2002. *The International Rivers Network statement on GHG emissions from reservoirs, a case of misleading science*. International Hydropower Association (IHA), Sutton, Surrey, Reino Unido. 9 p.
- Galy-Lacaux, C., Delmas, R., Jambert, C., Dumestre, J.-F., Labroue, L., Richard, S. & Gosse, P. 1997. Gaseous emissions and oxygen consumption in hydroelectric dams: A case study in French Guyana. *Global Biogeochemical Cycles* 11(4): 471-483. <https://doi.org/10.1029/97GB01625>
- Galy-Lacaux, C., Delmas, R., Kouadio, J., Richard, S. & Gosse, P. 1999. Long-term greenhouse gas emissions from hydroelectric reservoirs in tropical forest regions. *Global Biogeochemical Cycles* 13(2): 503-517. <https://doi.org/10.1029/1998GB900015>
- Garcia R. 2007. Estudo apóia tese de hidrelétrica "limpa": Análise em usinas no cerrado indica que termelétricas emitem até cem vezes mais gases causadores do efeito estufa. *Folha de São Paulo*, 01 de maio de 2007, p. A-16.
- Guérin, F., Abril, G., Richard, S., Burban, B., Reynouard, C., Seyler, P. & Delmas, R. 2006. Methane and carbon dioxide emissions from tropical reservoirs: Significance of downstream rivers. *Geophysical Research Letters* 33: art. L21407. <https://doi.org/10.1029/2006GL027929>
- Guérin, F., Abril, G., Tremblay, A. & Delmas, R. 2008. Nitrous oxide emissions from tropical hydroelectric reservoirs. *Geophysical Research Letters* 35: L06404, <https://doi.org/10.1029/2007GL033057>
- Gunkel, G. 2009. Hydropower – A green energy? Tropical reservoirs and greenhouse gas emissions. *CLEAN – Soil, Air, Water* 37(9): 726-734. <https://doi.org/10.1002/clen.200900062>
- Hamilton, S.K., Sippel, S.J. & Melack, J.M. 1995. Oxygen depletion, carbon dioxide and methane production in waters of Pantanal wetland of Brazil. *Biogeochemistry* 30: 115-141. <https://doi.org/10.1007/BF00002727>
- Horvath, A. 2005. Decision-making in Electricity Generation Based on Global Warming Potential and Life-cycle Assessment for Climate Change. University of California Energy Institute, Berkeley, California, E.U.A. 16 p. Disponível em: <http://repositories.cdlib.org/ucei/devtech/EDT-006>
- IEA (International Energy Agency). 1998. Benign Energy? the environmental implications of renewables. *IEA*, Paris, França. 128 p.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 1997. *Revised 1996 Intergovernmental Panel on Climate Change Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. IPCC, Bracknell, Reino Unido. 3 vols.
- Keller, M., Jacob, D.J., Wofsy, S.C. & Harriss, R.C. 1991. Effects of tropical deforestation on global and regional atmospheric chemistry. *Climatic Change* 19(1-2): 139-158. <https://doi.org/10.1007/BF00142221>
- Kemenes, A. & Forsberg, B.R. 2008. Potencial ampliado: Gerado nos reservatórios, gás de efeito estufa pode ser aproveitado para produção de energia em termelétricas. *Scientific American Brasil*, Especial Amazônia. no. 2: 18-23.

- Kemenes, A., Forsberg, B.R. & Melack, J.M. 2007. Methane release below a tropical hydroelectric dam. *Geophysical Research Letters* 34: art. L12809. <https://doi.org/10.1029/2007GL029479>. 55
- Kemenes, A., Forsberg, B.R. & Melack, J.M. 2008. As hidrelétricas e o aquecimento global. *Ciência Hoje* 41(145): 20-25.
- Kemenes, A., Forsberg, B.R. & Melack, J.M. 2011. CO₂ emissions from a tropical hydroelectric reservoir (Balbina, Brazil). *Journal of Geophysical Research* 116: art. G03004. <https://doi.org/10.1029/2010JG001465>
- Kemenes, A., Forsberg, B.R. & Melack, J.M. 2016. Downstream emissions of CH₄ and CO₂ from hydroelectric reservoirs (Tucuruí, Samuel, and Curuá-Una) in the Amazon basin. *Inland Waters* 6: 295-302. <https://doi.org/10.5268/IW-6.3.980>
- Kruijt, B., Elbers, J.A., von Randow, C., Araujo, A.C., Oliveira, P.J., Culf, A., Manzi, A.O., Nobre, A.D., Kabat, P. & Moors, E.J. 2004. The robustness of eddy correlation fluxes for Amazon rain forest conditions. *Ecological Applications* 14: S101-S113. <https://doi.org/10.1890/02-6004>
- Latrubesse, E.M., Arima, E.Y., Dunne, T., Park, E., Baker, V.R., d'Horta, F.M., Wight, C., Wittmann, F., Zuanon, J., Baker, P.A., Ribas, C.C., Norgaard, R.B., Filizola, N., Ansar, A., Flyvbjerg, B. & Stevaux, J.C. 2017. Damming the rivers of the Amazon basin. *Nature* 546: 363-369. <https://doi.org/10.1038/nature22333>
- Lees, A.C., Peres, C.A., Fearnside, P.M., Schneider, M. & Zuanon, J.A.S. 2016. Hydropower and the future of Amazonian biodiversity. *Biodiversity and Conservation* 25(3): 451-466. <https://doi.org/10.1007/s10531-016-1072-3>.
- Leino, T. & Lodenius, M. 1995. Human hair mercury levels in Tucuruí area, state of Pará, Brazil. *The Science of the Total Environment* 175: 119-125. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)04908-J](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)04908-J)
- Lima, I.B.T., Ramos, F.M., Bambace, L.A.W. & Rosa, R.R. 2008. Methane emissions from large dams as renewable energy sources: A developing nation perspective. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 13(2): 193-206. <https://doi.org/10.1007/s11027-007-9086-5>
- Lima, I.B.T., Victoria, R.L., Novo, E.M.L.M., Feigl, B.J., Ballester, M.V.R. & Ometto, J.M. 2002. Methane, carbon dioxide and nitrous oxide emissions from two Amazonian reservoirs during high water table. *Verhandlungen International Vereinigung für Limnologie*. 28(1): 438-442. <https://doi.org/10.1080/03680770.2001.11902620>
- Magalhães, S.B. & da Cunha, M.C. (Eds.). 2017. A expulsão de ribeirinhos em Belo Monte: relatório da SBPC. *Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência (SBPC)*, São Paulo. 448 p. <http://portal.sbpnet.org.br/livro/belomonte.pdf>
- Malhi, Y., Wood, D., Baker, T.R., Wright, J., Phillips, O.L., Cochrane, T., Meir, P., Chave, J., Almeida, S., Arroyo, L., Higuchi, N., Killeen, T., Laurance, S.G., Laurance, W.F., Lewis, S.L., Monteagudo, A., Neill, D.A., Vargas, P.N., Pitman, N.C.A., Quesada, C.A., Salomão, R., Silva, J.N.M., Lezama, A.T., Terborgh, J., Martínez, R.V. & Vinceti, B. 2006. The regional variation of aboveground live biomass in old-growth Amazonian forests. *Global Change Biology* 12: 1107-1138. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01120.x>
- Matthews, C.J.D., Joyce, E.M., St. Louis, V.L., Schiff, S.L., Vankiteswaran, J.J., Hall, B.D., Bodaly, R.A. & Beaty, K.G. 2005. Carbon dioxide and methane production in small reservoirs flooding upland boreal forest. *Ecosystems* 8: 267-285. <https://doi.org/10.1007/s10021-005-0005-x>
- Melack, J.M., Hess, L.L., Gastil, M., Forsberg, B.R., Hamilton, S.K., Lima, I.B.T. & Novo, E.M.L.M. 2004. Regionalization of methane emission in the Amazon Basin with microwave 645 remote sensing. *Global Change Biology* 10: 530-544. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00763.x>
- Mendonça R., Kosten, S., Sobek, S., Cardoso, S. J., Figueiredo-Barros, M. P., Estrada, C.H.D. & Roland, F. 2016. Organic carbon burial efficiency in a subtropical hydroelectric reservoir. *Biogeosciences* 13: 3331-3342. <https://doi.org/10.5194/bg-13-3331-2016>
- Monteiro, M.T.F. 2005. *Interações na Dinâmica do Carbono e Nutrientes da Liteira entre a Floresta de Terra Firme e o Igarapé de Drenagem na Amazônia Central*. Masters dissertation in Tropical Forest Science. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA) & Fundação Universidade do Amazonas (FUA), Manaus, Amazonas, 93 p.
- Moomaw, W., Burgherr, P., Heath, G., Lenzen, M., Nyboer, J. & Verbruggen, A. 2012. Annex II: Methodology. p. 973-1000. In: Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Seyboth, K., Matschoss, P., Kadner, S., Zwickel, T., Eickemeier, P., Hansen, G., Schlomer, S. & von Stechow, C. (Eds.). *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido. http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/srren_full_report.pdf
- Mylre, G. & 37 outros. 2013. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. p. 661-740. In: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. & Midgley, P.M. (Eds.). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- Ocko, I.B., Hamburg, S.P., Jacob, D.J., Keith, D.W., Keohane, N.O., Oppenheimer, M., Roy-Mayhew, J.D., Schrag, D.P. & Pacala, S.P. 2017. Unmask temporal trade-offs in climate policy debates: both 20- and 100-year time scales should always be reported. *Science* 356: 492-493. <https://doi.org/10.1126/science.aaj2350>
- Oliveira, P.J. de, Rocha, E.J.P., Fisch, G. da, Kruijt, B. & Ribeiro, J.B.M. 2004. Efeitos de um evento de friagem nas condições meteorológicas na Amazônia: um estudo de caso. *Acta Amazonica* 34(4): 613-619. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672004000400013>
- Ometto, J.P., Cimbleis, A.C.P., Santos, M.A. dos, Rosa, L.P., Abe, D., Tundisi, J.G., Stech, J.L., Barros, N. & Roland, F. 2013. Carbon emission as a function of energy generation

- in hydroelectric reservoirs in Brazilian dry tropical biome. *Energy Policy* 58: 109-116. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.02.041>
- Ometto, J.P., A.D. Nobre, H. Rocha, P. Artaxo & L. Martinelli. 2005. Amazonia and the modern carbon cycle: Lessons learned. *Oecologia* 143(4): 483-500. <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0034-3>
- Ometto, J.P., Pacheco, F.S., Cimbleis, A.C.P., Stech, J.L., Lorenzetti, J.A., Assireu, A., Santos, M.A., Matvienko, B., Rosa, L.P., Galli, C.S., Abe, D.S., Tundisi, J.G., Barros, N.O., Mendonça, R.F. & Roland, F. 2011. Carbon dynamic and emissions in Brazilian hydropower reservoirs. p. 155-188. In: Alcantara, E.H. de (Ed.). *Energy Resources: Development, Distribution, and Exploitation*, Nova Science Publishers, Hauppauge, NY, E.U.A. 241 p.
- Pacca, S. 2007. Impacts from decommissioning of hydroelectric dams: A life cycle perspective. *Climatic Change* 84: 281-294. <https://doi.org/10.1007/s10584-007-9261-4>
- Phillips, O.L., Malhi, Y., Higuchi, N., Laurance, W.F., Núñez, P.V., Vásquez, R.M., Laurance, S.G., Ferreira, L.V., Stern, M., Brown, S. & Grace, J. 1998. Changes in the carbon balance of tropical forests: Evidence from long-term plots. *Science* 282: 439-442. <https://doi.org/10.1126/science.282.5388.439>
- Phillips, O.L., Baker, T.R., Arroyo, L., Higuchi, N., Killeen, T.J., Laurance, W.F., Lewis, S.L., Lloyd, J., Malhi, Y., Monteagudo, A., Neill, D.A., Vargas, P.N., Silva, J.N.M., Terborgh, J., Martínez, R.V., Alexiades, M., Almeida, S., Almeida, S., Brown, S., Chave, J., Comiskey, J.A., Czimczik, C.I., Di Fiore, A., Erwin, T., Kuebler, C., Laurance, S.G., Nascimento, H.E.M., Olivier, J., Palacios, W., Patiño, S., Pitman, N.C.A., Quesada, C.A., Saldias, M., Lezama, A.T. & Vinceti, B. 2004. Pattern and process in Amazon tree turnover, 1976-2001. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 359: 381-407. <https://doi.org/10.1098/rstb.2003.1438>
- Potter, C.S., Davidson, E.A. & Verchot, L.V. 1996. Estimation of global biogeochemical controls and seasonality on soil methane consumption. *Chemosphere* 32: 2219-2246. [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(96\)00119-1](https://doi.org/10.1016/0045-6535(96)00119-1)
- Pueyo, S. & Fearnside, P.M. 2011. Emissões de gases de efeito estufa dos reservatórios de hidrelétricas: Implicações de uma lei de potência. *Oecologia Australis* 15(2): 114-127. <https://doi.org/10.4257/oeco.2011.1502.02>
- Ramaswamy, V. & 40 outros. 2001. Radiative forcing of climate change. p. 349-416 In: Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.G., Noguer, M., Van der Linden, R.J. & Xiaosu, D. (Eds.). *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido. 881 p. <http://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg1/index.php?idp=0>
- Ramos, F.M., Bambace, L.A.W., Lima, I.B.T., Rosa, R.R., Mazzi, E.A. & Fearnside, P.M. 2009. Methane stocks in tropical hydropower reservoirs as a potential energy source: An editorial essay. *Climatic Change* 93(1): 1-13. <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9542-6>
- Rhodes, S., Wazlaw, J., Chaffee, C., Kommonen, F., Apfelbaum, S. & Brown, L. 2000. A Study of the Lake Chelan Hydroelectric Project Based on Life-cycle Stressor-effects Assessment. Final Report. Scientific Certification Systems. Oakland, California, E.U.A. 193 p.
- Ribeiro, F.M. & Silva, G.A. da. 2010. Life-cycle inventory for hydroelectric generation: a Brazilian case study. *Journal of Cleaner Production* 18: 44-54. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2009.09.006>
- Ribeiro, I.L. 2012. *As incursões de ar frio no estado do Amazonas*. Dissertação de mestrado em geografia, Universidade Federal do Amazonas-UFAM, Manaus, Amazonas. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/bitstream/tede/2807/4/IVAN%20LINHARES%20RIBEIRO.pdf>
- Richey, J.E., Melack, J.M., Aufdenkampe, K., Ballester, V.M. & Hess, L.L. 2002. Outgassing from Amazonian rivers and wetlands as a large tropical source of atmospheric CO₂. *Nature* 416: 617-620. <https://doi.org/10.1038/416617a>
- Rosa L.P., Santos, M.A. dos, Matvienko, B., Santos, E.O. dos & Sikar, E. 2004. Greenhouse gases emissions by hydroelectric reservoirs in tropical regions. *Climatic Change* 66(1-2): 9-21. <https://doi.org/10.1023/B%3ACLIM.00000043158.52222.ee>
- Rosa L.P., Santos, M.A. dos, Matvienko, B., Sikar, E. & Santos, E.O. dos. 2006. Scientific errors in the Fearnside comments on greenhouse gas emissions (GHG) from hydroelectric dams and response to his political claiming. *Climatic Change* 75(1-2): 91-102. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-9046-6>
- Rosa, L.P., Sikar, B.M., Santos, M.A. dos & Sikar, E.M. 2002. *Emissões de dióxido de carbono e de metano pelos reservatórios hidrelétricos brasileiros. Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa. Relatórios de Referência*. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE), Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), Brasília, DF. 119 p. http://www.mct.gov.br/clima/comunic_old/pdf/metano_p.pdf
- Saint Louis, V.C., Kelly, C., Duchemin, E., Rudd, J.W.M. & Rosenberg, D.M. 2002. Reservoir surface as sources of greenhouse gases to the atmosphere: a global estimate. *Bioscience* 20: 766-775. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2000\)050\[0766:RSASOG\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2000)050[0766:RSASOG]2.0.CO;2)
- Santos, M.A. dos. 2000. *Inventário de emissões de gases de efeito estufa derivadas de hidrelétricas*. Tese de doutorado em planejamento energético. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 148 p. Disponível em: <http://www.ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/masantos.pdf>
- Santos, M.A. dos, Rosa, L.P., Matvienko, B., Santos, E.O. dos, D'Almeida Rocha, C.H.E., Sikar, E., Silva, M.B. & Ayr Júnior, M.P.B. 2008. Emissões de gases de efeito estufa por reservatórios de hidrelétricas. *Oecologia Brasiliensis* 12(1): 116-129. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2880904>
- Santos M.A. dos, Rosa, L.P., Matvienko, B., Santos, E.O. dos, D'Almeida Rocha, C.H.E., Sikar, E., Silva, M.B. & Bentes Júnior, A.M.P. 2009. Estimate of degassing greenhouse gas

- emissions of the turbined water at tropical hydroelectric reservoirs. *Verhandlungen Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie* 30(Part 6): 834-837. <https://doi.org/10.1080/03680770.2009.11902251>
- Schimel, D. & 75 outros. 1996. Radiative forcing of climate change. p. 65-131 In: Houghton, J.T., Meira Filho, L.G., Callander, B.A., Harris, N., Kattenberg, A. & Maskell, K. (Eds.) *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido. 572 p. http://www.ipcc.ch/ipccreports/sar/wg_I/ipcc_sar_wg_I_full_report.pdf
- Shindell, D.T., Faluvegi, G., Koch, D.M., Schmidt, G.A., Unger, N. & Bauer, S.E. 2009. Improved attribution of climate forcing to emissions. *Science* 326: 716-718. <https://doi.org/10.1126/science.1174760>
- Shindell, D.T. & 24 outros. 2012. Simultaneously mitigating near-term climate change and improving human health and food security. *Science* 335: 183-189. <https://doi.org/10.1126/science.1210026>
- Silva, M. da, Matvienko, B., Santos, M.A. dos, Sikar, E., Rosa, L.P., Santos, E. dos & Rocha, C. 2007. Does methane from hydro-reservoirs fit out from the water upon turbine discharge? *SIL – 2007-XXX Congress of the International Association of Theoretical and Applied Limnology, Montreal, Québec, Canadá*. <http://www.egmmedia.net/sil2007/abstract.php?id=1839>
- Tremblay, A., Varfalvy, L., Roehm, C. & Garneau, M. s/d [C. 2005]. The issue of greenhouse gases from Hydroelectric reservoirs: From boreal to tropical regions. (Manuscrito não publicado de Hydro-Québec) 11 p. http://www.un.org/esa/sustdev/sdissues/energy/op/hydro_tremblaypaper.pdf
- Tucci, C.E.M. 2005. *Modelos hidrológicos*, 2ª. Ed. Editora da UFRGS, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. 678 p.
- UNEP (United Nations Environment Programme) Risø Centre. 2014. Risoe CDM/JI Pipeline Analysis and Database. UNEP Risø Centre, Risø, Dinamarca. <http://www.cdmpipeline.org/>
- Vattenfall. 2008. Vattenfall AB Generation Nordic Certified Environmental Product Declaration EPD® of Electricity from Vattenfall's Nordic Hydropower. (Report No. S-P-00088). Vattenfall, Estocolmo, Suécia. 50 p.
- Verchot, L.V., Davidson, E. A., Cattânio, J.H., Akerman, I.L., Erickson, H.E. & Keller, M. 1999. Land use change and biogeochemical controls of nitrogen oxide emissions from soils in eastern Amazonia. *Global Biogeochemical Cycles* 13(1): 31-46. <https://doi.org/10.1029/1998GB900019>
- Vilela, T. & Reid, J. 2017. Improving hydropower choices via an online and open access tool. *PLoS ONE* 12(6): art. e0179393 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179393>
- Wassmann, R. & Martius, C. 1997. Methane emissions from the Amazon floodplain. p. 137-143 In: Junk, W.J. (Ed.). *The Central Amazon Floodplain – Ecology of a Pulsing System*. Springer-Verlag, Heidelberg, Alemanha. 525 p.
- WCD (World Commission on Dams). 2000. *Dams and Development: A New Framework for Decision Making*. Earthscan, London, Reino Unido. 404 p. <http://pubs.iied.org/pdfs/9126IIED.pdf>
- Zhang, Q., Karney, B., Maclean, H. L. & Feng, J. 2007. Life-cycle inventory of energy use and greenhouse gas emissions for two hydropower projects in China. *Journal of Infrastructure Systems* 13(4): 271-279. https://doi.org/10.1061/_ASCE_1076-0342_2007_13_4_271_