

Reparação de danos ambientais causados por desflorestamento na Amazônia: uma proposta metodológica

*Repair of environmental damages caused by deforestation
in the Amazonia: a methodological proposal*

José Guilherme Roquette*

Resumo: O desenvolvimento na região da Amazônia brasileira tem causado impactos ambientais negativos que transcendem fronteiras, podendo afetar o clima global e até mesmo a produção de alimentos no Brasil. Embora o Estado venha adotando medidas para controlar o desflorestamento na região, propostas que busquem a reparação dos danos ambientais devem ser incentivadas. Neste trabalho foram abordados aspectos sobre os meios de reparação dos danos ambientais irreversíveis causados pelo desflorestamento na Amazônia, desde os aspectos da reparação *in situ* e medidas de compensação ambiental, até o procedimento matemático para estimativa monetária, visando à indenização pecuniária, utilizando-se de critérios técnicos, objetivos e regionais.

Palavras-chave: Floresta amazônica. Restauração florestal. Compensação ambiental. Avaliação econômica de danos ambientais.

Abstract: Development in the Brazilian Amazon there cause negative environmental impacts that transcend boundaries, which can affect global climate and even food production in Brazil. While the government is taking steps to control deforestation in the region, proposals for repair of the environmental damage should be encouraged. In this work, we dealt with the

* Graduado em Engenharia Florestal (2011) e Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais e Ambientais (2014), ambos cursados na Universidade Federal de Mato Grosso. Especialista em Economia e Meio Ambiente pela Universidade Federal do Paraná (2016). Atualmente é doutorando do Programa de Pós-graduação em Física Ambiental da UFMT e atua como Analista/Engenheiro Florestal no Ministério Público de Mato Grosso. Possui experiência em estudos relacionados ao crescimento e produção florestal, avaliação de impactos ambientais, licenciamento de atividades potencialmente e/ou causadoras de significativos impactos ambientais, sensoriamento remoto e geoprocessamento para monitoramento da vegetação, avaliação econômica de recursos naturais e recuperação de áreas degradadas/alteradas.

forms of repair the irreversible environmental damages caused by deforestation in the Amazon, from the aspects of *in situ* repair and environmental compensation measures, to the mathematical procedure for monetary estimative aiming at pecuniary indemnity, using criteria technical, objective and regional.

Keyword: Amazon forest. Forest restoration. Environmental compensation. Economic evaluation of environmental damage.

1 Introdução

Constituindo o maior bioma em extensão do mundo, a Amazônia possui grandes riquezas naturais, desde recursos florísticos e faunísticos, passando por depósitos minerais, até a imensidão de seus rios e lagos, além de abrigar grande diversidade de povos indígenas, quilombolas, comunidades tradicionais (seringueiros, castanheiros, pequenos pescadores, quebradeiras de coco babaçu, ribeirinhos, entre outros) e outros habitantes que chegaram à Região já a partir da década de 1960.¹

A região da Amazônia brasileira ocupa uma área igual a 4,2 milhões de Km² (49,29% do Brasil), abrangendo a totalidade de cinco unidades da Federação (Acre, Amapá, Amazonas, Pará e Roraima), grande parte do estado de Rondônia (98,8%), mais da metade do estado de Mato Grosso (54%), além de parte dos estados do Maranhão (34%) e Tocantins (9%).²

A partir da década de 80, intensificou-se a sua ocupação, em especial na porção meridional, com incentivos dados pelo Governo Federal para o desenvolvimento da Região.

Assim, a Floresta Amazônica passou a dar lugar para usos alternativos do solo que dependem, de modo geral, da remoção da vegetação nativa para ser substituída por pastagens e culturas agrícolas, embora outras atividades também vêm sendo instaladas na Região.

Atualmente, a pressão na região Amazônica conhecida como Arco do Desmatamento ainda permanece implicando em dados de desflorestamentos alarmantes, na maioria das vezes, executados à revelia dos instrumentos de comando e controle do Estado, causando prejuízos

¹ VERÍSSIMO, T. C.; PEREIRA, J. *A floresta habitada: história da ocupação humana na Amazônia*. Belém-PA: Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia (IMAZON), 2014.

² IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Mapa de Biomas do Brasil*. 2004. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/21052004biomashtml.shtm>. Acesso em: 24 jan. 2017.

incomensuráveis ao meio ambiente, sem que haja a devida reparação dos danos ambientais causados.

Diante dessa situação diversos atores vêm buscando medidas para reparar as perdas dos bens e serviços ambientais na Região, em especial os Ministérios Públicos brasileiros, tendo em vista possuírem a legitimidade para propor ações de responsabilidade civil e criminal, em face daqueles que comentem danos ao meio ambiente.

Assim sendo, esse trabalho foi conduzido no sentido de proporcionar conhecimento, em linguagem simples e sucinta, sobre os principais aspectos dos impactos ambientais negativos causados pelo desflorestamento na Amazônia e as formas de reparação dos danos ambientais, desde a restauração *in situ*, formas de compensação e uma proposta metodológica para o cálculo da indenização pecuniária.

2 Uso, ocupação e monitoramento da Amazônia

O uso e ocupação da Amazônia brasileira foi ampliado substancialmente a partir das décadas de 1980 e 1990 em razão do *boom* madeireiro na Região, atribuído a três fatores principais: [i] a escassez de madeira nas florestas do Sul e Sudeste; [ii] a abundância de florestas com pouca restrição para a extração predatória; e [iii] a localização estratégica dos polos madeireiros em relação aos mercados internos e externos.³

Nas décadas de 1990 e metade de 2000, a grande escala alcançada pelo desflorestamento da Amazônia brasileira alarmou a opinião pública mundial, que ocorreu, essencialmente, ao longo de um arco envolvendo as porções leste e sul da região Amazônica, conhecida como Arco do Desmatamento (ou Arco do Fogo, ou Arco do Boi ou, ainda, Arco do Desflorestamento).⁴ Essa região é particularmente importante por pelo menos três razões: [i] ela detém a mais longa estação seca na Amazônia; [ii] apresenta as maiores taxas de desflorestamento da Amazônia; e [iii]

³ VERÍSSIMO, T. C.; PEREIRA, J. *A floresta habitada: história da ocupação humana na Amazônia*. Belém-PA: Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia (IMAZON), 2014.

⁴ MIRAGAYA, J. F. G. *Transformações no Arco do Desmatamento: a expansão pecuária bovina na Amazônia, pressões sobre o ambiente e o papel das políticas públicas na contenção do desmatamento (1990-2010)*. 2013. 245p. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável) – Universidade de Brasília, 2013.

sua vegetação é particularmente sensível a alterações na duração do período de estiagem.⁵

O desflorestamento da Floresta Amazônica é, conseqüentemente, conduzido por atores e forças que variam entre partes diferentes da Região, assim como variam ao longo do tempo. Todavia, os grandes fazendeiros, em geral, respondem pela maior parte da área desflorestada, ainda que os pequenos agricultores, quando concentrados, possam também atuar como “grandes” desflorestadores.⁶

Além dos impactos causados pela pecuária e agricultura na Amazônia, existem outras ameaças crescentes, tais como a intensa exploração madeireira, os projetos de grande escala de transporte e infraestrutura energética e, em uma menor escala, muito embora nada desprezível, a exploração de reservas minerais.⁷ Todos esses impactos ambientais acabam sendo ainda mais potencializados em tempos de “Mudanças Climáticas”.

É sabido que, um dos principais esforços do governo brasileiro para conter o desflorestamento na Amazônia diz respeito ao programa Nossa Natureza, implantado no ano de 1989. Desde então, uma série de ações repressivas e punitivas têm sido relativamente ineficazes, demonstrando que os índices de desflorestamento na Região parecem aumentar ou diminuir independentemente dos programas de monitoramento e controle implementados.⁸

Atualmente, para a Amazônia brasileira existem pelo menos cinco sistemas de monitoramento via satélite em operação desenvolvidos pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE): PRODES, DETER, DEGRAD, TerraClass e Queimadas. Em adição, são realizadas, dentre outras aferições, estimativas de emissões de gases de efeito estufa para Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas (LULUCF – do inglês

⁵ DEBORTOLI, N. S. *O regime de chuvas na Amazônia Meridional e sua relação com o desmatamento*. 2013. 217p. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável) – Universidade de Brasília/Université Rennes, 2013.

⁶ FEARNside, P. M. Desmatamento na Amazônia: dinâmica, impactos e controle. *Acta Amazônica*, v. 36, n.3, p.395-400, 2006.

⁷ WWF. WORLD WILDLIFE FUND. *Amazônia Viva! uma década de descobertas, 1999-2009*. Brasília, 2010.

⁸ FEARNside, P. M. Desmatamento na Amazônia brasileira: história, índices e conseqüências. *Megadiversidade*, v.1, n. 1, 2005.

Land Use, Land-use Change and Forestry), que é parte integrante do Inventário Nacional de Gases de Efeito Estufa e da Comunicação Nacional do Brasil junto à UNFCCC (*United Nations Framework Convention on Climate Change*), coordenado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI).⁹

Tabela 1 – Taxas anuais de desflorestamento na Amazônia brasileira no período de 2004 a 2016, em km²·ano⁻¹, identificados pelo projeto PRODES¹⁰

Ano\Estados	AC	AM	AP	MA	MT	PA	RO	RR	TO	AMZ LEGAL
2004	728	1.232	46	755	11.814	8.870	3.858	311	158	27.772
2005	592	775	33	922	7.145	5.899	3.244	133	271	19.014
2006	398	788	30	674	4.333	5.659	2.049	231	124	14.286
2007	184	610	39	631	2.678	5.526	1.611	309	63	11.651
2008	254	604	100	1.271	3.258	5.607	1.136	574	107	12.911
2009	167	405	70	828	1.049	4.281	482	121	61	7.464
2010	259	595	53	712	871	3.770	435	256	49	7.000
2011	280	502	66	396	1.120	3.008	865	141	40	6.418
2012	305	523	27	269	757	1.741	773	124	52	4.571
2013	221	583	23	403	1.139	2.346	932	170	74	5.891
2014	309	500	31	257	1.075	1.887	684	219	50	5.012
2015	264	712	25	209	1.601	2.153	1.030	156	57	6.207
2016	389	1.099	24	261	1.508	3.025	1.394	209	80	7.989
Var. 2016-2004	-47%	-11%	-48%	-65%	-87%	-66%	-64%	-33%	-49%	-71%

⁹ MMA. Ministério do Meio Ambiente. *Estratégia do Programa Nacional de Monitoramento Ambiental dos Biomas Brasileiros*. Brasília: MMA, 2016.

¹⁰ INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. *Projeto PRODES: monitoramento da Floresta Amazônica por satélite*. Sem data. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/prodes/index.php>. Acesso em: 24 jan. 2017.

Embora existam diversos sistemas de monitoramento do desflorestamento na Amazônia, o elemento fundamental para reduzir a velocidade do desflorestamento é a vontade política de se promover semelhante redução, enfatizando que o pagamento por serviços ambientais poderia contribuir incisiva e decisivamente para a promoção desta motivação política.¹¹

2 Impactos negativos do desflorestamento da Amazônia

O desflorestamento da Floresta Amazônica, quer aqueles que motivados pela agricultura, pecuária, extração seletiva de madeira ou quer aqueles associados a outras finalidades causam impactos ambientais classificados tanto como “intensivos” quanto “extensivos”, sendo que seus efeitos levam a alterações na composição e estrutura das populações de espécies da flora e fauna, bem como nas propriedades do ecossistema.¹²

Os impactos ambientais causados pelo desflorestamento, por exemplo, incluem ainda a perda de oportunidades para o uso sustentável da floresta, a partir da exploração racional de produtos tanto madeireiros quanto não madeireiros.¹³ Os produtos das florestas tropicais podem gerar um mercado de benefícios substanciais se seus recursos forem explorados e manejados adequadamente.¹⁴

Outros benefícios perdidos devido ao desflorestamento da Amazônia, além do sequestro de carbono tanto no solo quanto nas florestas, são os serviços ambientais da floresta, como a variabilidade genética, que tem valor científico inestimado, além da disponibilidade de nutrientes, capacidade de retenção de água, aumento da compactação do solo, dentre outros.^{15_16}

¹¹ FEARNSIDE, P. M. Desmatamento na Amazônia: dinâmica, impactos e controle. *Acta Amazônica*, v. 36, n. 3, p. 395-400, 2006.

¹² CHAZDON, R. L. Regeneração de florestas tropicais. *Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Cienc. Nat.*, v. 7, n. 3, p. 195-218, 2012.

¹³ FEARNSIDE, P. M. Desmatamento na Amazônia: dinâmica, impactos e controle. *Acta Amazônica*, v. 36 n. 3, p.395-400, 2006.

¹⁴ PETERS, C. M.; GENTRY, A. H.; MENDELSON, R. O. Valuation of an Amazonian rainforest. *Nature*, v. 339, p. 655-656, 1989.

¹⁵ PETERS, C. M.; GENTRY, A. H.; MENDELSON, R. O. Valuation of an Amazonian rainforest. *Nature*, v. 339, p. 655-656, 1989.

¹⁶ CHAZDON, R. L.; LETCHER, S. G.; VAN BREUGEL, M.; MARTÍNEZ-RAMOS, M.; BONGERS, F.; FINEGAN, B. Rates of change in tree communities of secondary Neotropical forests following major disturbances. *Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences*, v. 362, p. 273-289, 2007.

A Floresta Amazônica possui uma relação de retroalimentação com o clima, cuja mudança representa uma séria ameaça à sua existência e para continuação de seus serviços ambientais.¹⁷

Dentro desse contexto, o aumento de temperaturas e o decréscimo nos níveis de umidade nos climas locais (microclimas) e regionais (mesoclimas) podem ocorrer devido às mudanças do uso do solo após a remoção da cobertura florestal na Amazônia. Isso acontece em virtude do aumento do escoamento pluvial superficial em áreas desflorestadas, que inibe o processo de percolação, provocando o assoreamento e perda de minerais, que ao serem velozmente direcionados para corpos hídricos alteram os seus níveis de turbidez e pH, contribuindo para a poluição de bacias a jusante e prejudicando a segurança hídrica.¹⁸

Caso o grau de desflorestamento se expanda substancialmente ainda mais, acredita-se que a redução da evapotranspiração conduzirá a uma menor precipitação durante o período seco na Amazônia, e isso poderá reduzir a precipitação média no Centro-Oeste, Centro-Sul e Sul do Brasil.¹⁹

Atividades como a agricultura de pequena escala podem ser ameaçadas pela escassez de chuva, reduzindo a capacidade do País em suportar uma crise alimentar (segurança alimentar, como se não bastasse a segurança ambiental), uma vez que a atividade é responsável por cerca de 70% da produção de alimentos.²⁰

Paradoxalmente, as mesmas regiões desflorestadas na Amazônia são responsáveis atualmente por grande parte dos grãos e carnes produzidos no Brasil, que dependem do abastecimento de água. Portanto, é necessário o entendimento que a fragmentação da floresta altera o ciclo hidrológico e pode comprometer a capacidade produtiva, levando a um aumento

¹⁷ PETERS, C. M.; GENTRY, A. H.; MENDELSON, R. O. Valuation of an Amazonian rainforest. *Nature*, v. 339, p. 655-656, 1989.

¹⁸ DEBORTOLI, N. S. *O regime de chuvas na Amazônia Meridional e sua relação com o desmatamento*. 2013. 217p. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável) – Universidade de Brasília / Université Rennes, 2013.

¹⁹ LEAN, J.; BUNTON, C. B.; NOBRE, C. A.; ROWNTREE, P. R. The simulated impact of Amazonian deforestation on climate using measured ABRACOS vegetation characteristics. In: GASH, J. H. C.; NOBRE, C. A.; ROBERTS, J. M.; VICTORIA, R. L. (Eds): *Amazonian deforestation and climate*. Wiley, Chichester, 1996. p. 549-576.

²⁰ DEBORTOLI, N. S. *O regime de chuvas na Amazônia Meridional e sua relação com o desmatamento*. 201. 217p. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável) – Universidade de Brasília / Université Rennes, 2013.

escalar dos preços dos alimentos e prejuízos às atividades de subsistência locais e tradições extrativistas, pesqueiras e indígenas.²¹

Todos esses impactos ambientais, conforme visto até aqui, estão relacionados, evidentemente, com as decisões e políticas públicas relacionadas ao uso da terra e à cobertura florestal na região Amazônica.

O desflorestamento na Amazônia também impacta o clima com a emissão de gases do efeito estufa, devido à diminuição da produtividade florestal (florestas e solos) e o aumento das taxas de mortalidade decorrente do aumento da temperatura e da severidade das secas (principalmente causadas pelo fenômeno El Niño), bem como pelas emissões decorrentes da própria vegetação durante o processo de desflorestamento.^{22 23 24}

3 Reparação de danos ambientais na Amazônia

Dada a importância dos recursos naturais para a perpetuação da vida na Terra, a Constituição Federal do Brasil, de 1988, passou a dispor, em seu art. 225, que “todos têm direito a um meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações”.²⁵

A necessidade de proteção ao meio ambiente acabou sendo internalizada nas três esferas (civil, administrativa e criminal) para mediar as relações entre a sociedade brasileira e o meio ambiente, havendo inclusive normatização legal quanto à ruptura desta convivência harmoniosa, com a promulgação da Lei n. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, conhecida como a Lei dos Crimes Ambientais.²⁶

²¹ DEBORTOLI, N. S. *O regime de chuvas na Amazônia Meridional e sua relação com o desmatamento*. 2013. 217p. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável) – Universidade de Brasília / Université Rennes, 2013.

²² FEARNside, P. M. Greenhouse gases from deforestation in Brazilian Amazonia: net committed emissions. *Climate Change*, v. 35, 3, p. 321-360, 1997.

²³ HOUGHTON, R. A.; SKOLE, D. L.; NOBRE, C. A.; HACKLER, J. L.; LAWRENCE, K. T.; CHOMENTOWSKI, W. H. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. *Nature*, n. 403, p. 301-304, 2000.

²⁴ SOUZA, C. R.; AZEVEDO, C. P.; ROSSI, L. M. B.; SILVA, K. E.; SANTOS, J.; HIGUCHI, N. Dinâmica e estoque de carbono em floresta primária na região de Manaus/AM. *Acta Amazônica*, v. 42, n. 4, p. 501-506, 2012.

²⁵ BRASIL. Constituição (1988). *Constituição da República Federativa do Brasil*. Brasília, DF: Senado Federal; Centro Gráfico, 1988

²⁶ BRASIL. Lei n. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras

Considerando esse contexto, o responsável por causar danos ao meio ambiente tem a obrigação de repará-los integralmente, conforme estabelecido na Lei n. 6.938, de 31 de agosto de 1981 (Política Nacional do Meio Ambiente). Do ponto de vista da responsabilização cível e criminal, os Ministérios Públicos da União e dos Estados são as Instituições do Poder Público que possuem a legitimidade para propor ação de responsabilidade pelos danos causados ao meio ambiente.²⁷

A reparação integral dos danos ambientais compreende três modalidades: a reparação *in situ*, a reparação *ex situ* (compensação) e a indenização pecuniária. A reparação *in situ* trata da recuperação ou restauração dos danos ambientais no local de sua ocorrência, porém, nos casos em que for demonstrada a impossibilidade técnica, quanto à parcela a ser reparada, pode-se compensar o dano ambiental pela reconstituição ou melhora de outro ambiente degradado ou alterado, desde que possua características ecológicas equivalentes (reparação *ex situ*). Todavia, nos casos em que for demonstrada a impossibilidade de reparação *in situ* ou, posteriormente, a impossibilidade de reparação *ex situ*, deverá ser realizada a precificação do dano ambiental, ou seja, a estimativa do valor monetário correspondente ao ressarcimento indenizatório à sociedade pelos danos ambientais causados.²⁸

Para fins da reparação do equilíbrio ecológico, devido às condições e leis da natureza que implicitamente demandam um lapso temporal, o cálculo da indenização pode e deve compreender também, o período entre a ocorrência do dano e a sua integral reparação, o chamado lucro cessante.²⁹

providências. Brasília-DF, 1998. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9605.htm. Acesso em: 19 jan. 2017.

²⁷ BRASIL. Lei n. 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus afins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília-DF, 1981. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6938.htm. Acesso em: 19 jan. 2017.

²⁸ FREITAS, C. G. A. Valoração do dano ambiental: algumas premissas. In: MPMG. MINISTÉRIO PÚBLICO DE MINAS GERAIS. A valoração de serviços e danos ambientais. *Revista do Ministério Público do Estado de Minas Gerais*, Edição Especial Meio Ambiente, 2011.

²⁹ FREITAS, C. G. A. Valoração do dano ambiental: algumas premissas. In: MPMG. MINISTÉRIO PÚBLICO DE MINAS GERAIS. A valoração de serviços e danos ambientais. *Revista do Ministério Público do Estado de Minas Gerais*, Edição Especial Meio Ambiente, 2011.

Na atualidade não há dúvidas quanto à reparação efetiva do dano ambiental, mediante medidas que garantam a reabilitação ecológica e funcional do ambiente degradado, ou de local próximo à sua ocorrência. Porém, quando a reparação se demonstra inviável, o Direito deve se valer de metodologias que estabeleçam um valor monetário para indenização pelo dano ambiental causado.³⁰

A partir desses entendimentos, não existe razão para que se proceda a indenização pecuniária, sendo os danos ambientais reversíveis, no entanto, a restauração da Floresta Amazônica requer um horizonte temporal para o retorno ao *status quo ante*, período em que seus bens e serviços ambientais (principalmente recursos madeireiros e não madeireiros e serviços ecossistêmicos) não estarão disponíveis, constituindo-se em danos irreversíveis. Assim, portanto, esses danos devem ser reparados por meio de compensação e/ou indenização pecuniária.

4 Restauração da Amazônia – reparação *in situ*

Embora o termo “recuperação” seja geralmente aplicado indistintamente para todas as situações de alteração antrópica do meio ambiente eventualmente previsíveis, há diferentes conceitos para se tratar do objetivo das medidas ambientais adotadas para reparação *in situ*. Nesse sentido, o Decreto 8.972/2017 (Política Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa) define a “Restauração Ecológica” como a “intervenção humana intencional em ecossistemas alterados ou degradados para desencadear, facilitar ou acelerar o processo natural de sucessão ecológica”.³¹

Para restauração florestal têm sido estudadas técnicas que visam acelerar o processo de sucessão ecológica, incrementando o fluxo da natureza na área.³² Essas técnicas, normalmente mais baratas e naturais do que o plantio artificial usualmente empregado, envolvem o próprio

³⁰ STEIGLEDER, A. M. Valoração de danos ambientais irreversíveis. In: MPMG. MINISTÉRIO PÚBLICO DE MINAS GERAIS. *A valoração de serviços e danos ambientais*. Revista do Ministério Público do Estado de Minas Gerais, Edição Especial Meio Ambiente, 2011.

³¹ BRASIL. Decreto n. 8.972, de 23 de janeiro de 2017. *Institui a Política Nacional de Recuperação da Vegetação nativa*. Brasília-DF, 2017. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/Decreto/D8972.htm. Acesso em: 6 fev. 2017.

ambiente do entorno ainda preservado/conservado, do qual são extraídos os materiais e insumos utilizados para reparação do dano ambiental.

Essas medidas para restauração ambiental procuram aumentar o fluxo da biodiversidade atraindo a fauna local, por meio da formação de núcleos de atratividade (nucleação), como a instalação de poleiros artificiais, transposição de galhadas e serapilheira de áreas preservadas/conservadas no entorno, e implantação de módulos de plantios de espécies atrativas à fauna, visando maior dispersão de frutos e sementes pela área. Além disso, também contam com a colonização de espécies vegetais, transpondo-se para o ambiente solos juntamente com o banco de sementes e plântulas oriundas da regeneração natural de outras áreas.

A recomendação técnica do plantio de mudas de espécies nativas (regeneração artificial) apresenta, no geral, custos relativamente elevados em relação às técnicas de nucleação, porém possui a vantagem de acelerar o recobrimento do solo e a possibilidade de implantação de espécies de grupos ecológicos que surgiriam após alguns anos de iniciado o processo sucessional, como espécies secundárias tardias e clímax, além da escolha de espécies com interesse comercial para uso futuro.

A completa restauração ambiental pode levar anos. Entretanto, nos anos iniciais deve ser dada atenção especial, visto ser o período de maior suscetibilidade ao insucesso das medidas adotadas na área. Durante esse período, deve-se avaliar periodicamente o ambiente, verificando-se o desenvolvimento das mudas plantadas, a condição da regeneração natural, a presença de pragas, doenças e espécies invasoras indesejadas, a presença de fauna no local, a ausência de agentes causadores de alterações/degradações, dentre outros indicadores ambientais.

Após a atividade de desflorestamento da floresta primária (floresta intocada ou sem significativas alterações de origem antrópica) e posterior isolamento da área, seguido do abandono ou adoção de técnicas para restauração florestal, inicia-se o processo de sucessão ecológica, ou seja, a modificação progressiva na proporção, composição e estrutura dos indivíduos de uma comunidade vegetal, até que esta atinja um estado de equilíbrio dinâmico com o ambiente, formando uma floresta dita secundária.

O processo sucessional, que se inicia após os impactos causados nas florestas, podem variar amplamente conforme a natureza do distúrbio, a

proximidade da área com florestas primárias e a disponibilidade da fauna para dispersão de frutos e sementes pela área.³³

Durante esse processo, a floresta segue uma progressão de estágios de enriquecimento gradual de espécies e aumento da complexidade estrutural e funcional do ecossistema. Esses estágios são influenciados pela escala, frequência e intensidade dos distúrbios e usos anteriores da terra, textura do solo e disponibilidade de nutrientes, natureza e presença de vegetação remanescente no entorno, além da condição que a área estará submetida durante o processo de restauração.^{34 35 36}

A sucessão ecológica em uma área desflorestada ou que tenha sofrido algum distúrbio que tenha implicado na abertura de clareiras, inicia-se com o domínio intenso de espécies invasoras, herbáceas e lenhosas pioneiras (que apresentam rápido crescimento, desenvolvimento em pleno sol e alta dispersão), que são responsáveis por promoverem uma rápida cobertura do solo devido ao aumento da densidade de indivíduos na área.³⁷

³⁸

Estudos demonstram que as espécies pioneiras apresentam elevada mortalidade após 10 a 20 anos, sendo substituídas gradualmente por espécies típicas de estágios mais avançados, que são tolerantes à sombra (umbrófilas) e possuem crescimento mais lento, suscitando em transições na dominância de diferentes formas de crescimento vegetal e tipos funcionais.³⁹

³² REIS, A.; BECHARA, F. C.; TRES, D. R.; TRENTIN, B. E. Nucleação: concepção biocêntrica para restauração ecológica. *Ciência Florestal*, Santa Maria-RS, v. 24, n. 2, p. 509-519, 2014.

³³ CHAZDON, R. L.; LETCHER, S. G.; VAN BREUGEL, M.; MARTÍNEZ-RAMOS, M.; BONGERS, F.; FINEGAN, B. Rates of change in tree communities of secondary Neotropical forests following major disturbances. *Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences*, v. 362, p. 273-289, 2007.

³⁴ CHAZDON, R. L. Tropical forest recovery: legacies of human impact and natural disturbances. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, v.6(1-2), p.51-71, 2003.

³⁵ CHAZDON, R. L. Chance and determinism in tropical forest succession. In: CARSON, W.; SCHNITZER, S. A. (ed.). *Tropical forest community ecology*, Wiley-Blackwell Publishing, Oxford, p.384-408, 2008.

³⁶ CHAZDON, R. L. Regeneração de florestas tropicais. *Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Cienc. Nat.*, v.7, n.3, p.195-218, 2012.

³⁷ ARAÚJO, M. M. et al. Padrão e processos sucessionais em florestas secundárias de diferentes idades na Amazônia Oriental. *Ciência Florestal*, v.15, n.4, p.343-357, 2005.

³⁸ CHAZDON, R. L. Regeneração de florestas tropicais. *Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Cienc. Nat.*, v.7, n.3, p.195-218, 2012.

³⁹ ARAÚJO, M. M. et al. Padrão e processos sucessionais em florestas secundárias de diferentes idades na Amazônia Oriental. *Ciência Florestal*, v.15, n.4, p.343-357, 2005.

O recrutamento de novas espécies vegetais pode se originar do banco de sementes do solo, da dispersão de sementes provenientes de áreas adjacentes, do rebrotamento de troncos danificados ou das mudas e plântulas que conseguiram sobreviver após o distúrbio. Dessa forma, com o tempo as espécies de plantas e animais vão assumindo características de florestas primárias próximas. Essas alterações na composição de espécies são ocasionadas por interações complexas entre fatores locais, histórico do sítio, dinâmica da paisagem e fatores regionais.⁴⁰

O tempo necessário para recuperação da biomassa e estoques de carbono em florestas secundárias tropicais diferem acentuadamente em relação ao tempo necessário para retorno de sua biodiversidade. Estudos demonstram que o retorno dos estoques de carbono pode levar aproximadamente 80 anos após a perturbação da floresta primária, a biodiversidade faunística cerca de 150 anos e a biodiversidade florística mais de 100 anos.⁴¹

Há estudos que relataram outros intervalos de tempo para o retorno da floresta à condição de primária, concluindo que florestas primárias podem ser restabelecidas dentro de 100 a 200 anos, dependendo da longevidade de cada espécie de árvore colonizadora na fase inicial⁴² e intervalos temporais distintos para diferentes estágios sucessionais (Tabela 2).

⁴⁰ CHAZDON, R. L. Regeneração de florestas tropicais. *Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Cienc. Nat.*, v.7, n.3, p.195-218, 2012.

⁴¹ MARTIN, P. A.; NEWTON, A. C.; BULLOCK, J. M. Carbon pools recover more quickly than plant biodiversity in tropical secondary forests. *Proc R Soc B*, n.280, 2013.

⁴² WIRTH, C.; MESSIER, C.; BERGERON, Y.; FRANK, D.; FANKHÄNEL, A. Old-growth forest definitions: a pragmatic view. In: WIRTH, C.; GLEIXNER, G.; HEIMANN, M. (ed.). *Old-growth forests: function, fate and value*, v.207, p.11-33, Springer, New York, 2009.

Tabela 2 – Processo de dinâmica sucessional associados ao estágio sucessional de uma floresta tropical após distúrbio⁴³

Tempo decorrido desde o distúrbio / Estágio sucessional			
0-15 anos	15-50 anos	30-200 anos	>200 anos
Início do povoamento	Exclusão de espécies intolerantes à sombra	Reinício do sub-bosque	Floresta madura
Germinação de sementes em banco de sementes do solo; Rebrotamento de árvores remanescentes; Colonização de árvores pioneiras longevas e de vida curta; Crescimento rápido em altura e diâmetro de espécies lenhosas; Alta mortalidade de espécies herbáceas; Altas taxas de predação de sementes; Estabelecimento de mudas de espécies ombrófilas.	Fechamento do dossel; Alta mortalidade de lianas e arbustos; Recrutamento de mudas, plântulas e árvores ombrófilas; Supressão do crescimento de espécies intolerantes à sombra no sub-bosque e no subdossel; Alta mortalidade de árvores pioneiras de vida curta; Dominância de árvores pioneiras longevas; Desenvolvimento do dossel e de estratos de árvores do sub-bosque; Estabelecimento de mudas de espécies ombrófilas.	Mortalidade das espécies de dossel; Formação de pequenas clareiras no dossel; Recrutamento no dossel e maturidade reprodutiva de espécies colonizadoras precoces; Aumento da heterogeneidade em disponibilidade de luz no sub-bosque; Fixação de mudas e plântulas de espécies ombrófilas; Recrutamento de árvores de espécies ombrófilas de estabelecimento precoce.	Mortalidade da coorte pioneira no dossel; Variação no tamanho das clareiras no dossel; Recrutamento de espécies de dossel e emergentes ombrófilas e que necessitam de clareiras; Heterogeneidade espacial em biomassa e microtopografia; Acúmulo de detritos lenhosos; Diversificação máxima de árvores e epífitas.

Existem três critérios básicos que podem definir o estágio sucessional de uma floresta, que variam a diferentes taxas e com a escala espacial e temporal de medida, sendo eles: a biomassa total acima do solo (biomassa aérea), a estrutura de idade ou tamanho da comunidade de árvores e a composição de espécies.⁴⁴

Estruturalmente, é possível diferenciar claramente os estágios sucessionais, porém, com relação à composição e à diversidade de espécies, são necessários mais estudos para descobrir o tempo que a floresta leva para recuperar as suas características primárias.⁴⁵

⁴³ CHAZDON, R. L. Regeneração de florestas tropicais. *Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Cienc. Nat.*, v.7, n.3, p.195-218, 2012.

⁴⁴ CHAZDON, R. L. Regeneração de florestas tropicais. *Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Cienc. Nat.*, v.7, n.3, p.195-218, 2012.

⁴⁵ SILVA, C. V. J.; SANTOS, J. R.; GALVÃO, L. S.; SILVA, R. D.; MOURA, Y. M. Floristic and structure of Amazonian primary forest and a chronosequence of secondary succession. *Acta Amazonica*, v. 46(2), p.133-150, 2016.

Em termos de biomassa florestal, existem variações perceptíveis nos incrementos ao longo dos anos com as alterações dos estágios sucessionais. Essa variação é explicada pelo fato de o crescimento da floresta ocorrer até atingir um estado de automanutenção, com maior estabilidade quanto à mortalidade e ingresso de novos indivíduos,⁴⁶ mantendo assim, valores mais estáveis de biomassa quando madura. Importante ressaltar, que a quantidade de biomassa na região da Floresta Amazônica varia de acordo com a escala temporal e espacial da avaliação.⁴⁷

Analogamente à biomassa, o estoque de carbono na floresta, assim como as taxas de incrementos de diâmetro a altura do peito (DAP) e volume de madeira nas árvores, podem ser utilizadas para avaliar o estágio sucessional de uma floresta secundária, tendo em vista a alta correlação entre as variáveis.

Embora ocorram pequenas variações, os teores de carbono na biomassa seca são relativamente estáveis, variando entre 39 e 51%, com média igual a 45%.⁴⁸ No entanto, de modo geral, muitos trabalhos utilizam um valor de 50% como a proporção de carbono na biomassa seca.⁴⁹

Dessa forma, podemos compreender que estudos sobre a biomassa presente em ecossistemas florestais são de fato importantes para avaliar a capacidade de armazenamento e potencial de emissão de carbono para atmosfera mediante sua supressão, isto considerando que diferentes tipologias de vegetação possuem características diferenciadas em relação à quantidade de biomassa e aos padrões de sua distribuição.

⁴⁶ GOMIDE, G. L. A. *Estrutura e dinâmica de crescimento de florestas tropicais primária e secundária no estado do Amapá*. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Universidade Federal do Paraná, 191p., 1997.

⁴⁷ PHILLIPS, O. L. *et al.* Changes in the carbon balance of tropical forests: evidence from long-term plot. *Science*, v. 282, n. 5388, p. 439-442, 1998.

⁴⁸ WATZLAWICK, L. F.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. A.; BALBINOT, R. Quantificação de biomassa total e carbono orgânico em povoamentos de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze no sul do estado do Paraná, Brasil. *Revista Acadêmica: ciências agrárias e ambientais*, v.1, n.2, p.63-68, 2003.

⁴⁹ DALLAGNOL, F. S.; MOGNON, F.; SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D. Teores de carbono de cinco espécies florestais e seus compartimentos. *Floresta e Ambiente*, v.18(4), p.410-416, 2011.

Além da biomassa e carbono, estudos demonstram que as taxas de crescimento em diâmetro das árvores também são altamente variáveis, tanto para um indivíduo como entre indivíduos, e se relacionam com as condições de crescimento a que estão submetidos na floresta, assim como com a espécie e a fase de crescimento em que se encontram.^{50 51 52 53 54}

Com relação ao volume de madeira, a Resolução Conama nº 411, de 06 de maio de 2009, estabelece que o incremento médio anual em uma floresta é de $0,86 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$,⁵⁵ porém estudos demonstram que essa taxa pode variar bastante na Amazônia, principalmente após algum tipo de degradação.^{56 57}

Embora estudos demonstrem incrementos periódicos superiores ao estabelecido em resolução do Conama,^{58 59} deve-se considerar o

⁵⁰ GOMIDE, G. L. A. *Estrutura e dinâmica de crescimento de florestas tropicais primária e secundária no estado do Amapá*. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Universidade Federal do Paraná, 191p., 1997.

⁵¹ BRIENEN, R. J. W.; ZUIDEMA, P. A. Lifetime growth patterns and ages of Bolivian rain forest trees obtained by tree ring analysis. *Journal of Ecology*, n.94, p.481-493, 2006a.

⁵² BRIENEN, R. J. W.; ZUIDEMA, P. A. The use of tree rings in tropical forest management: projecting timber yields of four Bolivian tree species. *Forest Ecology and Management*, v.226, p.256-267, 2006b.

⁵³ OLIVEIRA, M. V. N.; BRAZ, E. M. Estudo da dinâmica da floresta manejada no projeto de manejo florestal comunitário do PC Pedro Peixoto na Amazônia Ocidental. *Acta Amazonica*, v.36(2), p.177-182, 2006.

⁵⁴ OURIQUE, L. K. *et al.* Relação entre produção de serapilheira e incremento em diâmetro de uma floresta madura na Amazônia Central. In: LIMA, A. J. N.; DURGANTE, F. M.; CAMPOS, M. A. A.; SANTOS, J.; ISHIZUKA, M.; HIGUCHI, N. *Dinâmica do carbono das florestas da Amazônia: resultados do Projeto CADAF*. Manaus: Editora INPA, 87p., 2014.

⁵⁵ CONAMA. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução n. 411, de 06 de maio de 2009. *Dispõe sobre os procedimentos para inspeção de indústrias consumidoras ou transformadoras de produtos e subprodutos florestais madeireiros de origem nativa, bem como os respectivos padrões de nomenclatura e coeficientes de rendimento volumétricos, inclusive carvão vegetal e resíduos de serraria*. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=604> Acesso em: 21 fev 2017.

⁵⁶ CHAZDON, R. L. Regeneração de florestas tropicais. *Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Cienc. Nat.*, v. 7, n.3, p.195-218, 2012.

⁵⁷ SOUZA, C. R.; AZEVEDO, C. P.; ROSSI, L. M. B.; SILVA, K. E.; SANTOS, J.; HIGUCHI, N. Dinâmica e estoque de carbono em floresta primária na região de Manaus/AM. *Acta Amazonica*, v.42, n. 4, p. 501-506, 2012.

⁵⁸ CHAZDON, R. L. Regeneração de florestas tropicais. *Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Cienc. Nat.*, v. 7, n. 3, p. 195-218, 2012.

⁵⁹ SOUZA, C. R.; AZEVEDO, C. P.; ROSSI, L. M. B.; SILVA, K. E.; SANTOS, J.; HIGUCHI, N. Dinâmica e estoque de carbono em floresta primária na região de Manaus/AM. *Acta Amazonica*, v. 42, n. 4, p. 501-506, 2012.

ecossistema e o horizonte temporal avaliado, pois as taxas de incremento em volume de madeira ao longo do tempo se modificam, sendo a taxa considerada pelo Conama prevista para período mínimo de 25 anos. Portanto, afirmações sobre as taxas de incremento médio de volume de madeira em uma floresta devem ser feitas com cautela, observando aspectos do ecossistema, do grau de alteração e o horizonte temporal considerado na avaliação.

Diante do que foi exposto, percebe-se a complexidade associada à dinâmica da restauração florestal, atreladas ao crescimento e desenvolvimento vegetal, demonstrando a grande importância que as ações para reparação *in situ* precedam de estudos e diagnósticos prévios dos impactos ambientais, com posterior elaboração do respectivo projeto de restauração, execução e acompanhamento periódico da área por meio da avaliação de indicadores ambientais.

5 Compensação por danos ambientais na Amazônia – reparação *ex situ*

Alternativamente, diante da impossibilidade da reparação *in situ*, o desflorestador e/ou degradador da floresta pode promover a reparação dos danos ambientais irreversíveis por meio da compensação pela reconstituição ou melhora de um sistema ambiental equivalente ao afetado.⁶⁰

Compreende-se que a restauração da área desflorestada, por levar anos para atingir características próximas ao *status quo ante*, como já mencionado, não repara integralmente os bens e serviços ambientais perdidos durante esse período que deixarão de prover os seus bens e serviços ambientais.

Portanto, tornam-se válidas as definições de medidas compensatórias e mitigatórias pela redução da qualidade ambiental ao longo do processo de restauração florestal, que não se valha apenas da restauração proporcional a área desflorestada.

⁶⁰ FREITAS, C. G. A. Valoração do dano ambiental: algumas premissas. In: MPMG. MINISTÉRIO PÚBLICO DE MINAS GERAIS. *A valoração de serviços e danos ambientais*. Revista do Ministério Público do Estado de Minas Gerais, Edição Especial Meio Ambiente, 2011.

Para o caso do desflorestamento, é notório, portanto, que a restauração florestal em área proporcional àquela que fora desmatada não seja suficiente, devendo assim, serem pensadas medidas complementares para satisfazer a reparação integral dos danos ambientais.

Pode-se destacar como promissora a necessidade de restauração florestal em proporções maiores que a área afetada, preferencialmente em Unidades de Conservação próximas ao local do dano, podendo o cálculo de indenização pecuniária servir como parâmetro para definição de uma proporção criteriosa entre área desflorestada “x” e área a ser restaurada.

Assim, como medida de compensação pelos danos ambientais causados por desflorestamento, pode-se considerar, minimamente, a restauração de uma área proporcional à relação entre o valor da indenização pecuniária e os custos de restauração, assim, o tamanho da área desejada para compensação de um hectare desflorestado poderá ser igual ao valor monetário do dano ambiental dividido pelos custos de restauração.

A atratividade pela escolha da compensação pelo desflorestador ao invés do pagamento da indenização pecuniária está no fato de que os custos de restauração poderão ser substancialmente reduzidos, dependendo das técnicas alternativas que poderão ser utilizadas, a exemplo das técnicas de nucleação já mencionadas neste trabalho, eliminando os gastos com a regeneração artificial.

Além disso, pode-se pensar em um rol de outras medidas que podem ser debatidas e negociadas ao invés da medida mínima proposta acima, como a compra e doação de áreas para criação de novas Unidades de Conservação, o financiamento de pesquisas científicas relacionadas à conservação da natureza da Região, financiamento de ações de controle ambiental realizadas pelo Estado, realização de projetos de educação ambiental nas escolas, apoio a projetos de produção de alimentos orgânicos, entre outras.

6 Valoração monetária de danos ambientais na Amazônia

O valor econômico de um recurso natural pode ser decomposto em valores de uso e não uso. Os valores de uso referem-se àqueles atribuídos ao uso direto (bens e serviços ambientais apropriados diretamente da

exploração do recurso e consumidos hoje), ao uso indireto (bens e serviços ambientais que são gerados de funções ecossistêmicas e apropriados e consumidos indiretamente hoje) e ao valor de opção (bens e serviços ambientais de usos diretos e indiretos a serem apropriados e consumidos no futuro), enquanto o valor de não uso se refere àquele dissociado do uso e deriva de uma posição moral, cultural, ética ou altruística em relação aos direitos de existência de outras espécies que não a humana ou de outras riquezas naturais.^{61 62}

Existem vários métodos de valoração econômica do meio ambiente, classificados em função da produção ou em função da demanda (com base nas teorias do mercado), que apresentam vantagens e limitações distintas para captação de cada parcela do valor econômico de um recurso natural, sendo a adoção de cada método dependente do objetivo da valoração, das hipóteses assumidas pelo método, da disponibilidade de dados e do conhecimento da dinâmica ecológica do objeto que está sendo valorado.⁶³

Nesse contexto, propõe-se a precificação dos danos ambientais irreversíveis causados pelo desflorestamento da Floresta Amazônica (referentes ao período até o retorno ao *status quo ante* dos bens e serviços ambientais perdidos), utilizando-se de procedimento matemático que considere aspectos como: (i) os benefícios financeiros proporcionados por uma floresta (uso direto); (ii) os custos necessários para restauração das funções ecossistêmicas (uso indireto) e de bens e serviços que possam ter uso futuro (valor de opção); (iii) o tempo necessário para o retorno ao *status quo ante*; (iv) a reversibilidade do dano ambiental; e (v) a facilidade de obtenção dos dados de entrada.

⁶¹ MOTTA, R. S. *Manual para valoração econômica de recursos ambientais*. IPEA/MMA/PNUD/CNPq, Rio de Janeiro, 1997.

⁶² MOTA, J. A. Métodos econômicos para valoração de danos ambientais. In: MPMG. MINISTÉRIO PÚBLICO DE MINAS GERAIS. A valoração de serviços e danos ambientais. Revista do Ministério Público do Estado de Minas Gerais, Edição Especial Meio Ambiente, 2011.

⁶³ MOTTA, R. S. *Manual para valoração econômica de recursos ambientais*. IPEA/MMA/PNUD/CNPq, Rio de Janeiro, 1997.

No caso do desflorestamento, o valor dos “Benefícios Financeiros” pode ser atribuído aos recursos madeireiros, pelo fato de possuírem preços de mercado estabelecidos por fontes oficiais para muitos Estados. Nesse caso, o valor pode ser calculado de acordo com um dos métodos para valoração monetária de danos ambientais, denominado “Produtividade Marginal”, o qual avalia o valor de bens e serviços ambientais das florestas sem preços de mercado com base nas perdas de rendimentos provenientes de bens e serviços ambientais que possuem preços de mercado,⁶⁴ neste caso a madeira.

Ainda nessa lógica, a parcela do “Benefício Financeiro” pode ser sustentada também com base na Lei de Crimes Ambientais (Lei n. 9.605/1998), que prevê ao infrator o agravamento da pena quando o crime for cometido para obtenção de vantagem pecuniária.

Assim, o “Benefício Financeiro” pode ser calculado com base no preço mínimo de comercialização de madeiras multiplicado pela estimativa de volume médio de madeira por espécie comercial em um hectare, que pode ser obtida com base nos inventários florestais dos Planos de Manejo Florestal Sustentável aprovados pelos órgãos ambientais competentes de cada Estado, para uma determinada região ou município, por exemplo. Esse valor deve, posteriormente, ter subtraído os custos associados à extração ilegal de madeira, presentes em fontes científicas sobre o tema.⁶⁵

No caso do desflorestamento, deve-se ter em mente que os rendimentos financeiros pela comercialização da madeira não estão restritos a uma única exploração florestal, mas sim às sucessivas explorações de acordo com o ciclo de corte da floresta. A Resolução Conama nº 411/2009 estabelece um ciclo mínimo de corte de 25 (vinte e cinco) e máximo de 35 (trinta e cinco) anos, ou seja, a cada período de 25 a 35 anos poderiam ser obtidos os benefícios financeiros pelo comércio das madeiras, caso a floresta tivesse sido conservada.

⁶⁴ MOTTA, R. S. *Manual para valoração econômica de recursos ambientais*. IPEA/MMA/PNUD/CNPq, Rio de Janeiro, 1997.

⁶⁵ SOUZA, S. F.; GRZEBIELUCKAS, C. Análise comparativa dos custos do manejo florestal e da exploração seletiva ilegal: um estudo na Fazenda Valério Neto em Novo Progresso-PA. *Anais... XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2011.

Embora haja relatos de que as taxas médias de incremento em diâmetro de espécies amazônicas estejam entre o intervalo de 0,14 a 0,2 $\text{cm}\cdot\text{ano}^{-1}$,⁶⁶ verificou-se a partir da revisão de literatura uma variação de 0,1 a 0,85 $\text{cm}\cdot\text{ano}^{-1}$,^{67 68 69 70} podendo ser adotada a média desse intervalo como a estimativa da taxa média de incremento diamétrico para espécies amazônicas, que equivale, portanto, a 0,375 $\text{cm}\cdot\text{ano}^{-1}$. Assim, em média, para que as árvores da Floresta Amazônica atinjam o diâmetro a altura do peito (DAP) igual a 50 cm para que seja autorizada a sua extração pelo órgão ambiental competente (Resolução Conama nº 411/2009), levará ao menos 133 anos ($50 \div 0,375 = 133,33$).

Portanto, durante o período de restauração da floresta para que sejam percebidos novamente os benefícios financeiros, poderiam ter sido realizadas, no mínimo, uma hoje e mais 03 (três) explorações completas, respeitando o ciclo máximo de corte [$1 + (133 \div 35) = 4,8$], cujos rendimentos representam os prejuízos (danos) causados pelo desflorestamento.

Entretanto, o método da Produtividade Marginal, aplicado para obter o valor dos “Benefícios Financeiros”, tem a limitação de calcular somente a parcela de uso direto do valor econômico dos recursos ambientais (floresta ou árvore), motivo pelo qual foram adotadas outras variáveis econômicas e fórmulas matemáticas para capturar outras parcelas do valor econômico dos recursos naturais.

Nesse segundo aspecto, os valores monetários necessários para possibilitar ou acelerar o retorno das características da floresta primária desflorestada ao *status quo ante*, podem ser utilizados como “preços-sombra” para perceber o valor mínimo do prejuízo (dano) causado ao

⁶⁶ SILVA, R. P.; SANTOS, J.; TRIBUZY, E. S.; CHAMBERS, J. Q.; NAKAMURA, S.; HIGUCHI, N. Diameter increment and growth patterns for individual tree growing in Central Amazon, Brazil. *Forest Ecology and Management*, v. 166, p. 295-301, 2002.

⁶⁷ OLIVEIRA, M. V. N.; BRAZ, E. M. Estudo da dinâmica da floresta manejada no projeto de manejo florestal comunitário do PC Pedro Peixoto na Amazônia Ocidental. *Acta Amazônica*, v. 36, n. 2, p. 177-182, 2006.

⁶⁸ HIGUCHI, N.; SANTOS, J.; LIMA, A. J. N.; HIGUCHI, F. G.; CHAMBERS, J. Q. A Floresta Amazônica e a água da chuva. *Revista Floresta*, v. 41, n. 3, p. 427-434, 2011.

⁶⁹ SOUZA, C. R.; AZEVEDO, C. P.; ROSSI, L. M. B.; SILVA, K. E.; SANTOS, J.; HIGUCHI, N. Dinâmica e estoque de carbono em floresta primária na região de Manaus/AM. *Acta Amazônica*, v. 42, n. 4, p. 501-506, 2012.

⁷⁰ BRAZ, E. M. *et al.* Criteria to be considered to achieve a sustainable second cycle in Amazon Forest. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 35, n. 83, p. 209-225, 2015.

meio ambiente (Método do Custo de Reposição),⁷¹ tendo em vista a relação causa-efeito entre os serviços de restauração florestal e o retorno das funções ecossistêmicas (uso indireto e, indiretamente, de opção).⁷²

Para o caso do desflorestamento, o “Custo de Restauração” pode ser adotado considerando as técnicas de restauração que proporcionarão o retorno ao *status quo ante* o mais rápido possível, ou seja, além do isolamento da área, deverá prever os custos com insumos, mão de obra, preparo do solo, plantio de mudas de espécies nativas em espaçamento adensado e a manutenção para garantia do sucesso da restauração.

Conforme demonstrado na revisão de literatura, o tempo necessário para restauração das características primárias de uma Floresta Amazônica pode ser bastante variável, principalmente se considerarmos separadamente cada componente do ecossistema, como a biomassa e biodiversidade faunística ou florística.

Consigna-se ainda que, com a reparação *in situ*, a reparação das funções ecossistêmicas será gradual, portanto, deve-se considerar a parcela anual dos valores conforme a reparação dos bens e serviços ambientais.

Sendo os “Custos de Restauração” estimados com base no uso de técnicas que aceleram o processo de restauração, pode-se adotar o período mínimo observado na revisão da literatura para retorno das características primárias da floresta, ou seja, 80 anos, ou então, ser determinado a partir de análises dendrocronológicas em ecossistemas de referência. Assim, pode-se calcular a parcela anual do dano ambiental com base na razão entre custos e tempo de restauração para se obter a parcela anual referente ao prejuízo (dano) causado pela degradação ambiental.

Dessa forma, a partir de informações básicas presentes nos Autos de Infração dos órgãos de controle ambiental, tais como localização geográfica e área desflorestada, e aplicando-se os princípios básicos da matemática financeira (valor futuro da série periódica, temporária, constante, imediata e antecipada e, posteriormente, o cálculo do valor presente),⁷³ a uma taxa de juros igual à 6% a.a., pois pode ser considerada

⁷¹ NOGUEIRA, J. M.; MEDEIROS, M. A. A.; ARRUDA, F. S. T. Valoração econômica do meio ambiente: ciência ou empiricismo. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, v.17, n. 2, p. 81-115, 2000.

⁷² RIBAS, L. C. *Metodologia para avaliação de danos ambientais – o caso florestal*. 1996. 244p. Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade de São Paulo, 1996.

⁷³ SILVA, M. L.; JACOVINE, L. A. G.; VALVERDE, S. R. *Economia florestal*. 2. ed. Viçosa: UFV, 2005.

específica para o caso de empreendimentos florestais brasileiros⁷⁴ (embora essa taxa possa ser objeto de negociação), tem-se o seguinte modelo matemático para o cálculo dos danos ambientais irreversíveis pelo desflorestamento na Amazônia:

$$VDAi = \frac{BF \times [(1+i)^{(p \times n)} - 1] \times (1+i)^p}{(1+i)^p - 1} + \frac{\frac{CR}{t} \times [(1+i)^t - 1] \times (1+i)^n}{i \times (1+i)^t}$$

Em que:

VDAi = Valor dos Danos Ambientais irreversíveis (R\$.ha⁻¹);

BF = Benefício Financeiro (R\$.ha⁻¹);

CR = Custo de Restauração (R\$.ha⁻¹);

i = Taxa de Juros (a.a.);

p = número de parcelas periódicas;

n = número de períodos de capitalização dentro do período de ocorrência da parcela;

t = Tempo da Restauração Florestal (anos).

O resultado do valor monetário para indenização pecuniária pode servir como critério para proposição de medidas compensatórias, tais como a restauração de áreas degradadas em proporção ao valor da indenização, considerando os custos de restauração aplicados no modelo.

Podemos ainda nos deparar com a impossibilidade técnica da reparação *in situ*. Nesse caso, a compensação (ou reparação *ex situ*) poderá ser adotada tendo também como critério o valor da indenização monetária.

Considerando o caráter perpétuo do dano ambiental, não há razão para se estabelecer um horizonte temporal para o cálculo da indenização pelos danos irreversíveis, sendo adotado o mesmo princípio do método dos Custos Ambientais Totais Esperados para danos contínuos (CATE II)⁷⁵. Sendo assim, a fórmula matemática para a estimativa de danos

⁷⁴ RIBAS, L. C. *Metodologia para avaliação de danos ambientais – o caso florestal*. 1996. 244p. Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade de São Paulo, 1996.

⁷⁵ RIBAS, L. C. *Metodologia para avaliação de danos ambientais: o caso florestal*. 1996. 244p. Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade de São Paulo, 1996.

ambientais na Amazônia, sem a previsão da reparação *in situ*, consiste em:

$$VDA_{ip} = \frac{BF + CR}{i}$$

Em que:

VDA_{ip} = Valor dos Danos Ambientais irreversíveis e perpétuos (R\$.ha⁻¹);

BF = Benefício Financeiro (R\$.ha⁻¹);

CR = Custo de Restauração (R\$.ha⁻¹);

i = Taxa de Juros (a.a.);

Ressalta-se que a metodologia proposta não abrange o valor de não uso, que está associado aos danos morais causados pela degradação ambiental, sendo o cálculo, portanto, referente somente aos danos materiais causados ao meio ambiente.

Considerações finais

O desflorestamento da Amazônia implica em uma série de danos ambientais que não possuem fronteiras, como é o caso da emissão de gases do efeito estufa que podem agravar o aquecimento global. Além disso, alterações no regime de precipitação pluvial já têm sido relatado na sua região Meridional, o que pode afetar a produção de alimentos no Brasil.

Embora o Governo brasileiro tenha implementado algumas medidas para controlar e monitorar o desflorestamento, políticas públicas devem ser melhor avaliadas, no sentido de incentivar mudanças no modelo de desenvolvimento econômico que implicam na supressão da vegetação para modificação do uso do solo, que historicamente tem sido adotado na Região.

A percepção e a conscientização ambiental da população e produtores rurais também merecem ser melhor exploradas, para que tenham ciência dos problemas que podem ser ocasionados devido à supressão da

vegetação da Floresta Amazônica, a fim de conciliar o desenvolvimento com a qualidade ambiental e, conseqüentemente, o bem-estar.

Após o desflorestamento, a Floresta Amazônica leva anos para se restaurar, deixando de prover seus benefícios, tanto financeiros como ecossistêmicos, por esse período, devendo assim, serem adotadas medidas para a reparação dos danos ambientais, que são motivados, de modo geral, por interesses financeiros de particulares.

Assim, os Ministérios Públicos, entre outras entidades governamentais e não governamentais, podem se valer da fórmula matemática apresentada para apresentar a estimativa do valor de indenização pecuniária a ser cobrada daqueles que cometem esse tipo de infração ambiental, ou então, para comparar os benefícios de atividades econômicas a serem instaladas em determinada região, a fim de verificar a viabilidade social, econômica e ambiental.

Deve-se ter em mente que o cálculo apresentado para o valor de uso direto, refere-se somente aos produtos madeireiros, pelo fato da existência de dados consolidados tanto de produção como de mercado, no entanto, os benefícios dos produtos não madeireiros ou ecoturísticos também podem ser avaliados.

O modelo apresentado tem como vantagem a utilização de dados objetivos, regionais e baseados em preços de mercado, além da facilidade de aplicação a partir de dados simples de entrada, como a localização geográfica do dano ambiental. A coleta dos dados também pode ser realizada especificadamente para um determinado local, utilizando técnica de análises dendrocronológicas, bem como suas premissas podem valer para outros distintos danos ambientais e até mesmo outros ecossistemas.

Por fim, o valor da indenização pecuniária pode servir como parâmetro para a definição de medidas compensatórias que promovam a reparação dos danos ambientais de modo equivalente em termos de bens e serviços ambientais, que, via de regra, devem ser preferíveis à reparação em pecúnia, a fim de promoverem uma melhor qualidade ambiental.

Referências

ARAÚJO, M. M. *et al.* Padrão e processos sucessionais em florestas secundárias de diferentes idades na Amazônia Oriental. *Ciência Florestal*, v. 15, n. 4, p. 343-357, 2005.

BRASIL. Constituição (1988). *Constituição da República Federativa do Brasil*. Brasília, DF: Senado Federal; Centro Gráfico, 1988.

BRASIL. *Decreto n. 8.972, de 23 de janeiro de 2017*. Institui a Política Nacional de Recuperação da Vegetação nativa. Brasília-DF, 2017. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/Decreto/D8972.htm. Acesso em: 6 fev. 2017.

BRASIL. *Lei n. 6.938, de 31 de agosto de 1981*. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus afins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília-DF, 1981. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6938.htm Acesso em: 19 jan. 2017.

BRASIL. *Lei 9.605, de 12 de fevereiro de 1998*. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Brasília-DF, 1998. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9605.htm Acesso em: 19 jan. 2017.

BRAZ, E. M. *et al.* Criteria to be considered to achieve a sustainable second cycle in Amazon Forest. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 35, n. 83, p. 209-225, 2015.

BRIENEN, R. J. W.; ZUIDEMA, P. A. Lifetime growth patterns and ages of Bolivian rain forest trees obtained by tree ring analysis. *Journal of Ecology*, n. 94, p. 481-493, 2006a.

BRIENEN, R. J. W.; ZUIDEMA, P. A. The use of tree rings in tropical forest management: projecting timber yields of four Bolivian tree species. *Forest Ecology and Management*, v. 226, p. 256-267, 2006b.

CHAZDON, R. L. Chance and determinism in tropical forest succession. In: CARSON, W.; SCHNITZER, S. A. (ed.). *Tropical forest community ecology*. Oxford: Wiley-Blackwell Publishing, 2008. p. 384-408.

CHAZDON, R. L. Regeneração de florestas tropicais. Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. *Cienc. Nat.*, v. 7, n. 3, p. 195-218, 2012.

CHAZDON, R. L. Tropical forest recovery: legacies of human impact and natural disturbances. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, v 6, n. 1-2, p. 51-71, 2003.

CHAZDON, R. L.; LETCHER, S. G.; VAN BREUGEL, M.; MARTÍNEZ-RAMOS, M.; BONGERS, F.; FINEGAN, B. Rates of change in tree communities of secondary Neotropical forests following major disturbances. *Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences*, v. 362, p. 273-289, 2007.

DALLAGNOL, F. S.; MOGNON, F.; SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D. Teores de carbono de cinco espécies florestais e seus compartimentos. *Floresta e Ambiente*, v.18, n. 4, p. 410-416, 2011.

DEBORTOLI, N. S. *O regime de chuvas na Amazônia Meridional e sua relação com o desmatamento*. 2013. 217p. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável) – Universidade de Brasília / Université Rennes, 2013.

FEARNSIDE, P. M. Desmatamento na Amazônia brasileira: história, índices e consequências. *Megadiversidade*, v. 1, n. 1, 2005.

FEARNSIDE, P. M. Desmatamento na Amazônia: dinâmica, impactos e controle. *Acta Amazônica*, v. 36n. 3, p. 395-400, 2006.

FEARNSIDE, P. M. Greenhouse gases from deforestation in Brazilian Amazonia: net committed emissions. *Climate Change*, v. 35, n. 3, p. 321-360, 1997.

FREITAS, C. G. A. Valoração do dano ambiental: algumas premissas. In: MPMG. MINISTÉRIO PÚBLICO DE MINAS GERAIS. *A valoração de serviços e danos ambientais*. Revista do Ministério Público do Estado de Minas Gerais, Edição Especial Meio Ambiente, 2011.

GOMIDE, G. L. A. *Estrutura e dinâmica de crescimento de florestas tropicais primária e secundária no estado do Amapá*. 1997. 191p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, 1997.

HIGUCHI, N.; SANTOS, J.; LIMA, A. J. N.; HIGUCHI, F. G.; CHAMBERS, J. Q. A Floresta Amazônica e a água da chuva. *Revista Floresta*, v. 41, n. 3, p. 427-434, 2011.

HOUGHTON, R. A.; SKOLE, D. L.; NOBRE, C. A.; HACKLER, J. L.; LAWRENCE, K. T.; CHOMENTOWSKI, W. H. Annual fluxes of carbon from deforestation and regrowth in the Brazilian Amazon. *Nature*, n. 403, p. 301-304, 2000.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Mapa de Biomas do Brasil*. 2004. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/21052004biomashtml.shtm>. Acesso em: 24 jan. 2017.

INPE. INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. *Projeto PRODES: monitoramento da Floresta Amazônica por satélite*. Sem data.

Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/prodes/index.php>. Acesso em: 24 jan. 2017.

LEAN, J.; BUNTON, C. B.; NOBRE, C. A.; ROWNTREE, P. R. The simulated impact of Amazonian deforestation on climate using measured ABRACOS vegetation characteristics. In: GASH, J. H. C.; NOBRE, C. A.; ROBERTS, J. M.; VICTORIA, R. L. (ed.). *Amazonian deforestation and climate*. Wiley: Chichester, p. 549-576, 1996.

MARTIN, P. A.; NEWTON, A. C.; BULLOCK, J. M. Carbon pools recover more quickly than plant biodiversity in tropical secondary forests. *Proc R Soc B*, n. 280, 2013.

MIRAGAYA, J. F. G. *Transformações no Arco do Desmatamento: a expansão pecuária bovina na Amazônia, pressões sobre o ambiente e o papel das políticas públicas na contenção do desmatamento (1990-2010)*. 2013. 245p. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável) – Universidade de Brasília, 2013.

MMA. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. *Estratégia do Programa Nacional de Monitoramento Ambiental dos Biomas Brasileiros*. Brasília: MMA, 2016.

MOTA, J. A. Métodos econômicos para valoração de danos ambientais. In: MPMG. MINISTÉRIO PÚBLICO DE MINAS GERAIS. *A valoração de serviços e danos ambientais*. Revista do Ministério Público do Estado de Minas Gerais, Edição Especial Meio Ambiente, 2011.

MOTTA, R. S. *Manual para valoração econômica de recursos ambientais*. Rio de Janeiro: IPEA/MMA/PNUD/CNPq, 1997.

NOGUEIRA, J. M.; MEDEIROS, M. A. A.; ARRUDA, F. S. T. Valoração econômica do meio ambiente: ciência ou empiricismo. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, v. 17, n. 2, p. 81-115, 2000.

OLIVEIRA, M. V. N.; BRAZ, E. M. Estudo da dinâmica da floresta manejada no projeto de manejo florestal comunitário do PC Pedro Peixoto na Amazônia Ocidental. *Acta Amazônica*, v.36, n. 2, p. 177-182, 2006.

OURIQUE, L. K. *et al.* Relação entre produção de serapilheira e incremento em diâmetro de uma floresta madura na Amazônia Central. In: LIMA, A. J. N.; DURGANTE, F. M.; CAMPOS, M. A. A.; SANTOS, J.; ISHIZUKA, M.; HIGUCHI, N. *Dinâmica do carbono das florestas da Amazônia: resultados do Projeto CADAFA*. Manaus: Editora INPA, 2014.

PETERS, C. M.; GENTRY, A. H.; MENDELSON, R. O. Valuation of an Amazonian rainforest. *Nature*, v. 339, p. 655-656, 1989.

PHILLIPS, O. L. *et al.* Changes in the carbon balance of tropical forests: evidence from long-term plot. *Science*, v. 282, n. 5388, p. 439-442, 1998.

REIS, A.; BECHARA, F. C.; TRES, D. R.; TRENTIN, B. E. Nucleação: concepção biocêntrica para restauração ecológica. *Ciência Florestal*, Santa Maria-RS, v. 24, n. 2, p. 509-519, 2014.

RIBAS, L. C. *Metodologia para avaliação de danos ambientais: o caso florestal*. 1966. 244p. Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade de São Paulo, 1996.

SILVA, C. V. J.; SANTOS, J. R.; GALVÃO, L. S.; SILVA, R. D.; MOURA, Y. M. Floristic and structure of Amazonian primary forest and a chronosequence of secondary succession. *Acta Amazônica*, v. 46, n. 2, p. 133-150, 2016.

SILVA, M. L.; JACOVINE, L. A. G.; VALVERDE, S. R. *Economia florestal*. 2. ed. Viçosa: UFV, 2005.

SILVA, R. P.; SANTOS, J.; TRIBUZY, E. S.; CHAMBERS, J. Q.; NAKAMURA, S.; HIGUCHI, N. Diameter increment and growth patterns for individual tree growing in Central Amazon, Brazil. *Forest Ecology and Management*, v. 166, p. 295-301, 2002.

SOUZA, S. F.; GRZEBIELUCKAS, C. Análise comparativa dos custos do manejo florestal e da exploração seletiva ilegal: um estudo na Fazenda Valério Neto em Novo Progresso-PA. *Anais... XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção*, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2011.

SOUZA, C. R.; AZEVEDO, C. P.; ROSSI, L. M. B.; SILVA, K. E.; SANTOS, J.; HIGUCHI, N. Dinâmica e estoque de carbono em floresta primária na região de Manaus/AM. *Acta Amazônica*, v.42, n. 4, p. 501-506, 2012.

STEIGLEDER, A. M. Valoração de danos ambientais irreversíveis. In: MPMG. MINISTÉRIO PÚBLICO DE MINAS GERAIS. *A valoração de serviços e danos ambientais*. Revista do Ministério Público do Estado de Minas Gerais, Edição Especial Meio Ambiente, 80 p., 2011.

VERÍSSIMO, T. C.; PEREIRA, J. *A floresta habitada: história da ocupação humana na Amazônia*. Belém-PA: Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia (IMAZON), 2014.

WATZLAWICK, L. F.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. A.; BALBINOT, R. Quantificação de biomassa total e carbono orgânico em povoamentos de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze no sul do estado do Paraná, Brasil. *Revista Acadêmica: ciências agrárias e ambientais*, v. 1, n. 2, p. 63-68, 2003.

WIRTH, C.; MESSIER, C.; BERGERON, Y.; FRANK, D.; FANKHÄNEL, A. Old-growth forest definitions: a pragmatic view. In: WIRTH, C.; GLEIXNER,

G.; HEIMANN, M. (ed.). *Old-growth forests: function, fate and value*. New York: Springer, 2009. v. 207, p. 11-33.

WWF. WORLD WILDLIFE FUND. *Amazônia Viva!:* uma década de descobertas, 1999-2009. Brasília, 2010.