

The text that follows is a REPRINT
O texto que segue é uma SEPARATA

Please cite as:

Favor citar como:

Fearnside, P.M.; P.M.L.A. Graça, E.W.H. Keizer, F.D. Maldonado, R.I. Barbosa & E.M. Nogueira. 2022. Modelagem de desmatamento e emissões de gases de efeito estufa na região sob influência da Rodovia Manaus-Porto Velho (BR-319). p. 287-316. In: Fearnside, P.M. (ed.) *Destruição e Conservação da Floresta Amazônica*. Editora do INPA, Manaus. 356 p.

ISBN: 978-85-211-0193-2.

Copyright: Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA)

The original publication is available from:
A publicação original está disponível de:

<https://bit.ly/3Bw8lnU>
<http://philip.inpa.gov.br>

Esta é uma republicação de:

Fearnside, P.M.; P.M.L.A. Graça, E.W.H. Keizer, F.D. Maldonado, R.I. Barbosa & E.M. Nogueira. 2009. Modelagem de desmatamento e emissões de gases de efeito estufa na região sob influência da Rodovia Manaus-Porto Velho (BR-319). *Revista Brasileira de Meteorologia* 24(2): 208-233.
<https://doi.org/10.1590/S0102-77862009000200009>

CAPÍTULO 16

Modelagem de desmatamento e emissões de gases de efeito estufa na região sob influência da Rodovia Manaus-Porto Velho (BR-319)

Philip M. Fearnside, Paulo Maurício L.A. Graça, Edwin W.H. Keizer, Francisco D. Maldonado, Reinaldo I. Barbosa & Euler M. Nogueira

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

Versão original:

Fearnside, P.M., P.M.L.A. Graça, E.W.H. Keizer, F.D. Maldonado, R.I. Barbosa & E.M. Nogueira. 2009. Modelagem de desmatamento e emissões de gases de efeito estufa na região sob influência da Rodovia Manaus-Porto Velho (BR-319). *Revista Brasileira de Meteorologia* 24(2): 208-233. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862009000200009>

RESUMO

Uma simulação de desmatamento e emissões no período 2007-2050 foi executada para a Área sob Limitação Administrativa Provisória (ALAP) ao longo da rota da rodovia BR-319 (Manaus-Porto Velho); uma área de 153.995 km² que representa aproximadamente 10% do estado do Amazonas. O governo federal por meio do Ministério dos Transportes anunciou a sua intenção de reconstruir e pavimentar a rodovia BR-319, que está abandonada desde 1988. A Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SDS), do Governo do Estado do Amazonas, e o Ministério do Meio Ambiente (MMA) têm planos para criar uma série de áreas protegidas dentro da ALAP. Nossa simulação compara cenários com e sem as reservas de proteção propostas. A reconstrução e a pavimentação da rodovia são presumidas a serem finalizadas em 2011, com a abertura de estradas laterais associadas em datas especificadas ao longo do período 2014-2024. A simulação de desmatamento acopla os programas computacionais DINAMICA e Vensim, e incorpora uma série de inovações para permitir que o total de desmatamento responda à melhoria do acesso por estradas. O modelo é baseado em uma parametrização da relação entre desmatamento e expansão viária observada em imagens de satélite de uma área no noroeste de Rondônia, adjacente à ALAP. A expansão modelada de estradas endógenas não está limitada por uma presunção de um processo de desmatamento puramente “dirigido pela demanda”. Esta suposição impediu que outros modelos de desmatamento na Amazônia representassem o efeito sobre o desmatamento total causado por decisões relativas às reservas. Isto, visto que o desmatamento total especificado externamente, baseado na demanda, implica em um “vazamento” de 100% para qualquer benefício de criação de reservas. A mesma limitação se aplica ao efeito de estradas em modelos dirigidos por demanda. Os resultados obtidos pelo nosso modelo foram validados a partir de uma simulação de desmatamento em Santo. Antônio do Matupi, que fica situado adjacente à ALAP, no sul do Amazonas.

A biomassa florestal na ALAP foi calculada a partir de 306 parcelas de um hectare dos levantamentos do Projeto RADAMBRASIL, em 13 tipos florestais identificados, e incorpora uma série de melhorias recentes na metodologia para a obtenção da estimativa. Estimativas das emissões incluem adições para o efeito de liberações de gases-traço de queimadas e de decomposição, e deduções para carbono sequestrado pelo recrescimento da vegetação na paisagem de equilíbrio que substitui a floresta. As estimativas de emissões estão restritas à biomassa (fitomassa). O carbono do solo foi excluído. Em um cenário “*business-as-usual*” para a ALAP, com apenas as reservas já existentes em 2007, a simulação indica 5,1 milhões de hectares desmatados até 2050 (38% da ALAP), com uma liberação consequente de 0,95 Gt (giga toneladas = Gt, correspondente a um bilhão de toneladas) de carbono equivalente ao carbono de CO₂ (CO₂-equivalente). Em um “cenário de conservação” com as reservas de proteção existentes e propostas, o desmatamento alcançaria 3,4 milhões de hectares até 2050 (22% da ALAP), liberando 0,64 Gt de carbono CO₂-equivalente. O efeito das reservas propostas produz uma redução de 1,6 milhões de hectares no desmatamento e 0,31 Gt de carbono CO₂-equivalente em emissões de gases de efeito estufa. Como exemplificação do valor potencial desta redução, se o carbono fosse avaliado a US\$10 tonelada⁻¹, esta redução em emissões equivaleria a US\$3,1 bilhões. Como em qualquer simulação, estes resultados dependem de uma série de presunções relativas ao comportamento do desmatamento. Neste caso, largamente influenciado pelas áreas de pequenos agricultores nas quais nosso modelo foi calibrado. Futuras melhorias para melhor representar os papéis dos grandes atores (legais e ilegais) podem resultar em desmatamento mais rápido nas áreas desprotegidas.

PALAVRAS-CHAVE Amazônia, Carbono, Desmatamento, Efeito estufa, Unidades de Conservação, Rodovias

INTRODUÇÃO

A principal contribuição brasileira ao aquecimento global é o desmatamento

amazônico (Brasil, MCT, 2004). Modelar esse processo, portanto, representa uma alta prioridade para subsidiar a tomada de medidas visando diminuir essa emissão, inclusive por meio do aproveitamento do valor da Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação (REDD), que é um dos pontos chaves nas negociações sob a Convenção de Clima atualmente. Este estudo apresenta simulações de desmatamento e de emissões de gases de efeito estufa em uma área no estado do Amazonas, onde se espera nas próximas décadas grandes reduções na cobertura florestal, em decorrência da construção da infraestrutura planejada (Figura 1). Essa área corresponde a “Área sob Limitação Administrativa Provisória” (ALAP), de 153.995 km², ao longo da rodovia BR-319, que corta o estado de norte a sul, unindo Manaus (Amazonas) e Porto Velho (Rondônia). Essa rodovia está abandonada desde 1988, quando o serviço de ônibus entre Manaus e Porto Velho cessou, entretanto, a reconstrução da estrada até 2011 foi anunciada recentemente

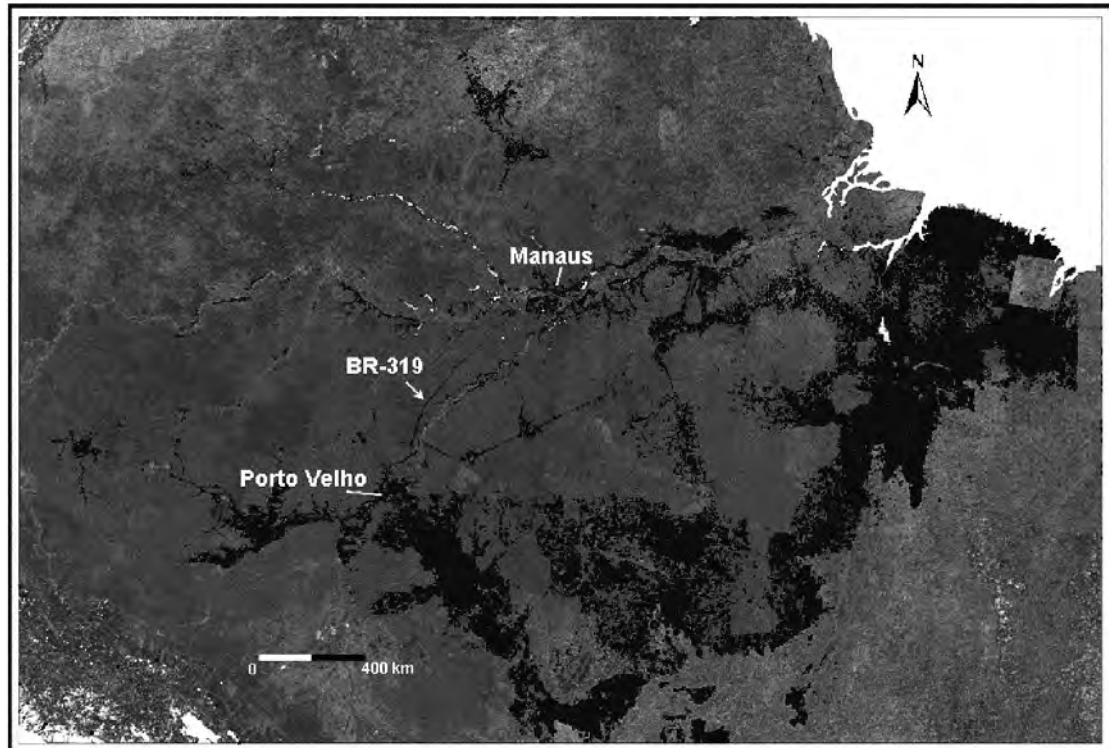
pelo governo federal como parte do Plano de Aceleração do Crescimento (PAC).

Rondônia e Amazonas contrastam nitidamente em termos de desmatamento (Figura 2). As florestas ao redor de Manaus estão em grande parte intactas e o desmatamento está acontecendo em um ritmo relativamente lento, enquanto o estado de Rondônia foi quase completamente desmatado exceto em áreas de terras indígenas e unidades de conservação, tais como parques nacionais e reservas biológicas. Rondônia é a principal fonte de migrantes que se deslocam para outras áreas no sudoeste da Amazônia, tais como o estado do Acre e a parte sul do Amazonas. Desde o período em que a rodovia BR-319 foi abandonada (1988), Rondônia é fonte de migração para áreas circunvizinhas. Esse movimento aumentou continuamente, como é evidente na recente expansão do desmatamento em partes acessíveis do sul do Amazonas, tais como Apuí, Santo Antônio do Matupi, Humaitá, Lábrea e Boca do Acre (veja Brasil, INPE, 2007). Portanto, é razoável deduzir,



Figura 1. Mapa do Brasil com as principais rodovias amazônicas existentes e planejadas (linhas tracejadas), inclusive a BR-319 (Manaus-Porto Velho) (fonte: Fearnside & Graça, 2006).

Figura 2. Desmatamento na Amazônia brasileira até 2006, baseado em dados do programa PRODES do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (desmatamento em preto) (dados de: Brasil, INPE, 2007). Em destaque, a rodovia BR-319, ainda com grande parte da cobertura floresta intacta ao redor do seu traçado.



sem depender de resultados de modelagem, que a reconstrução da rodovia, hoje, reativaria uma pressão maior para o desmatamento do que em relação ao período 1974-1988, quando a rodovia permaneceu aberta.

Estradas laterais planejadas conectariam a rodovia principal a todas as sedes municipais ao longo dos rios Madeira e Purus, provendo áreas substancialmente grandes ao desmatamento, além de expansão do desmatamento a partir das margens da própria rodovia BR-319. Estas estradas laterais não fazem parte do Plano de Aceleração do Crescimento, mas são aguardadas pelos municípios interessados desde 1997 (*A Crítica*, 1997). É provável que a pressão política para a construção delas seja irresistível depois que a rodovia principal esteja aberta, e esta pode ser adotada como premissa na construção de cenários modelados. As estradas laterais possibilitarão o acesso à maior parte do interflúvio Madeira-Purus, que é o mais estreito dos interflúvios entre os afluentes do rio Amazonas e que abriga um número extraordinariamente grande de espécies biológicas endêmicas. Além de abrir este

interflúvio ao desmatamento, uma das estradas laterais está planejada para cruzar o rio Purus em Tapauá e continuar até Coari, Tefé e Juruá, assim tornando acessível o grande bloco de floresta intacta que ocupa a parte ocidental do estado do Amazonas (Fearnside & Graça, 2006). Isto transformaria a geografia do desmatamento na Amazônia como um todo, onde aproximadamente 80% da atividade de desmatamento têm sido restritas ao “arco de desmatamento”, localizado nas periferias sul e leste da floresta, enquanto as grandes extensões de floresta na Amazônia ocidental permaneceram intactas devido à falta de acesso por estrada.

A rodovia BR-319 teria dois impactos importantes, como indicado pelo histórico de outras obras de infraestrutura na Amazônia. Um deles seria a expansão do desmatamento a partir das margens da rodovia e das estradas laterais associadas (Figura 3). O outro seria facilitar a migração de uma ponta da rodovia até a outra, criando um fluxo de população de Rondônia para Manaus. Ao chegar em Manaus, parte desta população ficaria na cidade, parte ocuparia a área

rural circunvizinha, por exemplo, o Distrito Agropecuário da Zona Franca de Manaus (SUFRAMA), e parte continuaria pela rodovia BR-174, já pavimentada, até novas fronteiras de desmatamento em Roraima. Neste último caso, incrementando as altas taxas de desmatamento já existentes ao longo de todo o setor sul da BR 174 (Barbosa *et al.*, 2008). O potencial para tal migração é significativo. É provável que um grande pulso aconteça em 2013, ao término da construção das barragens hidrelétricas de Santo Antônio e Jirau no Rio Madeira, em Rondônia. Os projetos de construção das barragens terão um total de 20.000 trabalhadores, atraídos de todas as partes do Brasil, que serão dispensados quase simultaneamente quando as represas estiverem construídas. É improvável que esta população de trabalhadores desempregados permaneça em Porto Velho, sendo que uma estrada asfaltada com serviço de ônibus até Manaus fará com que a migração para a Amazônia central seja a opção mais atraente.

DESAFIOS PARA MODELAR O DESMATAMENTO

Cenário de linha-base

Como o desmatamento deve ser modelado depende fortemente do propósito das estimativas resultantes. Pretende-se que as estimativas do atual estudo sirvam como uma maneira de quantificar as implicações ambientais de diferentes possíveis decisões de desenvolvimento, tais como a construção de rodovias e a criação de áreas protegidas. Cenários com e sem as rodovias ou reservas servem como base para comparações. Diferenças nas áreas de floresta perdidas e diferenças em impactos como as emissões de gases de efeito estufa proveem medidas quantitativas dos custos e benefícios ambientais de diferentes opções de política.

A obtenção de crédito de carbono sob o Protocolo de Kyoto torna-se possível, presumindo que reduzir o desmatamento ficará elegível para crédito sob o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo no Segundo Período

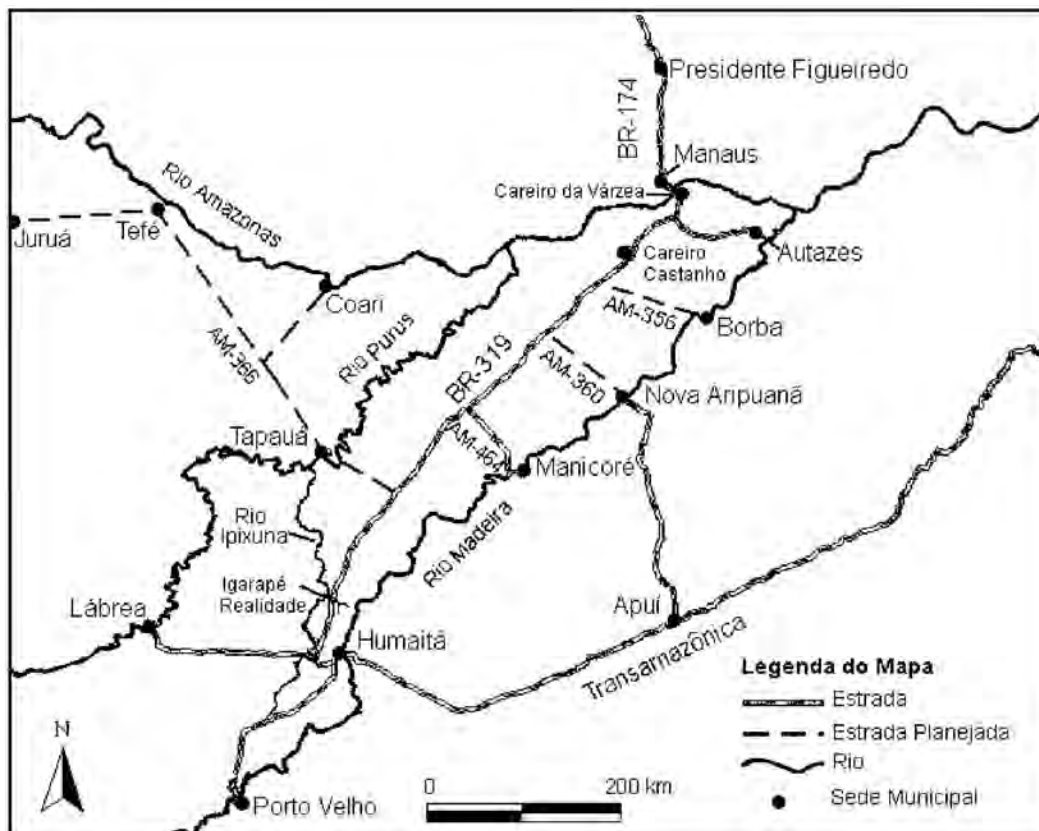


Figura 3. A Rodovia BR-319 e estradas laterais propostas (fonte: Fearnside & Graça, 2006).

de Compromisso do Protocolo (2013-2017). É provável que o cálculo do benefício de carbono seja com base no critério de “adicionalidade”, ou seja, o cálculo de emissões evitadas que estão além do que teria sido emitido na ausência de um projeto de mitigação dentro do Protocolo de Kyoto (Artigo 12). Isto envolve a comparação do resultado de um determinado projeto observado com um cenário de linha-base hipotético que representa o que teria acontecido sem o projeto. Há duas possíveis abordagens para construir o cenário de linha-base. Uma delas consiste em fazer uma extrapolação simples das tendências passadas, refletindo a série histórica de estimativas de desmatamento na área do projeto, baseado em imagens de satélite. Cálculos deste tipo (“linha-base histórica”), também conhecido como “reduções compensadas”, têm uma atração forte porque não podem ser manipulados para exagerar os benefícios de um projeto. Porém, somente sobre circunstâncias especiais vai fornecer uma aproximação razoável do resultado intencionado como representação daquilo que teria sido emitido na ausência do projeto de mitigação. A situação sob a qual a linha-base histórica funcionaria bem é aquela cujo desmatamento foi procedido rapidamente durante algum tempo e uma quantidade significativa de floresta permanece em pé e disponível para desmatar. Se uma ampla provisão de floresta não estiver disponível, a taxa de desmatamento necessariamente diminuirá mesmo sem um projeto de mitigação, portanto, significando que a linha-base histórica gerará apenas “ar quente”, ou crédito de carbono sem real benefício climático.

A outra situação na qual a linha-base histórica não funcionará como planejada é quando muito pouco desmatamento aconteceu no passado, mas um desenvolvimento novo, por exemplo, a abertura de uma rodovia, implica em desmatamento significativo no futuro. Aqui, a linha-base histórica não gerará nenhum crédito de carbono, porque é impossível reduzir a taxa de desmatamento a um nível abaixo de zero, e qualquer taxa de desmatamento possível sob as condições futuras seria mais alta do que a desprezível taxa histórica. Esta é a situação aplicada às

áreas selecionadas para o presente estudo: Apuí e a rodovia BR-319.

A abordagem que pode ser aplicada para reduzir emissões do desmatamento nas áreas de estudo é a simulação de um cenário de referência “*Business as Usual*” de mudança de uso da terra. Isto tem que representar o processo de desmatamento que é provável para acontecer sem intervenções ambientais, tais como a criação de áreas protegidas e/ou uma decisão de cancelar ou adiar o projeto rodoviário a favor de um dos outros modos de transporte alternativos, tais como uma estrada de ferro ou um porto novo para transporte de frete via cabotagem para São Paulo (veja Fearnside & Graça, 2006). Para que os que concedem crédito estejam satisfeitos de que nenhuma manipulação da linha-base aconteceu, o cenário de linha-base deve ser suficientemente transparente, documentado e “conservador” da perspectiva do crédito de carbono (*i.e.*, desmatamento da linha-base exagerado).

Cenários de mitigação

Qualquer crédito de carbono a ser concedido atualmente por reduzir o desmatamento terá como base de cálculo as áreas de floresta e estoques de carbono que são observados ou medidos no mundo real, depois que decorrer um período de atividade de mitigação, e não com base em cenários modelados. Não obstante, cenários que incluem os efeitos de atividades de mitigação podem ser muito úteis aos tomadores de decisão no governo, negociadores de clima e financiadores em potencial de projetos de mitigação. A mudança de uso da terra em períodos futuros precisa ser simulada, tal como o período 2007-2050 considerado no presente estudo, assim incorporando uma gama de possíveis decisões relativas à infraestrutura, áreas protegidas e outras possíveis ações de governo.

MODELOS ANTERIORES

Laurance *et al.* (2001)

Uma simulação de desmatamento na região da Amazônia Legal Brasileira, ao

longo do período 2000-2020, foi produzida por Laurance *et al.* (2001, 2005; Kirby *et al.*, 2003). Esta simulação utilizou a taxa histórica de expansão de desmatamento (e de formas adicionais de perturbação, tais como a exploração madeireira) em rodovias existentes, para projetar o que aconteceria se as obras de infraestrutura anunciadas sob o Programa “Avança Brasil”, de 2001 a 2003, fossem realizadas, inclusive a rodovia BR-319. O resultado mostrou a rota da rodovia BR-319 produzindo uma faixa larga de desmatamento, flanqueada por zonas sucessivas de outras perturbações (Figura 4). Estas transições foram representadas em um sistema de informações geográficas (SIG), onde as transições ocorreriam em faixas de território, conhecidas como “áreas de entorno” ou “*buffers*”, que delineiam áreas de terra localizada a diferentes distâncias de feições, como estradas pavimentadas e não pavimentadas.

A simulação de Laurance *et al.* (2001) era uma compilação simples de relações conhecidas, por exemplo, entre proximidade de rodovia e desmatamento, para extrair lições para a política. O sistema de informações geográficas utilizado no modelo quantificou os vários efeitos sobrepostos de projetos diferentes e estimativas derivadas de desmatamento e áreas alteradas, assim como, também, permitiu uma estimativa grosseira de emissões de gases de efeito estufa. Não foram incluídas as relações causais subsequentes da expansão do desmatamento. O modelo inclui o efeito inibidor de várias classes de áreas protegidas. A inclusão de efeitos de áreas protegidas e de formas de perturbação que não fossem o desmatamento total representava vantagens significantes quando comparado a outros modelos desenvolvidos na mesma época (por exemplo, Nepstad *et al.*, 2000, 2001). Na realidade, o efeito das reservas junto com a escolha de locais, como a fonte de dados para o desmatamento histórico, resultou em estimativas mais conservadoras do desmatamento no estudo de Laurance *et al.* (2001) do que no estudo de Nepstad *et al.* (2000, 2001) (veja Fearnside, 2002).

Apesar das limitações do modelo de Laurance *et al.* (2001), este teve como característica importante o de não ser “dirigido

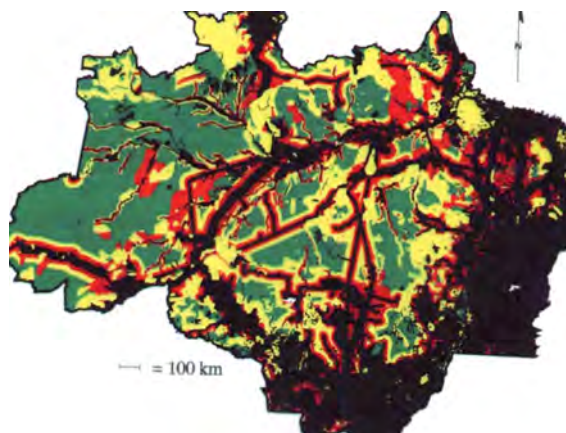


Figura 4. Laurance *et al.* (2001), simulação de desmatamento e não-floresta (preto) e perturbação (cinza médio e claro) até 2020 em um “cenário otimista”, se a infraestrutura projetada, especialmente, a que foi anunciada sob o programa Avança Brasil (inclusive a rodovia BR-319) tivesse sido construída em 2000.

pela demanda” em sua representação de desmatamento. Isto significa que não só representou onde desmatamento aconteceria, mas também quanto seria o desmatamento total. Modelos dirigidos pela demanda (como Nepstad *et al.*, 2000; Soares-Filho *et al.*, 2004, 2005, 2006) calculam o desmatamento total separadamente, baseado em suposições que consideram fatores, tal como o produto interno bruto (PIB), e então só representa onde o desmatamento acontece. A diferença é importante se o modelo é aplicado para avaliar as consequências de decisões individuais de desenvolvimento, tais como construir uma estrada ou criar uma reserva. No caso de um modelo puramente dirigido pela demanda, a construção de uma estrada não aumentaria o total de desmatamento, e a criação de uma reserva não o diminuiria, porque o total de desmatamento é fixado de antemão sem considerar o efeito dessas ações de política. Isto faz com que o modelo de Laurance *et al.* (2001) tenha conclusões sobre o total de desmatamento, enquanto outros modelos com muito mais complexidade na sua representação espacial, podem apenas indicar a localização e não a quantidade de desmatamento, sendo que a taxa de desmatamento é apenas uma premissa de entrada para os cenários.

Aguiar (2006)

O desmatamento na Amazônia Legal Brasileira foi simulado usando o programa computacional CLUE (Conversion of Land Use and its Effects), desenvolvido pela Universidade de Wageningen, na Holanda

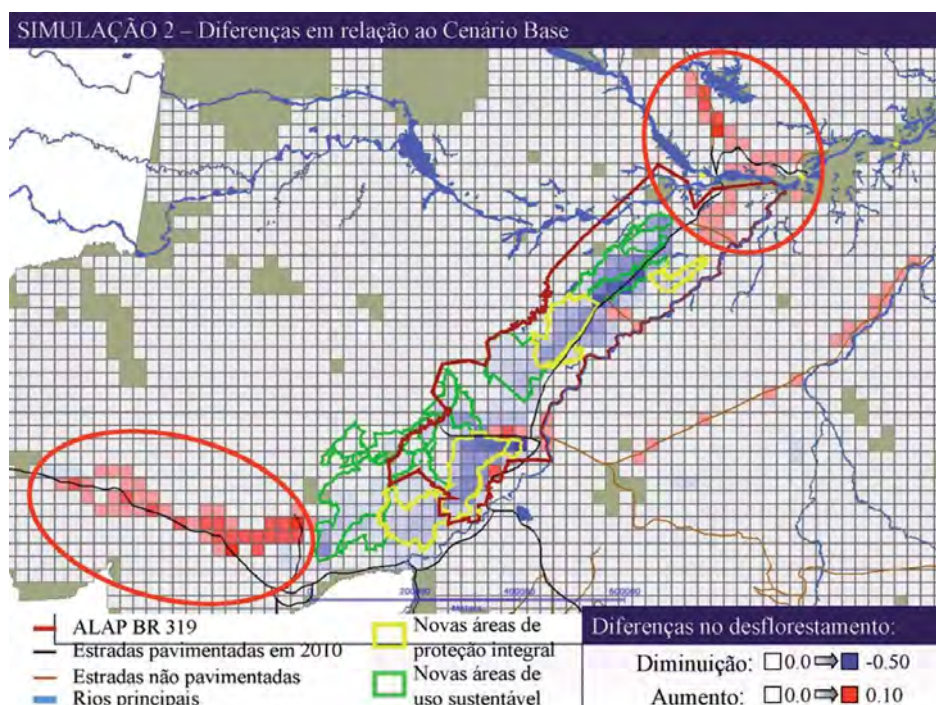
(Aguiar, 2006; Aguiar *et al.*, 2007). Uma simulação específica para a área da rodovia BR-319 também foi executada (Rede Temática GEOMA, 2006; Câmara, 2007). O CLUE produz uma representação de espaço do local de desmatamento baseado em tais fatores como: distância até mercados, distância até estradas, qualidade do solo e status como área protegida (Veldkamp *et al.*, 2001; Kok *et al.*, 2001; Verburg *et al.*, 2002). As relações entre o uso da terra e seus fatores determinantes são avaliadas a partir de regressões logísticas. A resolução espacial é bastante grosseira quando áreas extensas são simuladas. Por exemplo, Aguiar (2006) usou um tamanho de célula de grade de 25 km × 25 km. O programa não inclui meios para calcular o total de desmatamento, e isto culmina na presunção de que o desmatamento anual segue uma trajetória fixa, podendo permanecer constante a um determinado nível, aumentando linearmente por uma quantia fixa a cada ano, ou aumentar exponencialmente por uma porcentagem fixa anualmente. Isto limita severamente os propósitos para os quais as simulações podem ser aplicadas. Não podem ser representados os efeitos de decisões de políticas diferentes, como construção de estradas e criação de reservas, porque o desmatamento total anual

será o mesmo, ainda que estradas ou reservas sejam criadas, isto só mudará a distribuição espacial do desmatamento, e não a sua extensão total. No jargão que cerca o Protocolo de Kyoto, criar uma reserva resulta em 100% de “vazamento”, ou seja, o desmatamento evitado dentro da área da reserva criada simplesmente seria deslocado para outro local. Isto pode ser visto na Figura 5, onde o desmatamento que teria acontecido nas reservas propostas ao longo da rodovia de BR-319 aconteceu no Acre, Boca do Acre e na área ao redor de Manaus.

Soares-Filho *et al.* (2006)

Britaldo Soares-Filho e colaboradores desenvolveram um pacote de software chamado DINAMICA para simular a distribuição espacial do desmatamento (Soares-Filho *et al.*, 2002, 2003; Soares-Filho, 2004). Nas simulações, o programa DINAMICA pode operar junto com a contribuição de uma simulação não espacial executada no software Vensim (Ventana Systems Inc., 2007). Recentes melhorias no software DINAMICA permitem que cálculos feitos pelo Vensim sejam executados dentro do próprio DINAMICA. Baseado em indicadores econômicos como crescimento do

Figura 5. Efeito de áreas protegidas propostas na BR-319 ALAP indicado pelo deslocamento do desmatamento em outras áreas (indicado pelo círculo vermelho) em uma simulação em CLUE (Fonte: Rede Temática GEOMA, 2006; também veja Câmara, 2007). Porém, este “vazamento” é um artefato do método de simulação que usa um valor externamente especificado pelo total de desmatamento (veja texto).



PIB, o programa Vensim calcula o desmatamento total durante cada ano a ser simulado. O vetor das taxas de desmatamento anuais é passado então ao programa DINAMICA que determina onde a alocação do desmatamento acontecerá baseada em pesos de evidência, ou na probabilidade relativa que cada célula na grade que representa a paisagem será desflorestada. Estes pesos são derivados de relações calculadas de pares de imagens de satélite das quais são feitos cálculos de probabilidade de desmatar a distâncias diferentes de estradas, considerando a influência da qualidade do solo, a influência de áreas protegidas, distância dos mercados, distância do desmatamento existente e outras características.

O modelo do Vensim usado por Soares-Filho *et al.* (2006) calcula o vetor de taxas de desmatamento, ou seja, de “demanda” para desmatamento, para o período inteiro da simulação (2001-2050) separadamente do modelo espacial do DINAMICA. Posteriormente, repassa este vetor para que o DINAMICA possa determinar onde este desmatamento ocorre. Não há uma retroalimentação anual entre os dois modelos, que seria necessária para que as características espaciais possam influenciar na taxa de desmatamento no ano seguinte. Portanto, a existência de reservas não muda o total de desmatamento (*i.e.*, o vazamento é de 100%). O uso do modelo para o efeito de reservas envolve recortar as áreas das reservas e subtrair o desmatamento contido nelas do total, ou seja, um método de “cookie cutter” (cortador de biscoitos), que efetivamente representa um vazamento zero (*i.e.*, Soares-Filho & Dietzsch, 2008). O que limita o quanto que um fazendeiro desmata e, portanto, o quanto o conjunto de todos os atores desmata no total, normalmente é a capacidade do fazendeiro, ou seja, a oportunidade. Se tivesse mais dinheiro, mais mão-de-obra, e menos risco de punição, então, desmataria mais. Sua opção de desmatar não está diretamente associada à regulação do mercado, com base na lei da oferta e da procura, e sim pela disponibilidade de capital. Isto está exemplificado no histórico de subidas e decidas na taxa de desmatamento amazônico, a qual declinou de 1988 até o ponto mais baixo em 1991 (recessão no governo de Fernando

Collor de Mello) e depois teve um pico em 1995 (seguindo o início do Plano Real), que refletiam a disponibilidade de dinheiro para investimento em desmatamento (*i.e.*, a capacidade dos fazendeiros para desmatar).

O software DINAMICA inclui rotinas para simular a construção de redes de estradas secundárias e para iniciar focos de desmatamento novos (ao invés da expansão de clareiras já existentes). Estas características fazem o DINAMICA mais complexo do que o CLUE, e permite representar alguns aspectos que são conhecidos do desmatamento no Brasil. Especialmente importante é a expansão da rede de estradas endógenas (Souza Jr. *et al.*, 2005) e o processo de estabelecimento de novas fronteiras (Fearnside, 1987).

Simulações com o DINAMICA indicam a rota da rodovia BR-319 formando um enorme corredor de desmatamento. Praticamente o interflúvio Madeira-Purus inteiro é indicado como desmatado até 2050 (Soares-Filho *et al.*, 2006; veja Figura 6).

As simulações e capacidades dos softwares DINAMICA e Vensim evoluíram continuamente (Soares-Filho *et al.*, 2003, 2004, 2006). Estes proveram séries úteis de representações de como é provável que o desmatamento se espalhe conforme cenários do tipo “*Business as Usual*”. Séries paralelas de cenários de governança representaram o que aconteceria se regulamentos como o Código Florestal de



Figura 6. O cenário de referência (“*Business as Usual*”) de Soares-Filho *et al.* (2006) indica praticamente o interflúvio Madeira-Purus inteiro sendo desmatado até 2050.

1965 (Brasil, 1965) fossem respeitados, combinado com uma diminuição do desmatamento total por uma quantidade presumida (por exemplo, Carvalho *et al.*, 2001, 2002; Soares-Filho *et al.*, 2006). Estes estão baseados em suposições relativas à quantidade global de desmatamento ao invés de ser derivado de cálculos baseados em dados sobre como o comportamento do desmatamento responde a medidas específicas de política. A utilidade de tais cenários de governança está no foco da discussão sobre a necessidade de governança, mas os cenários não deveriam ser confundidos com um cenário “com projeto” para qualquer determinado conjunto de medidas de governança, tais como o Programa “BR-163 Sustentável” (veja: Alencar *et al.*, 2004, 2005) no caso da rodovia Santarém-Cuiabá (veja Fearnside, 2007). Diferente dos cenários utilizados no modelo de Soares-Filho *et al.* (2006), os cenários do presente estudo se restringem aos efeitos de estradas e reservas e não oferecem cenários de governança.

Modelos econométricos e outros

Outros tipos de modelagem, especialmente modelos econométricos, têm sido aplicados ao desmatamento amazônico. Geralmente estes se aplicam a uma escala maior, representando, por exemplo, a Amazônia brasileira como um todo, sem ser detalhados em termos espaciais. Os dados geralmente vêm de censos ao nível de município, ou então de unidades de censo, do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Exemplos incluem as equações desenvolvidas por Reis & Margulis (1991) e Reis & Guzmán (1994), para associar a taxa de desmatamento com dados sobre população, percentagem de área em cultivos agrícolas, densidade de bovinos por km², intensidade de exploração madeireira em m³ km⁻², comprimento de estradas por km², distância da capital do estado, e uma variável *dummy* para representar diferenças entre estados. Nestes modelos, as estradas são consideradas como um determinante significativo do desmatamento. O custo de transporte, que depende diretamente da disponibilidade e qualidade das estradas, tem sido mostrado ser um determinante chave

do desmatamento: uma redução de 20% no custo de transporte resulta em um aumento no desmatamento na Amazônia de 29-32% (Cattaneo, 2001, p. 230). Em uma análise feita por Chomitz & Thomas (2003), desenhada para testar o efeito da pluviosidade sobre taxas de desmatamento, demonstrou que as estradas aumentam o desmatamento, mas a magnitude do aumento depende sobre o controle de outras variáveis, tais como o impacto do desmatamento pré-existente, que tem um efeito que se mescla com o das estradas. Análises no nível municipal indicam que estradas aumentam o desmatamento em locais onde muito da floresta permanece intacta (como é o caso na ALAP da rodovia BR-319), mas em locais onde o processo de desmatamento já está bem avançado a construção de estradas adicionais diminui o desmatamento (Andersen *et al.*, 2002; Reis & Weinhold, 2004). No entanto, estudos subsequentes das mesmas bases de dados do IBGE, mas usando dados ao nível de unidades de censo (*i.e.*, com aproximadamente 20 vezes mais dados), indicam que estradas são propulsores do desmatamento em todas as fases do processo (Pfaff *et al.*, 2007).

UM MODELO PARA DESMATAMENTO NA BR-319

Abordagem de simulação com o DINAMICA

Modelo conceitual do DINAMICA

O DINAMICA é um modelo de simulação explicitamente espacial da dinâmica da paisagem que se baseia em um algoritmo de autônomo celular. Modelos fundamentados em autômatos celulares, tal como o DINAMICA, podem ser entendidos como sistemas de dinâmica espacial no qual o estado de cada célula dentro de um arranjo espacial (grade de células) depende do estado prévio das células de vizinhança, de acordo com um conjunto de regras de transição estabelecido. Conforme Soares-Filho *et al.* (2006), autônomos celulares são capazes de simular os padrões espaciais do desmatamento incorporando um mapa de probabilidades representando a influência integrada de dados cartográficos na alocação do desmatamento.

O DINAMICA reúne: funções de transição baseadas na vizinhança multi-escala; conceito de fases utilizando um processo estocástico de simulação em múltiplas etapas; um método de retroalimentação espacial a partir de cálculos de variáveis dinâmicas; uma componente que direciona a expansão da malha viária; e pesos de evidência para calcular as probabilidades de transição da dinâmica espacial. Seu arcabouço também foi concebido para acoplar outros modelos em uma arquitetura multinível constituído de submodelos. O esquema do arcabouço do DINAMICA ilustrando suas funcionalidades pode ser observado na Figura 7.

Um maior detalhamento das funcionalidades incorporadas no programa DINAMICA

pode ser encontrado no site <http://www.csr.ufmg.br/dinamica>.

Parâmetros para a ALAP BR-319

Desenvolvimento do modelo para a ALAP BR-319

O modelo foi desenvolvido em dois módulos acoplados, cada um deles executado em software diferente. Um modelo não espacial executado em Vensim 3.0 e um modelo espacial desenvolvido em DINAMICA EGO (versão mais recente do programa), com resolução espacial de 500 m. Estes dois modelos permutam parâmetros em cada ciclo da simulação como se apresenta na Figura 8.

O modelo Vensim calcula as taxas e as disponibiliza para o modelo espacial DINAMICA

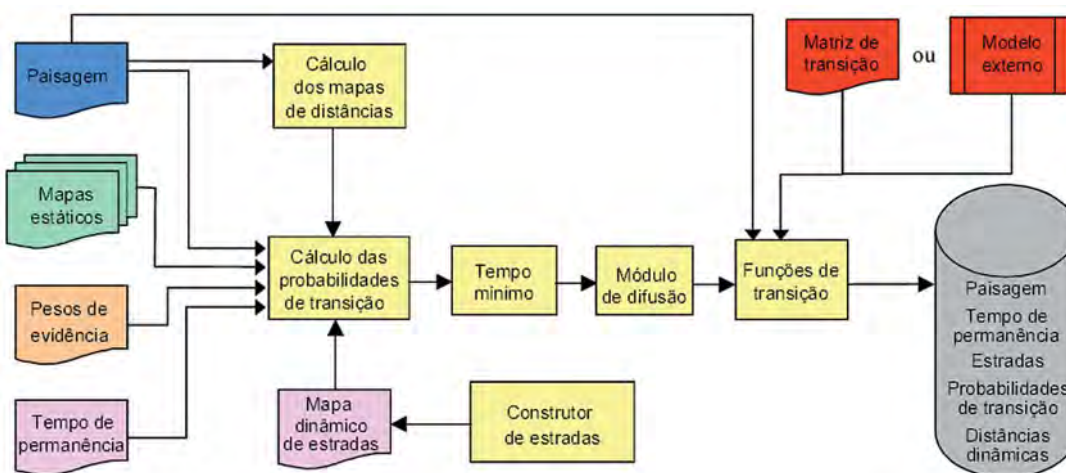


Figura 7. Fluxograma esquematizando a arquitetura do DINAMICA. Fonte: modificado de <http://www.ufmg.br/csr/dinamica>, acesso em 13/10/2007.

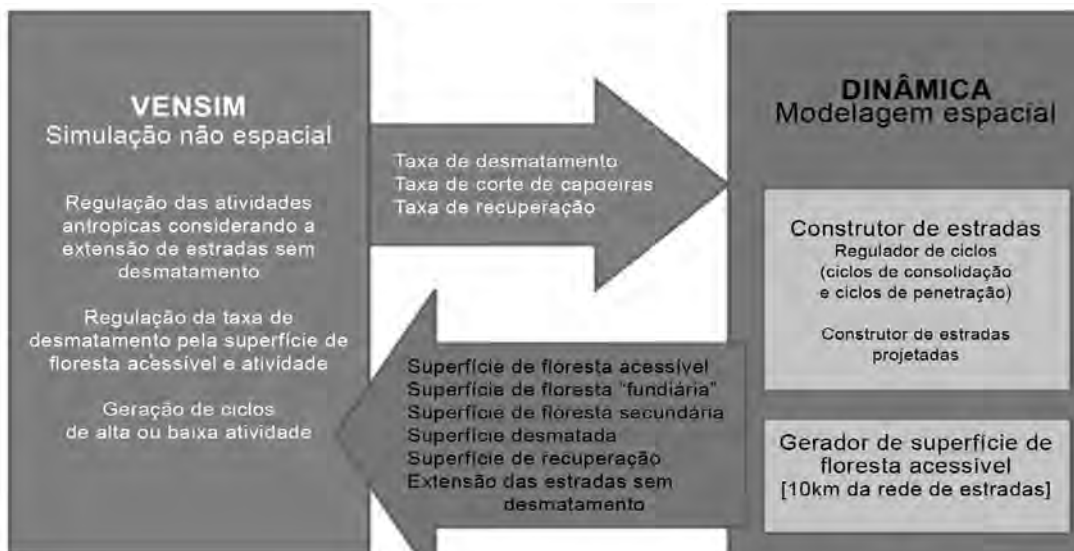


Figura 8. Acoplamento dos modelos não espacial e espacial. Em cada ciclo são enviadas as variáveis calculadas entre os módulos.

EGO. As taxas calculadas são as de desmatamento, “clearing” (corte das florestas secundárias, “capoeiras”) e recuperação (regeneração da vegetação). Para o cálculo das taxas, o modelo espacial disponibiliza valores quantitativos que caracteriza a cena, como as superfícies de floresta acessível e fundiária entre outras, e a de extensão de estradas que ainda não tem produzido desmatamento. A Figura 9 apresenta um quadro sintético dos fluxos de informação em cada ciclo.

A primeira linha do diagrama corresponde ao módulo espacial de construção de estradas. Este utiliza os conceitos de atratividade e fricção para seu funcionamento. A atratividade é formada por mapas numéricos, onde as áreas propícias para agropecuária possuem os maiores valores e as áreas protegidas ou inundáveis possuem os menores valores e as áreas de proteção integral valor zero. Nos mapas de fricção as áreas com maior declividade, inundadas ou com proteção ambiental possuem os maiores valores. Desta forma, o módulo aumenta a rede de estradas e disponibiliza o novo mapa para o resto do modelo. Este módulo de construção de estradas pode ter sua atividade regulada

em função da superfície de estradas que ainda não tenham produzido desmatamento.

Os mapas de estradas combinados com os mapas de uso do ciclo anterior geram mapas de floresta disponível sobre os quais são aplicadas as taxas fornecidas pelo módulo não espacial (Vensim). Esta superfície de floresta disponível é uma das principais inovações deste modelo espacial. Esta superfície está estreitamente relacionada com o desenvolvimento da rede de estradas, e com a localização de áreas de proteção ambiental, como veremos no ponto seguinte. A floresta disponível é uma faixa de floresta a 10 km de distância das estradas. Dentro desta faixa se encontra a faixa de floresta fundiária (florestas disponíveis em uma propriedade padrão, tal como aquelas oriundas de assentamentos antigos do INCRA na BR-319) relacionada com a propriedade de pequena ocupação.

O cálculo das taxas para desmatamento, *clearing* e recuperação está relacionado com a superfície fundiária, uma faixa de 2 km de distância à estrada. A área de floresta dentro desta faixa modifica a atividade agropecuária. Na esquerda da Figura 10 observa-se a série de

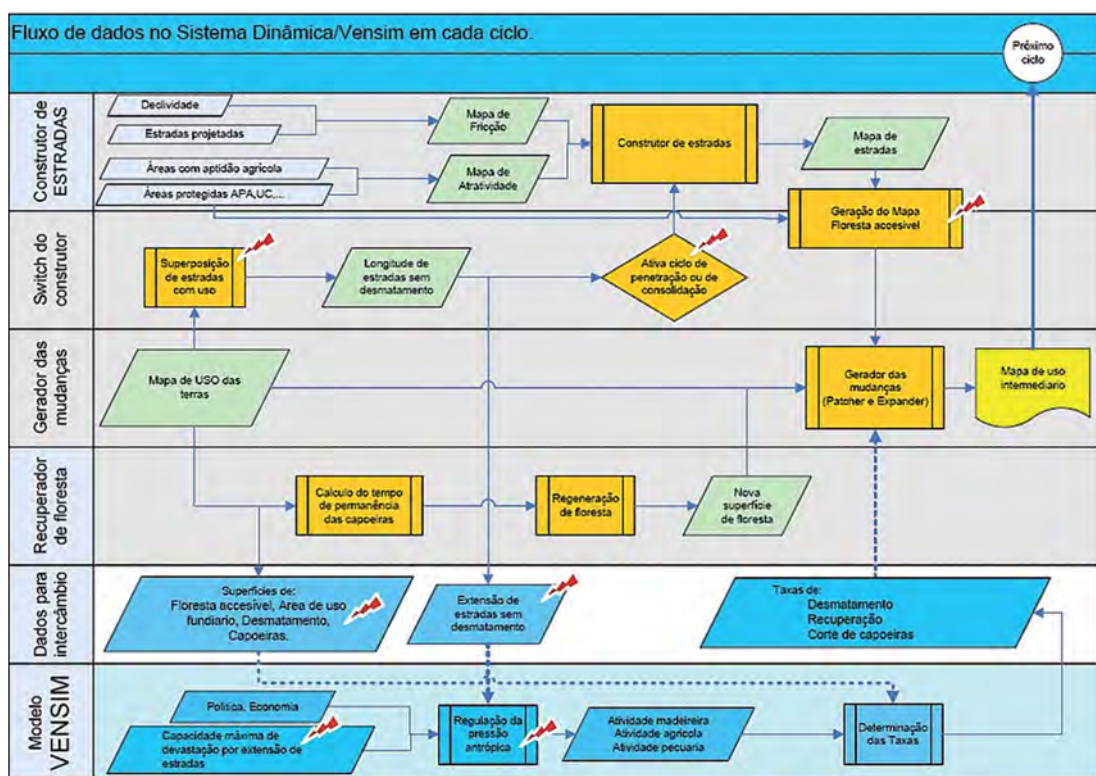


Figura 9. Diagrama dos fluxos de informação onde são indicadas as inovações desenvolvidas no laboratório de Agroecologia do INPA.

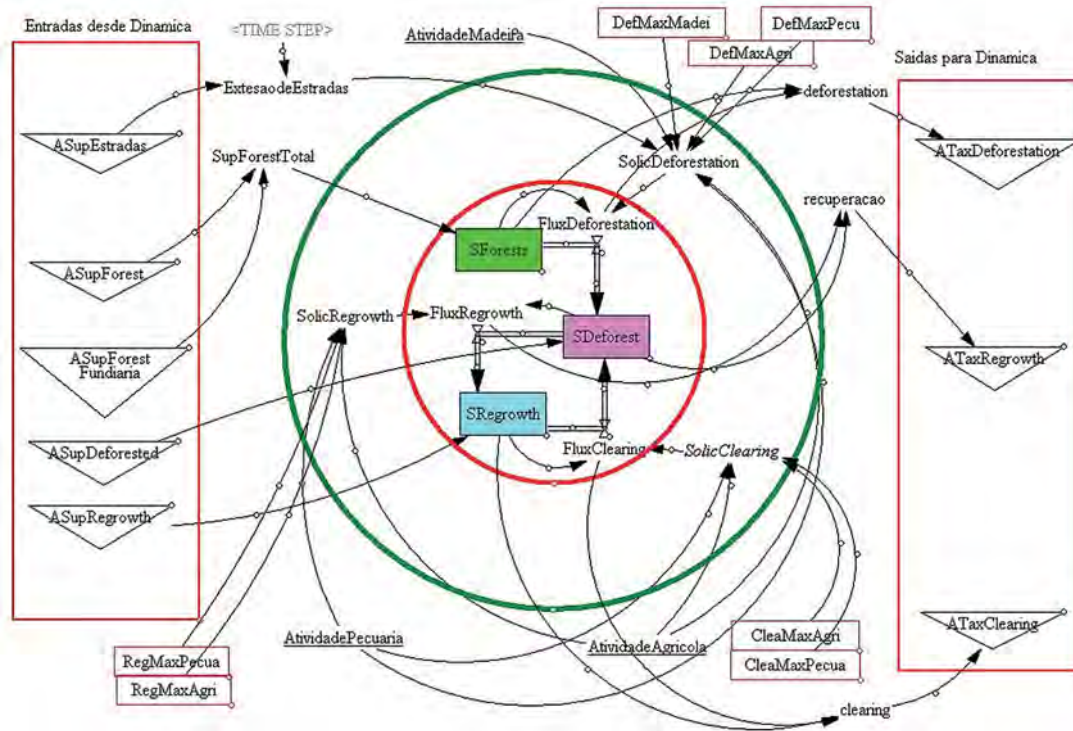


Figura 10. Esquemática do modelo numérico elaborado em Vensim. O módulo principal de cálculo e os módulos de transferência das variáveis localizados no centro da figura (anéis concêntricos); à esquerda, a entrada de variáveis iniciais do DINAMICA no modelo não espacial e, à direita, a saída das taxas para o modelo espacial.

variáveis de superfície que o modelo espacial envia ao modelo numérico para o cálculo das taxas. O módulo numérico do Vensim calcula as demandas para cada tipo de uso da terra e as disponibiliza para a rotina de expansão do desmatamento do modelo espacial.

Construção de estrada BR-319 e estradas laterais

A construção de estradas no modelo DINAMICA está dividida em duas instâncias, uma delas constituída por uma rotina interna de construção automática e outra por rotina de incorporação de mapas de estradas planejadas.

A rotina automática, ou “construtor de estradas”, é formada por três módulos automáticos, o principal constrói estradas com base na localização probabilística de destinos. A distância destes destinos é regulada pelo estado de atividade. Um “construtor de estradas” mais ativo significa destinos mais distantes (estradas de penetração), e menos ativos compreende destinos mais próximos (estradas de consolidação). O segundo módulo calcula o custo do trajeto até o destino, este custo é calculado com base na fricção (Soares-Filho *et*

al., 2002), por exemplo, atravessar áreas com maior declividade, áreas inundadas e áreas protegidas produzem trajetos de maior custo. O terceiro módulo está relacionado com a regulação da atividade. Neste módulo é comparado o mapa de desmatamento correspondente a uma dada iteração com o mapa da rede de estradas correspondente. Desta maneira, uma proporção alta de estradas que tenha produzido desmatamento resulta em um aumento da atividade do “construtor de estradas”. Este é um mecanismo de autorregulação que aproxima o comportamento do autômato ao esperado na realidade.

Incorporação de estradas planejadas

As estradas planejadas são incorporadas ao modelo em etapas predefinidas, relacionadas às datas estimadas de construção extraídas do plano diretor do Estado. Dentre estas estradas foram incluídas aquelas do segmento central da BR-319 (trecho Realidade-Igapó Açú) no ano 2011, a estrada vicinal BR-319-Manicoré (AM-464), atualmente abandonada, no ano 2014, a vicinal BR-319-Borba (AM-356) no ano 2017, BR-319-Tapauá (AM-366) projetada para conectar via terrestre a região de

Coari, Tapauá-Coari (AM-365) ano 2021 e BR-319-Nova Aripuanã (AM-360) no ano 2024.

Construtor de estradas com ciclos de atividade

O construtor de estradas aumenta sua atividade quando a maioria das estradas tem produzido desmatamento nas suas proximidades. Deste modo, a atividade de construção varia em relação com a saturação das estradas com desmatamento. O ciclo de atividade baixo está relacionado com destinos na ordem de 2 km, o que, em geral, significa o adensamento da rede de estradas ou construção de estradas de consolidação. O ciclo médio utiliza destinos ao dobro do ciclo menos ativo, e o ciclo alto localiza destinos a 6 km e, em geral, os traçados configuram estradas de penetração. Este tipo de estrada é orientado pelos traçados preferenciais localizados em mapas de fricção nos quais se baseia o cálculo dos custos dos traçados.

Construtor de estradas com traçados preferenciais

A trajetória das estradas não está completamente relacionada com o cálculo simples de custos e atratividade, mas também é definida pelo padrão espacial de construção característica na região da simulação. Estes padrões podem ser observados na construção de estradas vicinais (ramais ou travessões) a cada 15 km nas estradas principais. Assim como, estradas de penetração em sentido radial ao adensamento da ocupação e malha viária de consolidação condicionada pela disposição fundiária de lotes, entre outras variáveis que são utilizadas para a formação dos mapas de atratividade e fricção correspondentes a cada ciclo da simulação (iteração).

Unidades de conservação existentes e propostas

O modelo desenvolvido considera a inclusão de unidades de conservação existentes e, também, aquelas propostas para a ALAP da BR-319.

Modelo Vensim

O modelo desenvolvido no Vensim apresenta apenas um esqueleto para receber futuros componentes para representar os efeitos de fatores macroeconômicos e de políticas públicas que afetam os preços e, portanto, o lucro do desmatamento. As flutuações simuladas nas taxas de desmatamento seriam maiores com a incorporação destes efeitos não-espaciais importantes. As flutuações nas taxas internas de desmatamento nas simulações atuais se devem a ciclos na estimulação de desmatamento pela extensão da rede de estradas, aumentando em pulsos a área “disponível” ao desmatamento, o que representa um padrão concordante com o nosso entendimento do padrão temporal do desmatamento real (*e.g.*, Fearnside, 1989).

Cenários para a região

Cenário de referência

Na primeira fase deste estudo o modelo é executado para o cenário de referência com as seguintes suposições:

- I. As unidades de conservação e terras indígenas implementadas até 2007 estão incluídas na análise (veja mapa das unidades de conservação, Figura 11, e as terras indígenas, Figura 12);
- II. A implementação das unidades de conservação existentes é eficaz e não têm desmatamento no seu interior;
- III. Não há desmatamento dentro das terras indígenas.

Cenário conservação

Suposições do cenário chamado Conservação (Figura 13) foram:

- I. As unidades de conservação e terras indígenas implementadas até 2007 estão incluídas na análise;
- II. As unidades de conservação propostas para a área de ALAP-BR-319 estão incluídas na análise;

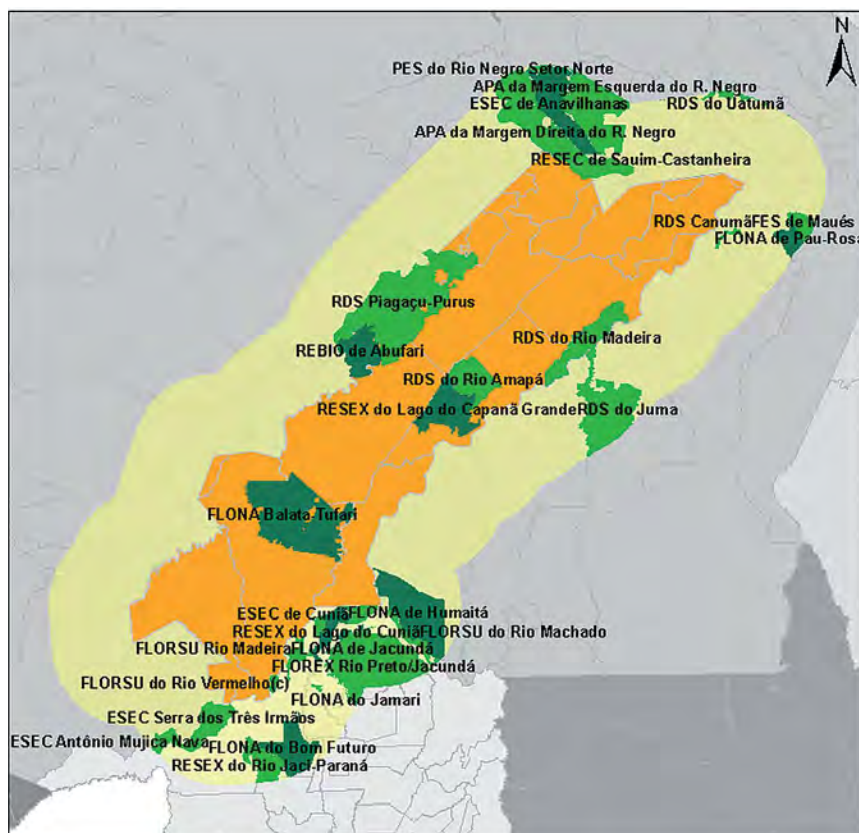


Figura 11. Mapa com unidades de conservação estaduais e federais

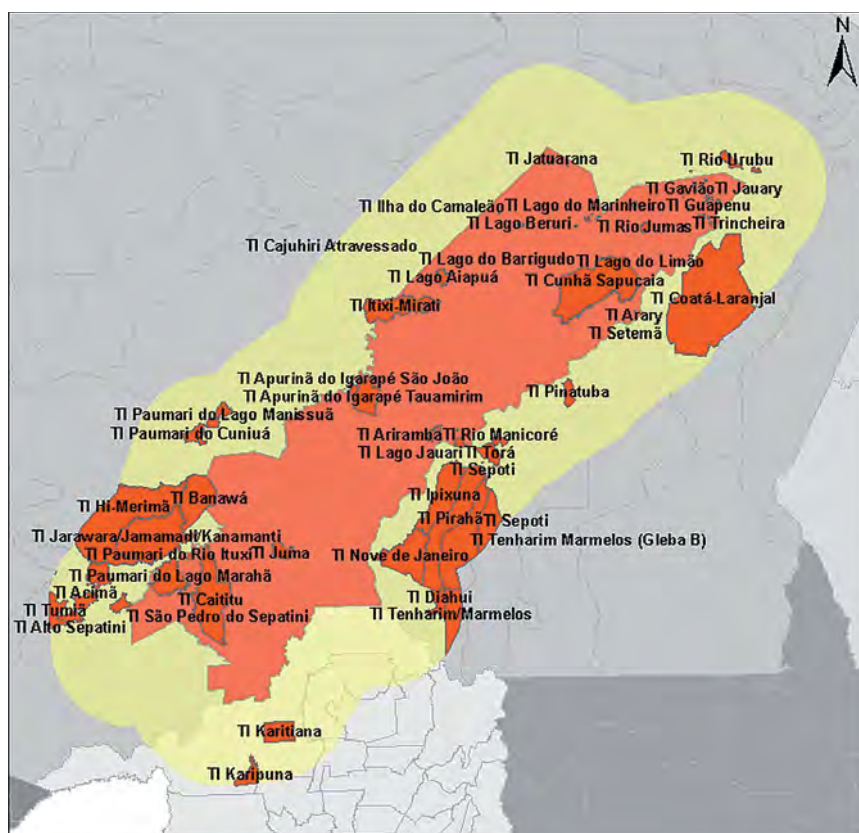


Figura 12. Mapa de terras indígenas na área da ALAP com zona de "buffer" de 100 km

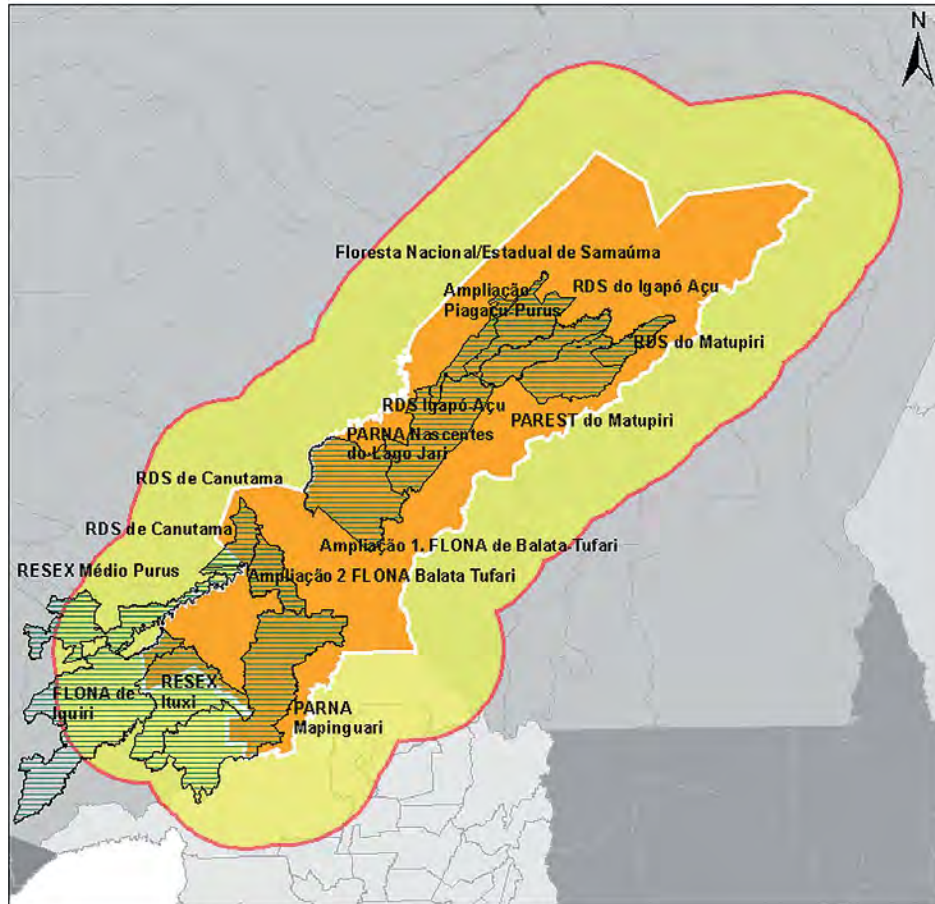


Figura 13. Mapa das unidades de conservação propostas para a região da ALAP

- III. A implementação das unidades de conservação existentes e propostas é eficaz e não têm desmatamento dentro das áreas;
- IV. Não tem desmatamento dentro das terras indígenas;

Dados espaciais de entrada

Dados espaciais de entrada para o modelo são:

- I. Mapas de cobertura da terra de tempo inicial (t_1) (derivados dos dados de desmatamento do PRODES para o ano 2000, Brasil, INPE, 2007) e o tempo seguinte ($t_1 + x$) (derivados dos dados do PRODES referentes a 2004, Brasil, INPE, 2007) para cálculo da taxa de transição e para o cálculo dos pesos de evidência, veja Figura 14 & 15.
- II. Mapas de variáveis estáticas (discretas e contínuas):
 - a. Tipo de solo (RADAMBRASIL)
 - b. Tipo de vegetação (IBGE/SIPAM)
 - c. Altitude (SRTM)
 - d. Declividade (derivado do SRTM)
 - e. Distância aos rios (ANA)

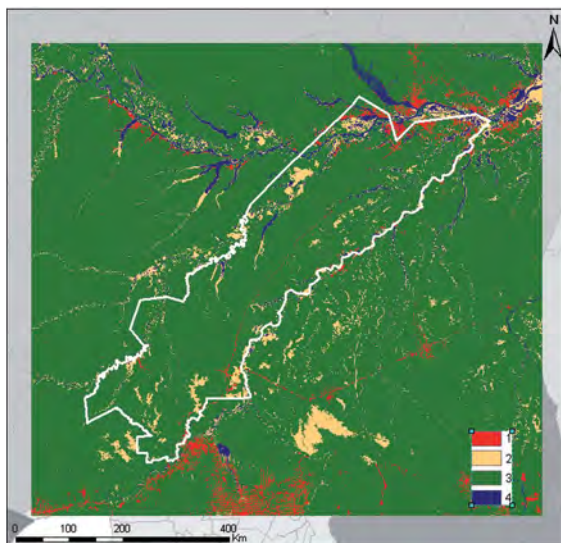


Figura 14. Mapa cobertura da terra no ano 2000. Legenda do mapa: 1-Desmatamento; 2- Não floresta; 3- Floresta; 4- Água.

- f. Distância estradas primárias (CSR-UFMG)
- g. Distância estradas secundárias (CSR-UFMG)
- h. Atratividade a centros urbanos (derivado de IBGE)

O mapa de distâncias às estradas é apresentado na Figura 16.

III. Mapa de fricção

O mapa de fricção foi elaborado a partir de dados de declividade e áreas de proteção ambiental (UCs) existentes nos cenários. A fricção é uma variável que influencia a atividade do módulo de construtor de estradas.

IV. Mapa de atratividade

O mapa de atratividade (Figura 17) é calculado a partir da propriedade de áreas que funcionam como polos de atração de atividade humana, tais como mapas de aptidão agrícola, áreas inundáveis e reservas de proteção. Estas duas últimas possuem baixa atratividade. Esse mapa também orienta a atividade do módulo de construtor de estradas.

Estabelecimento de relações funcionais

Relação entre estradas e taxa de desmatamento

A construção de estradas incorpora a superfície de floresta, atualizada a cada iteração, ao sistema da simulação. Esta incorporação está definida por uma faixa de 10 km (buffer) em ambos os lados das estradas. A superfície assim definida é denominada de floresta acessível. Deste modo, a superfície de floresta acessível pode aumentar no máximo de 20 km² por cada quilômetro de estrada construída nos casos de estradas de penetração. Nos casos de estradas vicinais ou ramais, o aumento da superfície disponível pode ser até nula.

A incorporação de superfície de floresta disponível é minimizada quando existem áreas de proteção integral ou terras indígenas vizinhas ao traçado, estas áreas não se incorporam à floresta disponível. A construção de estradas também é inibida pela presença de áreas de proteção integral. Nestes casos o

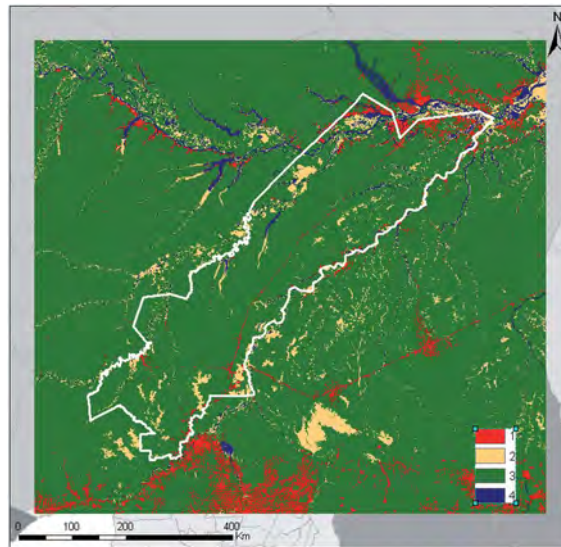


Figura 15. Mapa cobertura da terra no ano 2004. Legenda do mapa: 1-Desmatamento; 2- Não floresta; 3- Floresta; 4- Água.

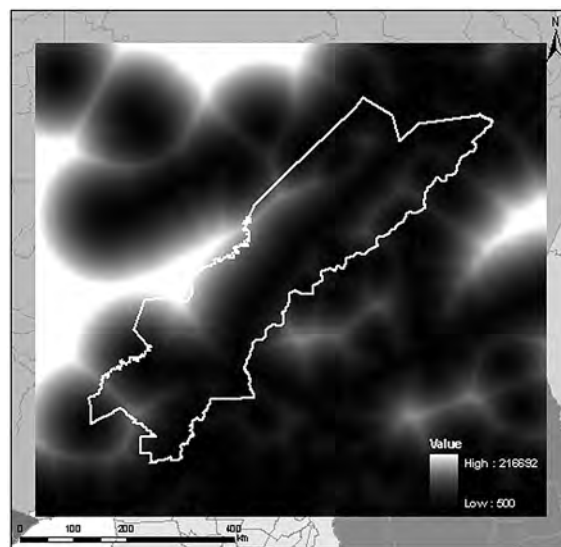


Figura 16. Mapa de distância às estradas

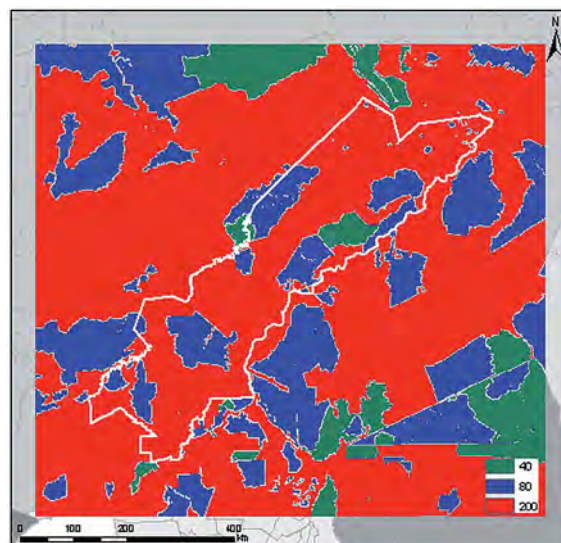


Figura 17. Mapa de atratividade. A legenda do mapa refere-se aos pesos de atratividade, em ordem crescente.

incremento da superfície de floresta disponível pode ser zero quando a construção de estradas acontece nas proximidades ou dentro das áreas de proteção, assim a superfície desmatada também não aumentará embora as estradas possam ser de penetração.

Este conceito de acessibilidade implica que a atividade de construção de estradas aumenta positivamente o desmatamento através da aplicação das taxas internas de desmatamento segundo a equação (1) seguinte, na qual a superfície desmatada corresponde à superfície desmatada no ciclo correspondente;

$$\text{Sup. desmatada} = \text{Tx interna} \times \text{Sup. floresta acessível} \quad (1)$$

Onde,

Sup. desmatada representa a superfície total desmatada em um dado ciclo;

Tx.interna refere-se às taxas de desmatamento calculadas a partir da disponibilidade de áreas acessíveis ao desmatamento;

Sup.floresta.acessível representa a superfície total de floresta capaz de ser utilizada para o desmatamento.

Nesta equação se observa que, embora a taxa interna de desmatamento possa não variar, a superfície desmatada em cada ciclo varia com as variações da superfície de floresta acessível.

Superfície fundiária e floresta disponível

A atividade de desmatamento é formada por uma atividade basal constante associada a uma superfície fundiária. Esta superfície é constituída por todas as células localizadas a menos de 2 km do traçado das estradas. Isto está relacionado com uma atividade de desmatamento de pequenas propriedades agropecuárias que em geral varia pouco com as variações econômicas. Esta superfície estreita constitui uma faixa muito atrativa para o desmatamento, e se ajusta conforme a variações da densidade da rede de estradas.

Variáveis do DINAMICA que alimentam o Vensim

As variáveis geradas no DINAMICA são exclusivamente de superfície, as principais são: superfície de floresta, área desmatada, área de florestas secundárias (capoeiras) e área fundiária. Estas variáveis são incorporadas no modelo de simulação numérica do Vensim para produzir uma taxa de desmatamento, uma taxa de *clearing* (corte de floresta secundária) e uma taxa de recuperação.

Modificações nos modelos existentes de DINAMICA

As seguintes modificações foram realizadas nos modelos existentes desenvolvidos na Universidade Federal de Minas Gerais (Soares-Filho *et al.*, 2003, 2004, 2006):

- I. Acoplamento do modelo espacial DINAMICA com o modelo numérico do programa Vensim;
- II. Construtor de estradas ativado por raio de alcance de estradas para desmatamento, alternando entre atividades de construção para extensão da rede e para penetração na floresta;
- III. Construtor de estradas orientado por estradas planejadas para o futuro;
- IV. Busca por destinos pelo construtor de estradas, com preferência às áreas planas e de platô, evitando áreas alagadas;
- V. Geração de um mapa de atratividade para o desmatamento baseado na densidade de estradas;
- VI. Geração de uma superfície de floresta acessível com base no mapa de estradas, este valor de superfície é fornecido ao modelo Vensim;
- VII. Geração da extensão de estradas sem desmatamento, fornecida ao modelo Vensim;
- VIII. Geração de uma superfície de floresta disponível para atividade fundiária, definida pela distância menor de 2 km das estradas.

Calibração do Modelo

O software DINAMICA-EGO fornece uma série de operadores especialmente desenvolvidos para calibração e validação (Rodrigues *et al.*, 2007). No desenvolvimento do modelo de mudança do uso e cobertura da terra (LUCC) existem diferentes momentos de calibração do modelo. Uma das ferramentas de calibração do modelo é o cálculo da **taxa de transição** das classes de cobertura. Neste caso particular da modelagem de desmatamento, a transição na região modelada é de floresta para área desflorestada. Dados de desmatamento obtidos do projeto PRODES (Brasil, INPE, 2007) do período 2000 até 2004 são utilizados para o cálculo da taxa de transição e para analisar a tendência de desmatamento anual para o período 2000-2006, em diferentes locais da região da Amazônia

Central, entre Manaus e Porto Velho e ao longo da Transamazônica (BR-230), ver Figura 18. A taxa anual foi derivada a partir da média anual calculada para o período 2000-2004. A taxa de transição no modelo adaptado neste estudo é calculada a partir de dados de desmatamento, apenas na primeira iteração, sendo atualizada a cada iteração pelo modelo numérico desenvolvido no Vensim.

Validação do Modelo

O resultado global foi validado em sua aplicação para a área de Matupi (Figura 19). Aqui a quantidade e o padrão espacial do desmatamento simulado confirmam de forma aproximada o que é observado nas imagens de satélite (PRODES) (Brasil INPE, 2007). Porém, deve ser notado que o tipo de desmatamento representado aqui é

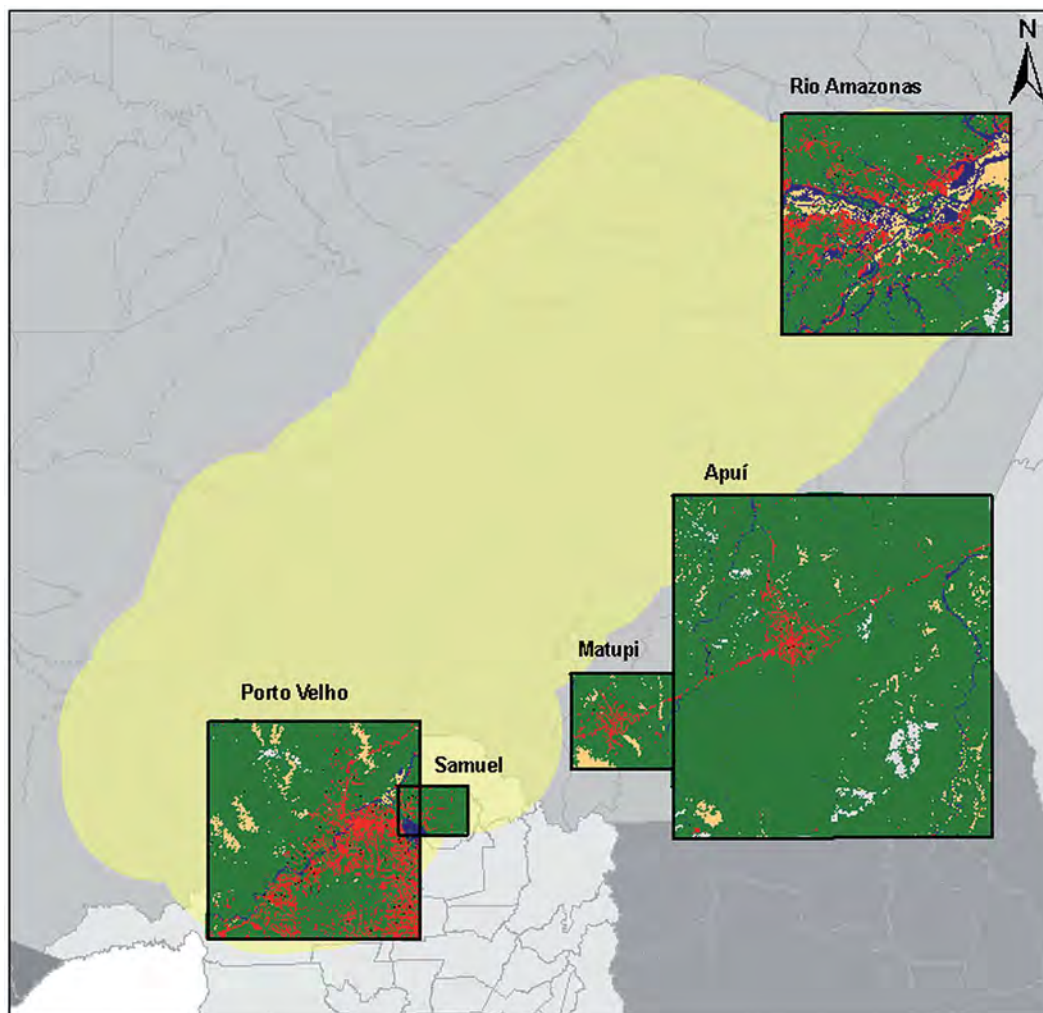


Figura 18. Mapa das subáreas na região da ALAP, as quais foram utilizadas para análise dos padrões temporais de desmatamento. Nas sub-áreas as cores representam: verde – floresta; amarelo – não-floresta; vermelho – desmatamento; azul – água; branco – sem dados.

produzido por pequenos agricultores, como aqueles ao norte da área da barragem de Samuel, em Rondônia, onde a relação foi estabelecida entre estradas e a expansão de desmatamento. Os efeitos de outros atores também precisam ser modelados (veja seção em melhorias futuras). Em geral, estes outros atores (grandes fazendeiros) produzirão desmatamento mais rápido.

Resultados sobre desmatamento

Cenário de referência

Os resultados da simulação utilizando o cenário de referência são apresentados nas Figuras 20 e 21.

O percentual desmatado resultante da simulação que teria acontecido na cobertura

Figura 19. Comparação entre o desmatamento modelado e observado em Matupí, provendo alguma validação os resultados globais do modelo.

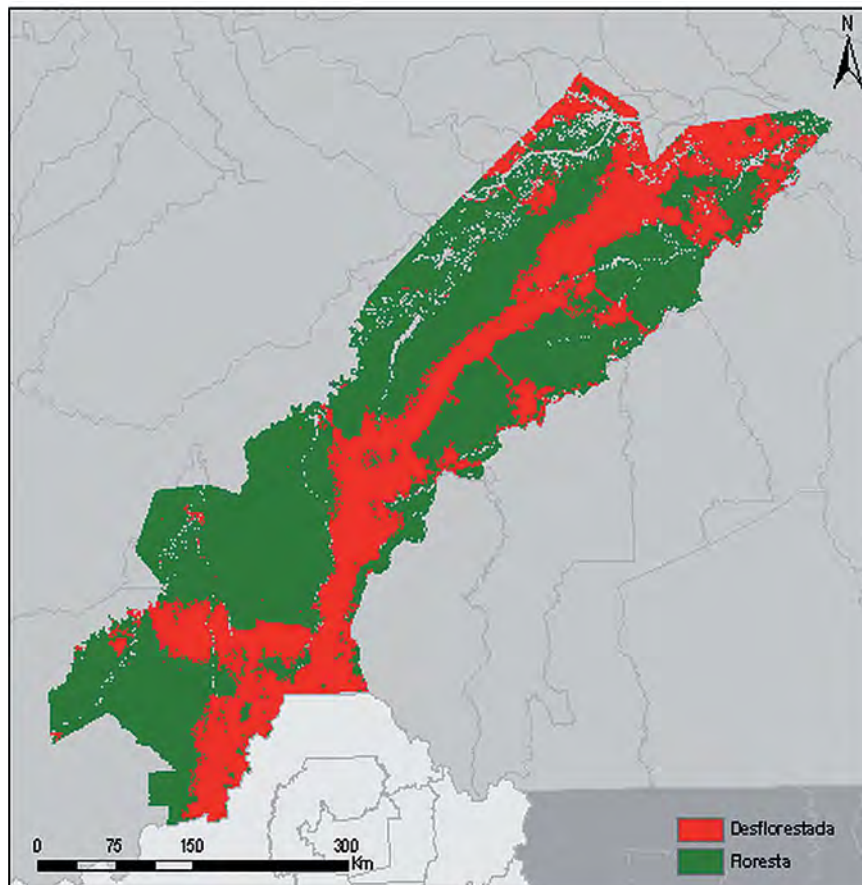
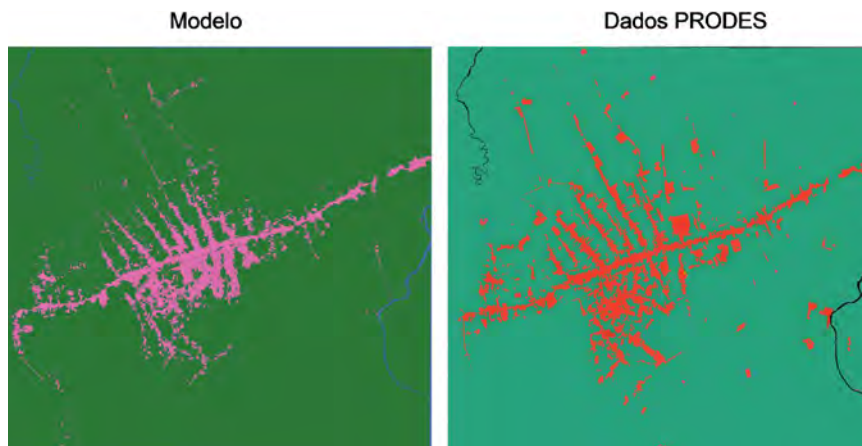


Figura 20. Mapa desmatamento até 2050, cenário de referência

florestal das áreas de reservas de proteção propostas pelo governo, caso que não fossem criadas, está indicado na Tabela 1. As percentagens desmatadas até 2050 nas unidades de conservação indicada pelo modelo deste estudo variam desde 0,4 até 77,6% no cenário de referência.

Características:

I. No cenário de referência a área de desmatamento projetada para 2050 chega até 38% da área da floresta original.

II. O aumento da taxa de desmatamento no intervalo entre os anos 2004 e 2015 está relacionado com a construção das estradas planejadas e a reconstrução e asfaltamento da BR-319.

Cenário Conservação

Os resultados da simulação considerando o cenário de conservação são apresentados nas Figuras 22 e 23.

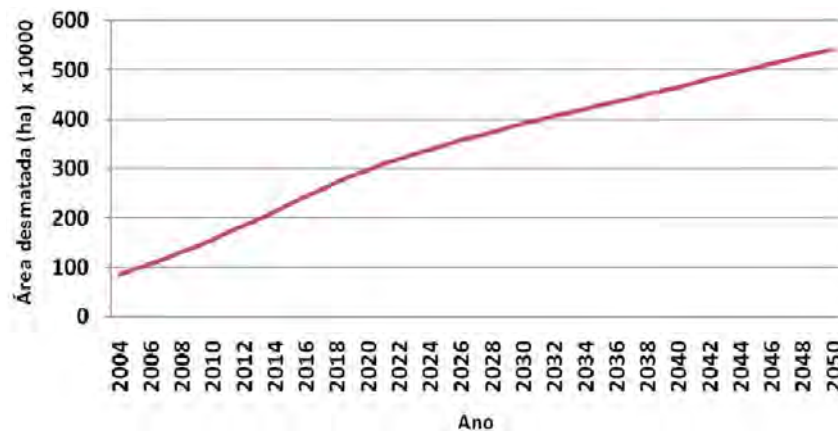


Figura 21. Área desmatada acumulada, cenário de referência

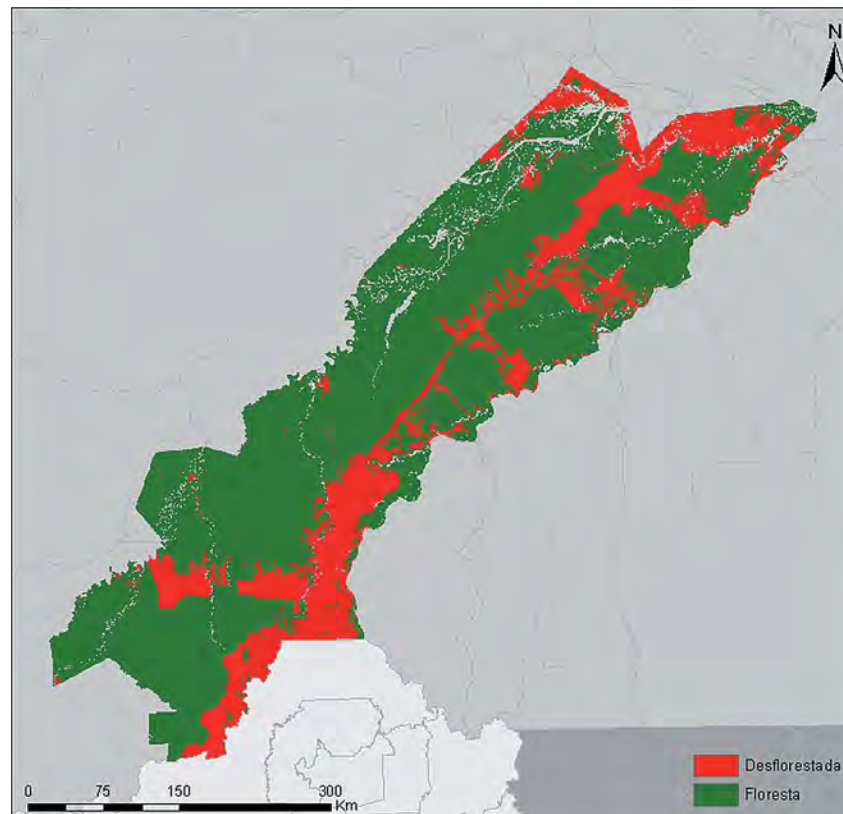


Figura 22. Mapa desmatamento até 2050, cenário "Conservação"

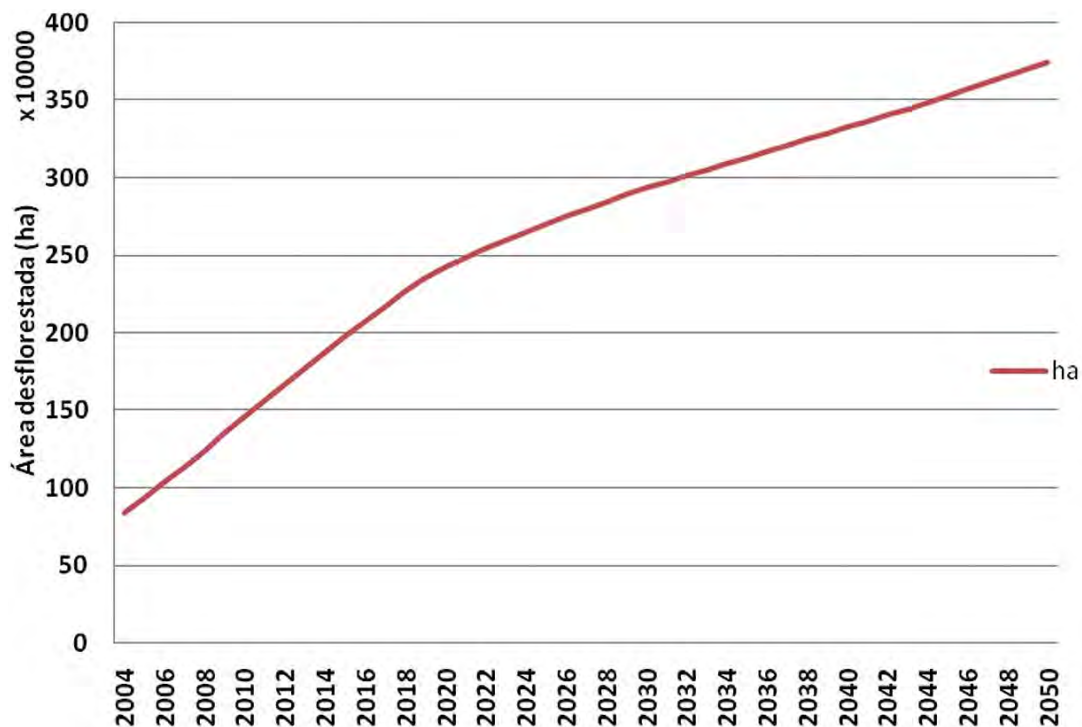


Figura 23. Área desmatada acumulada, cenário "Conservação"

Tabela 1. Unidades de Conservação Propostas e Porcentagem desflorestada no Cenário 1

Nome UC	% desflorestada
RDS do Igapó Açu	77.6
RDS Igapó-Açu	74.8
PARNA Nascentes do Lago Jari	64.1
Ampliação 2 FLONA Balata Tufari	43.6
PARNA Mapinguari	30.3
RDS do Matupiri	29.1
Floresta Nacional/Estadual de Samaúma	15.2
RESEX Médio Purus	10.8
Ampliação 1. FLONA de Balata-Tufari	10.2
FLONA de Iquiri	10.0
RDS de Canutama	9.9
PAREST do Matupiri	5.4
RESEX Ituxi	2.6
Ampliação Piagaçu-Purus	0.4

Características:

- I. No cenário Conservação a área desflorestada projetada para 2050 chega até 25% da área da floresta original.
- II. O aumento da taxa de desmatamento no intervalo entre os anos 2004 e 2015 está relacionado com a construção das estradas planejadas e a reconstrução e asfaltamento da BR-319.

BIOMASSA E EMISSÕES

Biomassa florestal na área de influência da BR-319

Estimativa da biomassa florestal dos ecossistemas terrestres

Neste trabalho, considerou-se a biomassa total como o conjunto da massa vegetal (viva e morta) presente em cada um dos ecossistemas terrestres (acima + abaixo do solo). A biomassa total dos diferentes ecossistemas terrestres presentes ao longo da área de influência da BR-319 foi calculada a partir dos dados de volume de madeira comercial ($m^3 ha^{-1}$) de 306 parcelas (1 ha cada) amostradas pelos inventários florestais do Projeto RADAMBRASIL realizados entre os estados de Rondônia (35 parcelas; 11,4%) e Amazonas (272 parcelas; 88,6%) (Brasil, Projeto RADAMBASIL, 1973-1984). Cada parcela amostrada pelo Projeto RADAMBRASIL, nesta região da Amazônia, representa o resultado do volume total de madeira comercial com circunferência à altura do peito (CAP) maior ou igual a 100 cm (correspondente a

31,8 cm de DAP - diâmetro à altura do peito), exclusivamente para sistemas florestais.

Para transformar os dados de volume de madeira em biomassa por unidade de área ($t\ ha^{-1}$), como método de ajuste, foram utilizados os fatores de expansão de volume (VEF = 1,25 para florestas densas e 1,5 para não densas) para adicionar os volumes correspondentes aos fustes das árvores menores (com DAP entre 10 e 31,7cm). A densidade de madeira média ponderada pelas espécies ocorrentes em cada parcela foi utilizada para converter o volume dos fustes em biomassa dos fustes. A biomassa das copas foi acrescentada utilizando um fator de expansão de biomassa (BEF), conforme descrito originalmente por Brown & Lugo (1992) e Brown (1997). Esta expansão de volume em biomassa foi posteriormente refinada a partir de ajustes propostos por Fearnside (1992), que adicionam outros compartimentos da biomassa florestal que não estavam contemplados no modelo de Brown & Lugo (1992). Os dados de densidade de madeira foram corrigidos para a variação radial conforme resultados obtidos em floresta densa na Amazônia central (veja Nogueira *et al.*, 2005). Os ecossistemas não florestais (vegetação aberta, com menor abundância de espécies e indivíduos) presentes na área de influência não foram contemplados pelos inventários de volume de madeira do Projeto RADAMBRASIL, e estão desprovidos de estimativas confiáveis.

Base dos cálculos

Para realizar os cálculos gerais, todas as 306 parcelas selecionadas para a área de abrangência da BR-319 foram dimensionadas em um banco de dados georreferenciado. Este banco foi formatado a partir de duas fontes básicas: (1) banco de dados georreferenciado do SIVAM/SIPAM (Brasil, SIVAM/SIPAM, 2004), versão 6, para toda a Amazônia Legal Brasileira (escala 1:250.000), juntamente com um conjunto geral das informações fornecidas pelo IBGE ao SIVAM sobre a base de dados do Projeto RADAMBRASIL e (2) livros de levantamento de recursos naturais (volumes) e mapas temáticos (solos, vegetação, etc.) do próprio RADAMBRASIL publicados pelo Ministério

das Minas e Energia (MME) nas décadas de 1970 e 1980 (escala 1:1.000.000) (Brasil, Projeto RADAMBRASIL, 1973-1984). O resultado bruto dos inventários (volume da madeira com casca, número de espécies e de indivíduos) foi obtido das publicações do MME, enquanto que a base física (localização dos pontos amostrais) das espécies botânicas do inventário foi extraída do banco de dados do SIVAM. Embora nesta última fonte houvesse incertezas devido a vários erros de digitação nas informações de circunferência do tronco ou na altura comercial, foi possível utilizá-la para obter estimativas de densidade da madeira (crucial nos cálculos gerais) por cada unidade amostral de acordo com a as espécies presentes em cada parcela.

As definições fitofisionômicas (ecossistemas) adotadas na base de cálculo foram todas derivadas do manual técnico da vegetação brasileira (Brasil, IBGE, 1992), que é a referência para a classificação das fitotipologias no País. Foram formados dois grandes grupos florestais para dar início ao processo de cálculo que transformaria volume em biomassa: “Floresta Densa” e “Floresta Não densa”. Ambos são o marco inicial para aplicação do VEF e do BEF. No primeiro grupo estão incluídas todas as formações primárias (aluvial, das terras baixas, submontana e montana) definidas dentro da classe de formação “floresta”, subclasse de formação “ombrófila”, subgrupo de formação “densa”, conforme determina o sistema de classificação brasileiro. No caso das florestas não densas, estão incluídas todas demais subclasses e subgrupos de formação florestal, como as florestas ombrófilas abertas, as campinaranas, as florestas estacionais decíduas e semidecíduas, e todos os sistemas florestais de contato (p. ex. floresta ombrófila em contato com floresta estacional ou savana em contato com floresta ombrófila).

Estimativas gerais

Das 306 parcelas amostradas, 253 (82,7%) estavam no grupo de Floresta Densa e 54 (17,6%) no de Floresta Não densa. Os ecossistemas com o maior número de parcelas amostrais foram os de Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas (Db; 156

parcelas) e Aluvial (Da; 62): quase todos dentro do estado do Amazonas e, o de menor amostragem foi a Floresta Ombrófila Aberta Aluvial (Aa; 9). Este último com apenas uma parcela no estado de Rondônia.

A biomassa média total (não ponderada pela área de cada sistema) calculada neste trabalho foi de 414 t ha⁻¹ (277-604 t ha⁻¹) (Tabela 3). Os demais sistemas terrestres presentes na amostragem do Projeto RADAMBRASIL continham um maior número de parcelas inventariadas e conseguiram diluir sua variabilidade na média final, não apresentando distorções. Todos estão dentro da faixa de resultados encontrados para a maioria dos trabalhos realizados na Amazônia (300-600 t ha⁻¹) utilizando os métodos de medidas direta e indireta disponibilizados na literatura corrente (Klinge & Rodrigues, 1974; Fearnside *et al.*, 1993; Fearnside, 1994; 1997; 2000a,b; Higuchi *et al.*, 1994; Alves *et al.*, 1997; Laurance *et al.*, 1999; Nascimento *et al.*, 2007).

Para comparação, os valores aqui calculados possuem uma diferença de -75% em relação à aplicação direta da fórmula de expansão de volume em biomassa

apresentada por Brown & Lugo (1992), e de +4,5% em relação ao refinamento apresentado posteriormente por Fearnside (1992) (ver Tabela 3). Os valores aqui relatados já possuem os mais recentes ajustes para densidade da madeira, por ecossistema e Estado (média geral de 0,651 g.cm⁻³), além de outros refinamentos como a eliminação de ajustes anteriores para “árvores ocas” e “casca”, atualmente contemplados em outros níveis do cálculo.

Estes valores para biomassa incorporam uma série de melhorias em comparação com estimativas anteriores por ter resolvido problemas com relação à contabilidade de árvores ocas e irregulares e de fator de forma (Fearnside & Laurance, 2004; Nogueira *et al.*, 2006), e de diferenças regulares e significativas a cerca da densidade de madeira no arco de desmatamento em comparação com a Amazônia Central, mesmo para árvores de uma mesma espécie (Nogueira *et al.*, 2007).

Os cálculos acima apresentados usam a biomassa da floresta original, sem ajuste pelos efeitos da exploração madeireira ou outras formas de degradação da floresta em pé. Desta maneira, as emissões associadas

Tabela 2. Distribuição das parcelas amostrais (inventários florestais) do Projeto RADAMBRASIL dentro das classes de floresta densa e não densa, por ecossistema, utilizadas na área de influência da BR 319.

Estado	Tipo Florestal	Legenda	Floresta Densa	Floresta Não-Densa	Total
Amazonas	Floresta Ombrófila Densa (sem formação)	D?	8		8
	Floresta Ombrófila Densa Aluvial	Da	58		58
	Floresta Ombrófila Densa das Terras Baixas	Db	156		156
	Floresta Ombrófila Densa Submontana	Ds	8		8
	Floresta Ombrófila Aberta (sem formação)	A?		1	1
	Floresta Ombrófila Aberta Aluvial	Aa		9	9
	Floresta Ombrófila Aberta das Terras Baixas	Ab		16	16
	Floresta Ombrófila Aberta Submontana	As		6	6
	sem informação (*)	si	10		10
	Rondônia	Floresta Ombrófila Densa Aluvial	Da	4	
Floresta Ombrófila Densa Submontana		Ds	2		2
Floresta Ombrófila Aberta Aluvial		Aa		1	1
Floresta Ombrófila Aberta das Terras Baixas		Ab		9	9
Floresta Ombrófila Aberta Submontana		As		11	11
Formações Pioneiras com influência fluvial		Pa		1	1
sem informação (*)		si	7		7
Total	-	-	253	54	307

(*) 10 parcelas no Amazonas e 7 em Rondônia foram incluídas como floresta densa para comparação, embora o banco de dados do Brasil, SIVAM/SIPAM (2004) não tenha fornecido esta informação (ecossistemas sem definição).

Estado	Ecosistema (legenda)	Densidade Básica da Madeira (g cm ⁻³) (*)	Volume RADAMBRASIL (m ³ ha ⁻¹)	Biomassa (Brown & Lugo, 1992) t ha ⁻¹ (**)	Biomassa (Fearnside, 1992) t ha ⁻¹ (**)	Biomassa Trabalho	(Este
Amazonas	D?	0,670	110	228	417	398	
	Da	0,615	125	233	427	408	
	Db	0,663	119	236	433	413	
	Ds	0,668	121	237	434	415	
	A?	0,668	42	159	290	277	
	Aa	0,633	99	231	422	403	
	Ab	0,673	106	248	454	433	
	As	0,632	124	258	473	451	
	si	0,663	126	242	443	423	
Rondônia	Da	0,636	145	257	471	450	
	Ds	0,661	116	236	433	414	
	Aa	0,631	210	345	632	604	
	Ab	0,648	109	243	446	426	
	As	0,631	100	232	424	405	
	Pa	0,632	166	303	555	530	
	si	0,646	104	211	386	369	
Média Geral	-	0,651	118	237	433	414	

(*) Valores de densidade básica da madeira são derivados do banco de dados geral para a Pan Amazônia (R.I. Barbosa, comunicação pessoal).
 (**) Os valores de biomassa total de Brown & Lugo (1992) e Fearnside (1992) são apenas para comparação, não se resumindo no resultado final deste trabalho.

Tabela 3. Densidade básica da madeira (g cm⁻³), volume (m³ ha⁻¹) e biomassa (t ha⁻¹) dos ecossistemas florestais presentes na área de influência da BR 319.

aos processos de degradação para as áreas desmatadas estão implicitamente incluídas, mas não para a degradação na floresta remanescente que não é desmatada logo (por exemplo, dentro de um prazo de três anos após a exploração madeireira). Se no futuro vierem a ser realizados cálculos explícitos de exploração madeireira e de outras emissões por degradação, a biomassa usada para calcular a emissão do desmatamento teria que ser ajustada adequadamente (veja discussão em Fearnside, 1997).

Mapa e características de distribuição de biomassa

O mapa com as características de distribuição da biomassa na ALAP da BR-319 é apresentado na Figura 24. A biomassa é menor na parte sul da ALAP e aumenta ao longo do trajeto para Manaus.

ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE CARBONO

A emissão total foi calculada a partir da perda do estoque de carbono de biomassa somando o efeito dos gases-traço. Apenas metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) foram considerados, porque os efeitos de outros gases-traço,

tais como monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x) e hidrocarbonetos não-metanos (NMHC) não são considerados atualmente pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). A equivalência dos gases foi baseada nos potenciais de aquecimento global (GWPs) do Segundo Relatório de Avaliação do IPCC, e são os valores que foram adotados pelo Protocolo de Kyoto para uso durante o seu Primeiro Período de

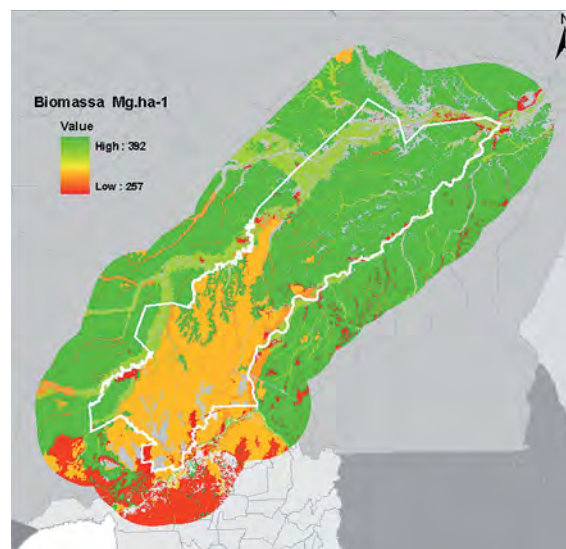


Figura 24. Distribuição de biomassa (abaixo e acima do solo) na região da ALAP BR-319

Compromisso (2008-2012). Usando essas equivalências, cada tonelada de CH_4 tem o impacto sobre o aquecimento global de 21 toneladas de gás de CO_2 , enquanto que cada tonelada de N_2O é equivalente a 310 toneladas de CO_2 , calculado ao longo de um horizonte de tempo de 100 anos (Schimel *et al.*, 1996). Deve ser notado que o Quarto Relatório de Avaliação do IPCC (Forster *et al.*, 2007, p. 212) altera estes valores. No caso de metano, o valor do GWP aumenta para 25, uma elevação de 19% sobre o impacto deste importante gás. No caso de óxido nitroso, o GWP foi reduzido para 298, uma diminuição de 4%. Para estas emissões, o efeito do metano será maior, e o impacto atribuído ao desmatamento aumentará quando essas novas informações forem incorporadas nas negociações internacionais. Usando os valores atuais do Protocolo de Kyoto, cada tonelada de carbono emitida tem um impacto adicional de gases-traço equivalente a 0,087 t C (toneladas de carbono), baseado nas emissões de 1990 calculadas por Fearnside (2000a,b).

A emissão líquida foi calculada a partir da emissão bruta, da qual foi subtraído o estoque médio de carbono na paisagem de

equilíbrio que substitui a floresta. Isto contém 28,5 t ha^{-1} de biomassa com um conteúdo de carbono de 0,45, ou 12,8 t C ha^{-1} em biomassa (*i.e.*, não considerando o carbono do solo), baseado em uma matriz de transições entre categorias de usos da terra (Fearnside, 1996).

Os cálculos acima das emissões causadas pelo desmatamento apenas incluem o carbono da biomassa viva e morta, excluindo o carbono do solo. Uma estimativa de liberação de carbono do solo pela conversão da floresta amazônica na paisagem de substituição de equilíbrio é de 5,4 t C ha^{-1} nos primeiros 20 cm de solo, 7,9 t C ha^{-1} no primeiro 1 m de solo, ou 8,5 t C ha^{-1} nos primeiros 8 m de solo (Fearnside & Barbosa, 1998). O carbono do solo mais profundo leva mais tempo para ser liberado do que o carbono no solo superficial.

O cenário de referência resulta na liberação de 0,9 Gt C até 2050, comparado com a liberação de 0,6 Gt C no cenário conservação. A maior parte da diferença entre os dois cenários se deve à taxa comparativamente menor de liberação de carbono no cenário conservação após o ano 2020 (Figura 25).

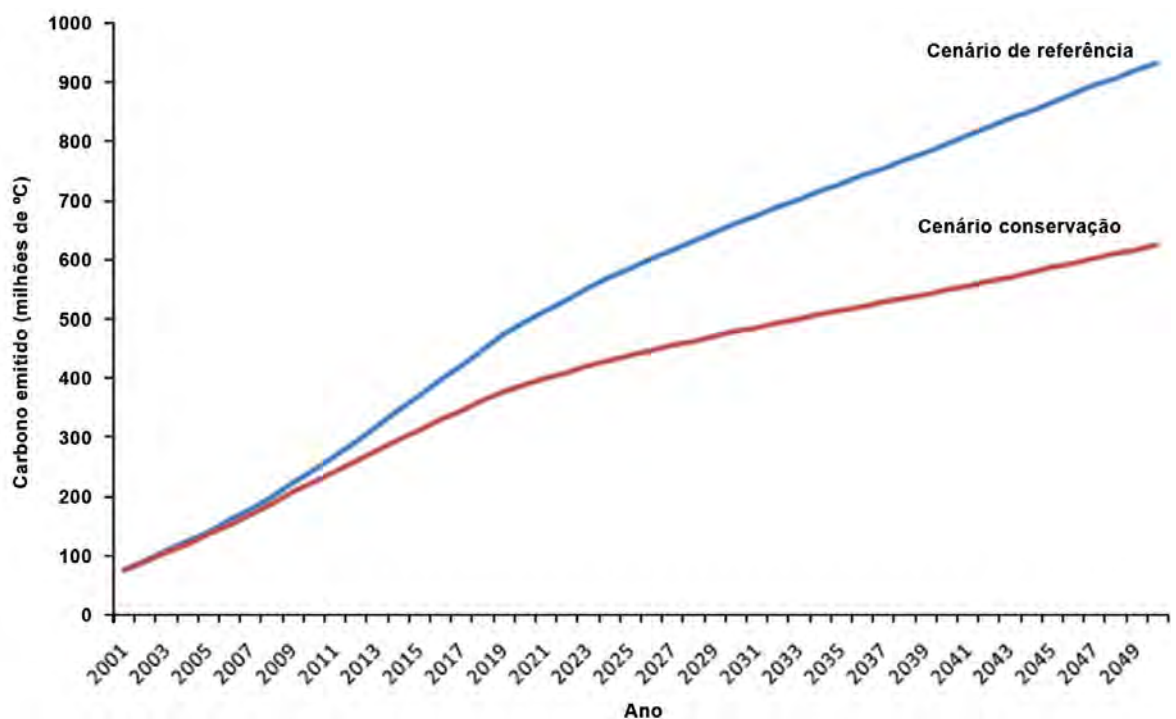


Figura 25. Emissão de gases de efeito estufa nos cenários de referência e conservação

MELHORIAS FUTURAS

Embora o atual esforço de modelagem tenha produzido o que acreditamos ser um progresso para representar o processo de desmatamento, isto, de certo modo, reflete os papéis da construção da estrada e da melhoria e criação de áreas protegidas. Este tipo de cálculo “dirigido por infraestrutura”, ou mais geralmente, “dirigido por oportunidade”, é essencial se as implicações de decisões de política são avaliadas. Não obstante, os modelos “dirigidos por demanda” também capturam aspectos importantes do processo de desmatamento, especialmente para fronteiras consolidadas. O desenvolvimento de modelos híbridos que combinam as duas abordagens, e o desenvolvimento de modelos baseados em agentes (atores), também conhecidos como “arranjos institucionais”, representam o próximo passo.

Além dos efeitos macroeconômicos que determinam a demanda para os produtos de desmatamento, os papéis de vários grupos importantes de atores precisam ser modelados explicitamente. Estes incluem: “grileiros” (os grandes apropriadores ilegais de terra), grandes investidores (*i.e.*, agroindústria de soja e grandes pecuaristas) e fontes ilegais de dinheiro, em combinação ou não com a agropecuária (*i.e.*, lavagem de dinheiro com renda de tráfico de drogas, corrupção, sonegação tributária e outras fontes ilegais). Além disso, é preciso modelar explicitamente o efeito da exploração madeireira (que influencia o desmatamento tanto por construir estradas endógenas quanto por fornecer dinheiro aos proprietários de terras para investir na derrubada). O efeito mais amplo da rodovia sobre a migração também precisa ser modelado, pois este efeito não só estimula a expansão do desmatamento ao longo da rota da rodovia, como representado aqui, mas também seu papel como um canal para transportar população até o final da estrada em Manaus. Finalmente, os efeitos potenciais da necessidade de governança precisam ser quantificados e modelados, e isto deve ser feito baseado em dados de observações ao invés de suposições simples que postulam mudanças dramáticas de

comportamento sem precedentes. Estas melhorias representam, principalmente, acréscimos ao modelo não espacial (em Vensim).

Necessidades futuras também incluem melhorias adicionais nas estimativas de biomassa de floresta e estoques de carbono, e das emissões resultantes do desmatamento e de perturbações na floresta como a exploração madeireira, incêndios florestais e efeitos de borda. Devem ser feitas, também, análises com base em estoques de carbono, ao invés de restringir a consideração às mudanças nos fluxos de carbono por desmatamento reduzido. De uma forma mais geral, avaliações futuras têm que incluir a quantificação de uma gama mais larga de serviços ambientais, inclusive a ciclagem de água e a manutenção de biodiversidade.

AGRADECIMENTOS

A preparação deste trabalho foi financiada pela Iniciativa Amazonas (IA), Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SDS), Manaus, Amazonas, Brasil. Apoio financeiro ao estudo tem sido fornecido pelo Conselho Nacional do Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (306031/2004-3; 474548/2006-6; 557152/2005-4; 420199/2005-5), Rede GEOMA, FAPEAM e o Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (PRJ05.57 & PRJ02.12). Um revisor anônimo fez comentários úteis ao manuscrito. Este capítulo foi reformatado de Fearnside *et al.* (2009).

REFERÊNCIAS

- Aguiar, A.P.D. 2006. *Modeling Land Use Change in the Brazilian Amazon: Exploring Intra-Regional Heterogeneity*. Tese de doutorado em sensoriamento remoto (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, São Paulo. 153 p.
- Aguiar, A.P.D., G. Câmara & M.I.S. Escada. 2007. Spatial statistical analysis of > land-use determinants in the Brazilian Amazonia: exploring intra-regional heterogeneity. *Ecological Modelling* 209: 169-188.
- Alencar, A., D.C. Nepstad, D. McGrath, P. Moutinho, P. Pacheco, M. del C. V. Diaz & B. Soares-Filho. 2004. *Desmatamento na Amazônia: Indo além da Emergência Crônica*. Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (IPAM), Belém, Pará. 87 p.

- Alencar, A., L. Micol, J. Reid, M. Amend, M. Oliveira, V. Zeidemann & W.C. de Sousa. 2005. A pavimentação da BR-163 e os desafios à sustentabilidade: uma análise econômica, social e ambiental. Instituto Centro de Vida (ICV), Cuiabá, Mato Grosso. 25 p. <http://www.estacaovida.org.br/pdf/pavimentacaobr163.pdf>
- Alves, D.S.; Soares, J.V.; Amaral, S.; Mello, E.K.; Almeida, S.A.S.; Silva, O.F.; Silveira, A.M. 1997. Biomass of secondary vegetation in Rondônia, Western Brazilian Amazon. *Global Change Biology* 3: 451-461.
- Andersen L.E.; Granger, C.W.J.; Reis, E.J.; Weinhold, D.; Wunder, S. 2002. *The Dynamics of Deforestation and Economic Development in the Brazilian Amazon*. Cambridge University Press. Cambridge, Reino Unido.
- Barbosa, R.I.; Pinto, F.S.; Souza, C.C. 2008. *Desmatamento em Roraima: Dados Históricos e Distribuição Espaço Temporal*. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), Boa Vista, Roraima, Brasil. Relatório Técnico Elaborado para Subsidiar as Discussões sobre Desmatamento no Estado de Roraima. Disponível em: http://agroeco.inpa.gov.br/reinaldo/Usuarios_Visitantes_RIB.htm
- Brasil, 1965. Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965 que institui o Novo Código floresta. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/Referencia_Legislativa/L4771ref_leg.htm
- Brasil, IBGE (Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). 1992. *Manual Técnico da Vegetação Brasileira (Manuais Técnicos em Geociências nº 1)*. IBGE, Rio de Janeiro. 92 p.
- Brasil, INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). 2007. Projeto PRODES: Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite. INPE, São José dos Campos, São Paulo. Disponível em: <http://www.obt.inpe.br/prodes/>
- Brasil, MCT (Ministério de Ciência e Tecnologia). 2004. *Brazil's Initial National Communication to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. MCT, Brasília, DF. 271 p.
- Brasil, Projeto RADAMBASIL. 1973-1984. Levantamento dos Recursos Naturais (Parte das Folhas SA.20 Manaus; SA.21 Santarém; SB.19 Juruá; SB.20 Purus; SC.19 Rio Branco; SC.20 Porto Velho). Ministério das Minas e Energia, Rio de Janeiro.
- Brasil, SIVAM/SIPAM (Serviço de Vigilância da Amazônia / Serviço de Proteção da Amazônia). 2004. Banco de Dados IBGE - versão 6 (derivado da recuperação dos dados originais do Projeto RADAMBASIL). SIVAM/SIPAM, Manaus, Amazonas. (4 CDs).
- Brown, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests. *FAO Forestry Paper 134*, FAO - Food and Agriculture Organization of United Nations, Roma, Itália. 54 p.
- Brown, S.; Lugo, A. 1992. Aboveground biomass estimates for tropical moist forest of the Brazilian Amazon. *Interciencia* 17(1): 8-18.
- Câmara, G. 2007. Developments in Land Change Modelling in Amazonia: Governance and Public Policies. Global Land Project, Scientific Steering Committee Meeting, Copenhagen, October 2007. Apresentação PowerPoint, 38 p. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/gilberto/present/camara_glp_oct_2007.ppt
- Carvalho, G., A.C. Barros, P. Moutinho & D. Nepstad. 2001. Sensitive development could protect Amazonia instead of destroying it. *Nature* 409: 131.
- Carvalho, G.O., D. Nepstad, D. McGrath, M.C.V. Diaz, M. Santilli & A.C. Barros. 2002. Frontier expansion in the Amazon: Balancing development and sustainability. *Environment* 44(3): 34-45.
- Catteano, A. 2001. Deforestation in the Brazilian Amazon: comparing the impacts of macroeconomic shocks, land tenure, and technological change. *Land Economics* 77: 219-240.
- Chomitz, K.M. & Thomas, T.S. 2003. Determinants of land use in Amazônia: A fine-scale spatial analysis. *American Journal of Agricultural Economics* 85: 1016-1028.
- A Crítica. 1997. "Estado e DNER recuperam 42 rodovias" *A Crítica* [Manaus], 10 de agosto de 1997, p. E-4.
- Fearnside, P.M. 1987. Causes of Deforestation in the Brazilian Amazon. p. 37-61 In: R.F. Dickinson (ed.) *The Geophisiology of Amazonia: Vegetation and Climate Interactions*. John Wiley & Sons, New York, E.U.A. 526 p.
- Fearnside, P.M. 1989. *Ocupação Humana de Rondônia: Impactos, Limites e Planejamento*. Relatórios de Pesquisa No. 5, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Brasília, DF. 76 pp.
- Fearnside, P.M. 1992. Forest biomass in Brazilian Amazonia: comments on the estimate by Brown and Lugo. *Interciencia* 17(1): 19-27.
- Fearnside, P.M. 1994. Biomassa das florestas amazônicas brasileiras. In: *Anais do Seminário "Emissão x Seqüestro de CO₂: Uma Nova Oportunidade de Negócios para o Brasil"*. Companhia Vale do Rio Doce, Rio de Janeiro, Brasil. p. 95-124.
- Fearnside, P.M. 1996. Amazonian deforestation and global warming: Carbon stocks in vegetation replacing Brazil's Amazon forest. *Forest Ecology and Management* 80(1-3): 21-34.
- Fearnside, P.M. 1997. Greenhouse gases from deforestation in Brazilian Amazonia: Net committed emissions. *Climatic Change* 35(3): 321-360.

- Fearnside, P.M. 2000a. 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.
- Fearnside, P.M. 2000b. Greenhouse gas emissions from land-use change in Brazil's Amazon region. p. 231-249 In: R. Lal, J.M. Kimble & B.A. Stewart (Eds.) *Global Climate Change and Tropical Ecosystems*. Advances in Soil Science. CRC Press, Boca Raton, Florida, E.U.A. 438 p.
- Fearnside, P.M. 2002. Avanço Brasil: Environmental and social consequences of Brazil's planned infrastructure in Amazonia. *Environmental Management* 30(6): 748-763.
- Fearnside, P.M. 2007. Brazil's Cuiabá-Santarém (BR-163) Highway: The environmental cost of paving a soybean corridor through the Amazon. *Environmental Management* 39(5): 601-614.
- Fearnside, P.M. & R.I. Barbosa. 1998. Soil carbon changes from conversion of forest to pasture in Brazilian Amazonia. *Forest Ecology and Management* 108(1-2): 147-166. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(98\)00222-9](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(98)00222-9)
- Fearnside, P.M. & P.M.L.A. Graça. 2006. BR-319: Brazil's Manaus-Porto Velho Highway and the potential impact of linking the arc of deforestation to central Amazonia. *Environmental Management* 38(5): 705-716.
- Fearnside, P.M., P.M.L.A. Graça, E.W.H. Keizer, F.D. Maldonado, R.I. Barbosa & E.M. Nogueira. 2009. Modelagem de desmatamento e emissões de gases de efeito estufa na região sob influência da rodovia Manaus-Porto Velho (BR-319). *Revista Brasileira de Meteorologia* 24(2): 208-233. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862009000200009>
- Fearnside, P.M. & W.F. Laurance. 2004. Tropical deforestation and greenhouse gas emissions. *Ecological Applications* 14(4): 982-986.
- Fearnside, P.M.; Leal Jr., N. & Fernandes, F.M. 1993. Rainforest burning and the global carbon budget: biomass, combustion efficiency, and charcoal formation in the Brazilian Amazon. *Journal of Geophysical Research* 98(D9): 16733-16743.
- Forster & 51 outros. 2007. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. p. 129-234. In: S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor & H.L. Miller (Eds.). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido. 996 p.
- Higuchi, N.; Santos, J.M.; Imanaga, M.; Yoshida, S. 1994. Aboveground biomass estimate for Amazonian Dense Tropical moist forest. *Memories of the Faculty of Agriculture (Kagoshima University)* 30: 43-54.
- Kirby, K.R., W.F. Laurance, A.K. Albernaz, G. Schroth, P.M. Fearnside, S. Bergen, E.M. Venticinque & C. da Costa. 2006. The future of deforestation in the Brazilian Amazon. *Futures* 38: 432-453.
- Klinge, H.; Rodrigues, W.A. 1974. Phytomass estimation in a Central Amazonian rain Forest. In: H. E. Young (Ed.), *IUFRO Biomass Studies*. University Press, Maine, E.U.A. p. 339-350.
- Kok, K., A. Farrow, A. Veldkamp, P.H. Verburg. 2001. A method and application of multiscale validation in spatial land use models. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 85: 223-238.
- Laurance, W.F., S. Bergen, M.A. Cochrane, P.M. Fearnside, P. Delamonica, S. D'Angelo, C. Barber & T. Fernandes. 2005. The future of the Amazon. pp. 583-609 In: E. Bermingham, C.W. Dick and C. Moritz (eds.) *Tropical Rainforests: Past, Present and Future*. University of Chicago Press, Chicago, Illinois, E.U.A. 1004 p.
- Laurance, W.F., M.A. Cochrane, S. Bergen, P.M. Fearnside, P. Delamônica, C. Barber, S. D'Angelo & T. Fernandes. 2001. The Future of the Brazilian Amazon. *Science* 291: 438-439.
- Laurance, W.F.; Fearnside, P.M.; Laurance, S.G.; Delamônica, P.; Lovejoy, T.E.; Rankin-de Merona, J.M.; Chambers, J.Q.; Gascon, G. 1999. Relationship between soils and Amazon forest biomass: a landscape-scale study. *Forest Ecology and Management* 118: 127-138.
- Margulis, S. 2003. *Causas do Desmatamento na Amazônia Brasileira*. Banco Mundial, Brasília, DF.
- Nascimento, M.T.; Barbosa, R.I.; Villela, D.M. & Proctor, J. 2007. Above-ground biomass changes over an 11-year period in an Amazon monodominant forest and two other lowland forests. *Plant Ecology* 192: 181-191.
- Nepstad, D.C., J.P. Capobianco, A.C. Barros, G. Carvalho, P. Moutinho, U. Lopes & P. Lefebvre. 2000. Avanço Brasil: Os Custos Ambientais para Amazônia. Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (IPAM), Belém, Pará, Brasil. 24 p. (disponível em: <http://www.ipam.org.br/avanca/politicas.htm>).
- Nepstad, D., G. Carvalho, A.C. Barros, A. Alencar, J.P. Capobianco, J. Bishop, P. Moutinho, P. Lefebvre, U.L. Silva, Jr. & E. Prins. 2001. Road paving, fire regime feedbacks, and the future of Amazon forests. *Forest Ecology and Management* 154(3): 395-407.
- Nogueira, E.M., P.M. Fearnside, B.W. Nelson, R.I. Barbosa & E.W.H. Keizer. 2008. Estimates of forest biomass in the Brazilian Amazon: New allometric equations and adjustments to biomass from wood-volume inventories. *Forest Ecology and Management*

- 256(11): 1853-1857. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.07.022>
- Nogueira, E.M., P.M. Fearnside, B.W. Nelson & M.B. França. 2007. Wood density in forests of Brazil's 'arc of deforestation': Implications for biomass and flux of carbon from land-use change in Amazonia. *Forest Ecology and Management* 248(3): 119-135.
- Nogueira, E.M.; Nelson, B.W. & Fearnside, P.M. 2005. Wood density in dense Forest in Central Amazonia, Brazil. *Forest Ecology and Management* 208: 261-286.
- Nogueira, E.M., B.W. Nelson & P.M. Fearnside. 2006. Volume and biomass of trees in central Amazonia: Influence of irregularly shaped and hollow trunks. *Forest Ecology and Management* 227(1-2): 14-21.
- Pfaff, A.; Robalino, J.; Walker, R.; Aldrich, S.; Caldas, M.; Reis, E.; Perz, S.; Bohrer, C.; Arima, E.; Laurance, W. & Kirby, K. 2007. Road investments, spatial spillovers, and deforestation in the Brazilian Amazon. *Journal of Regional Science* 47: 109-123.
- Rede Temática GEOMA. 2006. Análises preliminares dos efeitos espaciais de áreas protegidas na ALAP da BR 319. Grupo Permanente de Trabalho Interministerial sobre Desmatamento na Amazônia, Casa Civil da Presidência da República, Brasília, DF.
- Reis, E.J. & R. Guzmán. 1994. An Econometric model of Amazon deforestation. In: Brown, K. & Pearce, D.W. (Eds.) *The Causes of Tropical Deforestation: The Economic and Statistical Analysis of Factors Giving Rise to the Loss of Tropical Forests*. University College London Press, London, Reino Unido, p.172-191,
- Reis, E.J. & Margulis, S. Options for slowing Amazon jungle clearing. In: R. Dornbusch & J. Poterbar (Eds.) 1991. *Economic Policy Responses to Global warming*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, E.U.A., p. 335-375.
- Reis, E.J. & Weinhold, D. 2004. Land use and transportation costs in the Brazilian Amazon. University of Wisconsin-Madison, Department of Agriculture & Applied Economics Staff Paper No. 467. Madison, Wisconsin, E.U.A. 31 p.
- Rodrigues, H.O.; Soares-Filho, B.S.; Costa & W.L.S. 2007. Dinamica EGO, uma plataforma para modelagem de sistemas ambientais. In: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 13. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, São Paulo.
- Schimel, D. & 75 outros. 1996. Radiative forcing of climate change. p. 65-131. In: J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg & K. Maskell (eds.). *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.
- Soares-Filho, B.S. 2004. SIMAMAZONIA. Centro de Sensoriamento Remoto (CSR), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Minas Gerais. <http://www.csr.ufmg.br/simamazonia>
- Soares-Filho, B.S., A.A. Alencar, D.C. Nepstad, G.C. Cerqueira, M. del C.V. Diaz, S. Rivero, L. Solórzano & E. Voll. 2004. Simulating the response of land-cover changes to road paving and governance along a major Amazon highway: The Santarém-Cuiabá corridor. *Global Change Biology* 10(5): 745-764.
- Soares-Filho, B.S., G.C. Cerqueira & C.L. Pennachin. 2002. DINAMICA-A stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *Ecological Modelling* 154: 217-235.
- Soares-Filho, B.S., L. Corradi Filho, G.C. Cerqueira & W.L. Araújo. 2003. Simulating the spatial patterns of change through the use of the DINAMICA model. *Anais XI SBSR, Belo Horizonte, Brasil*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, São Paulo. p. 721-728.
- Soares-Filho, B. & Dietzsch, L. 2008. Reduction of Carbon Emissions Associated with Deforestation in Brazil: The Role of the Amazon Region Protected Areas Program (ARPA). World Wide Fund for Nature (WWF), Brasília, DF. 32 p.
- Soares-Filho, B.S., D.C. Nepstad, L. Curran, G.C. Cerqueira, R.A. Garcia, C.A. Ramos, P. Lefebvre, P. Schlesinger, E. Vol & D. McGrath. 2005. Cenários de desmatamento para Amazônia. *Estudos Avançados* 19(54): 138-152.
- Soares-Filho, B.S., D.C. Nepstad, L.M. Curran, G.C. Cerqueira, R.A. Garcia, C.A. Ramos, E. Voll, A. McDonald, P. Lefebvre & P. Schlesinger. 2006. Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature* 440: 520-523.
- Souza Jr., C., A. Brandão Jr., A. Anderson & A. Veríssimo. 2005. Avanço das estradas endógenas na Amazônia. *O Estado da Amazônia*, Instituto do Homem e Meio Ambiente na Amazônia (IMAZON), Belém, Pará. 2 p. (Disponível em: <http://www.imazon.org.br/downloads/download.asp?id=234>)
- Veldkamp, A., P.H. Verburg, K. Kok, G.H.J. de Koning, J. Priesse & A.R. Bergsma. 2001. The need for scale sensitive approaches in spatially explicit land use change modeling. *Environmental Modeling and Assessment* 6c: 111-121.
- Ventana Systems Inc. 2007. Vensim from Ventana Systems Inc. <http://www.vensim.com/>
- Verburg, P.H., W. Soepboer, A. Veldkamp, R. Limpiada, V. Espaldon & S.S.A. Mastura. 2002. Modeling the spatial dynamics of regional land use: the CLUE-S model. *Environmental Management* 30(3): 391-405.