

Universidade Federal de Minas Gerais

Instituto de Geociências

Programa de pós-graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais

**MODELAGEM TERRITORIAL DE CENÁRIO DA EXPANSÃO DAS
PLANTAÇÕES DE EUCALIPTO NO BRASIL**

Alessandro Ribeiro Campos

Belo Horizonte
2013

Alessandro Ribeiro Campos

MODELAGEM TERRITORIAL DE CENÁRIO DA EXPANSÃO DAS
PLANTAÇÕES DE EUCALIPTO NO BRASIL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Britaldo Silveira Soares Filho.

C198m
2013

Campos, Alessandro Ribeiro.
Modelagem territorial de cenário da expansão das plantações de eucalipto no Brasil [manuscrito] / Alessandro Ribeiro Campos – 2013.
xi, 65 f.: il. (color.)

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2013.

Orientador: Britaldo Silveira Soares Filho.

Bibliografia: f. 44-48.

Inclui apêndice.

1. Silvicultura – Teses. 2. Gestão territorial – Teses. 3. Eucalipto – Cultivo – Teses. I. Soares Filho, Britaldo Silveira. II. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 911.2:519.6



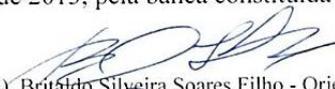
FOLHA DE APROVAÇÃO

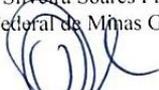
Modelagem territorial de cenário da expansão das plantações de eucalipto no Brasil

ALESSANDRO RIBEIRO CAMPOS

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, como requisito para obtenção do grau de Mestre em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, área de concentração ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS

Aprovada em 03 de dezembro de 2013, pela banca constituída pelos membros:


Prof(a). Britaldo Silveira Soares Filho - Orientador
Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG


Prof(a). Sebastião Renato Valverde
Universidade Federal de Viçosa - UFV


Prof(a). Ricardo Alexandrino Garcia
Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG

Belo Horizonte, 3 de dezembro de 2013.

Quando nos esforçamos continuamente,
algo muda em nós. Em algum ponto, você pode até mesmo
ser o maior peixe no seu laguinho, mas, sabe o que
normalmente acontece quando você alcança esse ponto?
À medida que você crescer, em pouco tempo será levado para uma
lagoa maior, onde você será o menor peixe outra vez! Por que isso acontece?
Para que você possa crescer e tornar-se um peixe ainda maior!

Robb D. Thompson

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por sua intrigante obra e a capacidade concedida.

A minha amada e apaixonante esposa, Grazielle Werneck Linhares, pelo amor dedicado, pela compreensão, incentivo, pela infindável paciência e por dividir comigo os momentos felizes e tristes, de apreensão e tranquilidade que essa trajetória nos proporcionou. Agradeço por sua participação, direta e indireta, e por ser instrumento para que a necessária resposta chegasse até mim na derradeira hora.

A meus pais, que não tiveram as mesmas oportunidades do que eu, e meus irmãos, Sandro Ribeiro Campos Junior, Sandreane Campos e Eduardo Campos, pelo ser humano que me tornei.

Agradeço ao orientador Britaldo Silveira Soares Filho, primeiramente pela exceção e oportunidade concedidas, pelo acesso, pelos direcionamentos no processo de aprendizado e de construção desse projeto, por fim, pela chance de experimentar a geociência de alto nível.

Agradeço ao Prof. Sebastião Renato Valverde, da Universidade Federal de Viçosa, que além de participar da banca de qualificação desse projeto, dispensou atenção e tempo para me apresentar a complexidade da área florestal brasileira, demonstrando plena disposição em ajudar.

A Laura Sonter, da University of Queensland e do Centre for Water in the Minerals Industry, que mesmo diante da dificuldade linguística se esforçou em discutir alguns pontos importantes da proposta inicial desse projeto.

A Fundação Estadual de Meio Ambiente - FEAM, por apoiar a minha capacitação.

Aos amigos do SISEMA e FEAM, Polynice Rabello Mourão Junior e Gilcele Cristina Silva, pelo incentivo, compreensão e apoio.

Aos amigos do Programa de mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais e do Centro de Sensoriamento Remoto, principalmente William Leles e Juliana Davis com quem tive o prazer de dividir discussões, desafios e o processo de desenvolvimento dos modelos compartilhados. Agradeço também ao Prof. Ricardo Alexandrino, pelas cento e vinte horas de métodos quantitativos de caixa preta aberta e contribuições para esse projeto.

RESUMO

O Brasil experimentou vários ciclos de expansão de projetos florestais, resultando hoje em uma área de 6,6 milhões de hectares de florestas plantadas. A demanda crescente e os preços atrativos de alguns produtos madeireiros, somados às vantagens competitivas da silvicultura apontam para a manutenção da expansão dos plantios no país. Essa tendência impõe a utilização e gestão do sistema terrestre tão eficiente quanto possível e remete à necessidade de conhecimento relativo à mudança do uso do solo associada à expansão das florestas plantadas. Neste estudo foi desenvolvido um modelo espacialmente explícito para projetar e simular a expansão dos plantios florestais no período de 2012-2022 no Brasil, assumindo um cenário sem desmatamento adicional e não competição com a produção das principais *commodities* agrícolas. O futuro nível de produção da silvicultura no país foi estimado a partir de planos publicados pelo governo brasileiro e nas tendências recentes de produção dos principais produtos madeireiros das florestas plantadas. O modelo espacial integra componentes de macro e micro-escala, de rentabilidade e favorabilidade climática, para simular a dinâmica espacial dos plantios florestais. Os resultados indicam que a demanda total por madeira de florestas plantadas em 2022 alcançará entre 191 milhões de m³ e 220 milhões de m³. Para suprir essa demanda industrial de madeira será necessário um ritmo médio anual de plantio de 400 a 460 mil hectares em novas áreas. A área total coberta pelas florestas plantadas é estimada em 9,9 milhões de hectares em 2022, o que representa uma expansão de 51% no intervalo de dez anos. Se considerar esse plantio em áreas antropizadas, somente essa expansão implica em uma redução de 1,5% das áreas de pastagens. Esse estudo demonstra a potencial viabilidade de expandir as florestas plantadas no Brasil, adicionalmente à expansão agrícola projetada e sem desmatamento diretamente associado, suscitando a possibilidade de ocupação daquelas áreas com potencial para recuperação produtiva. Colabora para estratégias de gestão territorial e portanto, para a utilização eficiente das terras disponíveis. Para tanto, são necessárias políticas públicas que efetivem o direcionamento da expansão do setor, minimizando potenciais conflitos e, sobretudo, os efeitos marginais da alocação do uso da terra, que poderiam neutralizar específicos benefícios ambientais.

Palavras-chave: Modelagem ambiental; gestão territorial; mudança do uso da terra; eucaliptocultura; DINAMICA EGO.

ABSTRACT

Brazil experienced several cycles of expansion of forestry projects, resulting today in an area of 6.6 million hectares of planted forests. The growing demand and attractive prices of some wood products, added to the competitive advantages of forestry suggest continued expansion of plantations in the country. This trend requires that the earth system is managed and used as efficient as possible and relates to the necessity of knowledge concerning the use change associated with the expansion of planted forest. In this study, a spatially explicit model was developed to project and simulate the expansion of forest plantations in Brazil in the period 2012-2022, assuming a scenario without further deforestation and no competition with the production of major brazilian agricultural commodities, occupying only pastures. The future level of production forestry in the country was estimated from published plans by the brazilian government and the trends in production of major wood products of planted forests. The spatial model integrates components of macro-and micro-scale, profitability and favorable climate, to simulate the spatial dynamics of forest plantations. The results indicate that the total demand for wood from forests planted in 2022 will reach between 191 million m³ and 220 million m³. To meet this demand for industrial wood an average annual rate of planting 400-460 hectares in new areas will be necessary. The total area covered by planted forests is estimated at 9.9 million hectares in 2022, representing an increase of 51% within ten years. If you consider this planting in disturbed areas, only this expansion implies a 1.5% reduction of grazing areas. This study demonstrates the potential feasibility of expanding the planted forests in Brazil, in addition to the projected agricultural expansion and deforestation without directly associated, raising the possibility of occupation of those areas with potential for productive recovery. Contributes to strategies for territorial management and thus for efficient use of available land. To do so, need public policies that enforce the direction of expansion of the sector, minimizing potential conflicts and, above all, the marginal effects of the allocation of land use, which could neutralize specific environmental benefits.

Palavras-chave: Environmental modeling; land management; land use change; Eucalyptus; DINAMICA EGO.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Produtividade florestal de folhosas e coníferas (2012)	14
Figura 2 – Evolução da produção anual de madeira na silvicultura e extração vegetal no Brasil (1990-2011) ...	15
Figura 3 - Evolução da produção por florestas plantadas de madeira em tora para uso industrial, segundo principais produtos (2007-2011)	16
Figura 4 – Evolução da participação do consumo de madeira em tora de florestas plantadas, segundo gênero (2007-2012).....	16
Figura 5 – Diagrama da modelagem desenvolvida.....	19
Figura 6 – Brasil, localização dos centros de transformação/consumo da madeira no país para carvão vegetal, celulose e painéis industrializados.....	27
Figura 7 – Volume estimado de madeira produzido por florestas plantadas no Brasil (2012-2022).....	29
Figura 8 – Área anual estimada colhida, plantada e total ocupada por florestas plantadas no Brasil (2012-2022)	31
Figura 9 - Estimativa do VPL, consolidado, para a atividade florestal no Brasil com finalidade de produção de carvão vegetal, celulose e painéis industrializados.....	32
Figura 10 - Estimativa do VAE, consolidado, para a atividade florestal no Brasil com finalidade de produção de carvão vegetal, celulose e painéis industrializados.....	33
Figura 11 - Favorabilidade climática simulada para plantios florestais.....	34
Figura 12 - Índices de acerto de alocação espacial do modelo em relação ao tamanho da janela de análise.	35
Figura 13- Mapas de densidade Kernel da localização das florestas plantadas em 2010 e 2022 (simulado)	38
Figura 14 - Padrão de uso da terra para o Brasil em 2022 resultante da simulação.....	39

Lista de tabelas

Tabela 1 – Produção projetada para os produtos de plantios de Eucalyptus no Brasil (m ³).....	30
Tabela 2 – Sumário das simulações de mudança de uso da terra pelo modelo.....	36
Tabela 3 – Área total consolidada de floresta plantada no Brasil 2012 e 2022	37

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABELAS.....	10
CONSIDERAÇÕES INICIAIS	12
1. INTRODUÇÃO	13
2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	18
2.1 VISÃO GERAL.....	18
2.2 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DOS PRODUTOS MADEIREIROS E ÁREA OCUPADA POR FLORESTAS PLANTADAS	20
2.3 CALIBRAÇÃO DO MODELO ESPACIAL	22
ANÁLISE DE RENTABILIDADE.....	24
2.4 ALOCAÇÃO DE FLORESTAS PLANTADAS.....	27
2.5 VALIDAÇÃO DOS MODELOS	28
3 RESULTADOS.....	29
3.1 PROJEÇÃO DA PRODUÇÃO E ÁREA OCUPADA.....	29
3.2 RENTABILIDADE E FAVORABILIDADE CLIMÁTICA	32
3.3 VALIDAÇÃO DA ALOCAÇÃO ESPACIAL	35
3.4 VALIDAÇÃO DO MODELO DE PROJEÇÃO	35
3.5 SIMULAÇÃO ESPACIAL	36
4 DISCUSSÃO.....	40
5 CONCLUSÃO	43
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
MATERIAL SUPLEMENTAR	

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A necessidade de preenchimento das lacunas de conhecimento da interação entre homens e o sistema terrestre têm levado ao desenvolvimento de uma ampla variedade de abordagens e plataformas de modelagem, principalmente de modelos espacialmente explícitos e dinâmicos que permitem a simulação do uso da terra e cenários (SOARES-FILHO, 2009; NAS, 2013). Embora, por definição, qualquer modelo fique aquém de incorporar todos os aspectos da realidade, ele fornece informações valiosas sobre o comportamento do sistema sob uma série de condições (VELKAMP, 2001).

Dentre as forças condutoras das mudanças no uso da terra, além dos aspectos políticos (VERBURG *et al.*, 2013), os fatores que afetam as demandas que serão alocadas na terra tem um papel significativo (SHEARER, 2009), como é o caso da ampliação da demanda mundial por madeira e produtos florestais de caráter sustentável (FAO, 2011; IPCC, 2012).

Através da estruturação da Política Nacional de Florestas Plantadas, o governo brasileiro espera que o setor florestal se consolide como uma atividade estratégica para o desenvolvimento do país, tanto no campo agro-industrial quanto no energético, seja para o suprimento do mercado interno quanto externo, com realização, em breve prazo, de seu potencial florestal (BRASIL, 2011).

Por outro lado, a possibilidade de ampliação dos plantios florestais remete em outros segmentos da sociedade brasileira a apreensão sobre a dimensionalidade e o modo como as áreas vão se expandir. Assim, é oportuno o conhecimento sobre as possibilidades de condução territorial desse processo assegurando coerência das múltiplas finalidades e minimizando potenciais conflitos e, sobretudo, efeitos marginais da alocação do uso da terra, que poderiam neutralizar específicos benefícios socioambientais proporcionados pelas florestas plantadas.

Alinhado a esse quadro, o modelo espacialmente explícito para a dinâmica das florestas plantadas no Brasil desenvolvido nesse estudo, utilizando a plataforma de modelagem DINAMICA EGO (SOARES-FILHO *et al.*, 2009), pode colaborar na estruturação de política pública mais territorializada e direcionada para a melhor utilização da terra.

Este trabalho é requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais, do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais. Optou-se, conforme disposto no regulamento do curso, pela dissertação em forma de artigo a ser submetido a periódicos científicos.

1. INTRODUÇÃO

Ao mesmo tempo em que se evidencia uma continuada diminuição da cobertura florestal nativa do planeta em cerca de 13 milhões de hectares por ano (UNEP, 2011), as florestas plantadas¹ estão prestes a se tornar a forma mais significativa do desenvolvimento florestal nas próximas décadas (FAO, 2010). A atual cobertura por essas formações florestais é estimada em cerca de 264 milhões de hectares (FAO, 2011), representando cerca de 7% da área global de florestas. Estudos realizados pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura – FAO indicam que no período entre 2000 e 2010 a área de florestas plantadas no mundo expandiu em média cinco milhões de hectares a cada ano, uma taxa anual de mudança de 2% (FAO, 2011).

Considerando a continuada ampliação da demanda por madeira e produtos florestais de caráter sustentável (FAO, 2010; IPCC, 2012), há fortes indicações que essa tendência de expansão persistirá no futuro (FAO, 2011), requerendo, conseqüentemente, um contínuo aumento da área de floresta plantada. Embora a necessidade de plantações florestais possa ser diminuída através do aumento da produtividade das plantações (FAO, 2020).

Este contexto intensifica o debate e o reconhecimento de seu papel, prevalecendo sua relevância e significativa contribuição a vários aspectos ambientais, sendo um dos principais a possibilidade de proporcionarem diminuição da pressão sobre florestas primárias e outros ecossistemas frente a demanda por produtos florestais (BRITO, 1996; FAO, 2011; FAO, 2006; PIKETTY *et al.*, 2009).

Brown (1999) argumenta que se mais florestas nativas devem ser protegidas e/ou os níveis de desmatamento devem ser reduzidos, o estabelecimento de plantações se torna cada vez mais necessário para compensar reduções da oferta de madeira de florestas nativas, reforçando a tendência de que a gestão de florestas para a produção sustentável de madeira no mundo irá aumentar no futuro.

As florestas plantadas representam atualmente um segmento estratégico para o Brasil. Em 2012 o saldo da balança comercial da indústria nacional de base florestal foi de USD 5,5 bilhões, com participação no superávit da balança comercial nacional de 28,1% (ABRAF, 2013). É prioridade à agenda nacional como uma das principais opções para estimular o crescimento econômico do país (BRASIL, 2011) e, juntamente com o restauro de florestas nativas (GOUVELLO *et al.*, 2010), contribuir positivamente para questões ambientais, como

¹ Segundo a FAO, floresta plantada é a definição para árvores plantadas em florestas semi-naturais e em plantações, produtivas e de proteção, que formam uma área maior unificado de mais de 0,5 ha.

diminuição das emissões líquidas de GEE, aumento da proteção de recursos hídricos e de solos e redução da pressão sobre florestas nativas.

No passado, o Brasil experimentou vários ciclos de expansão de projetos florestais, sobretudo de espécies do gênero *Eucalyptus*. Condições edafoclimáticas e fundiárias favoráveis, aliadas à política histórica de incentivo fiscal e investimento em pesquisa, proporcionaram a maior produtividade ($\text{m}^3/\text{ha}\cdot\text{ano}$) do mundo (Figura 1) (ABRAF, 2013) e consequentemente o menor ciclo de colheita (ABRAF, 2013; VALVERDE *et al.*, 2004), resultando na formação de extensas áreas com plantações no país.

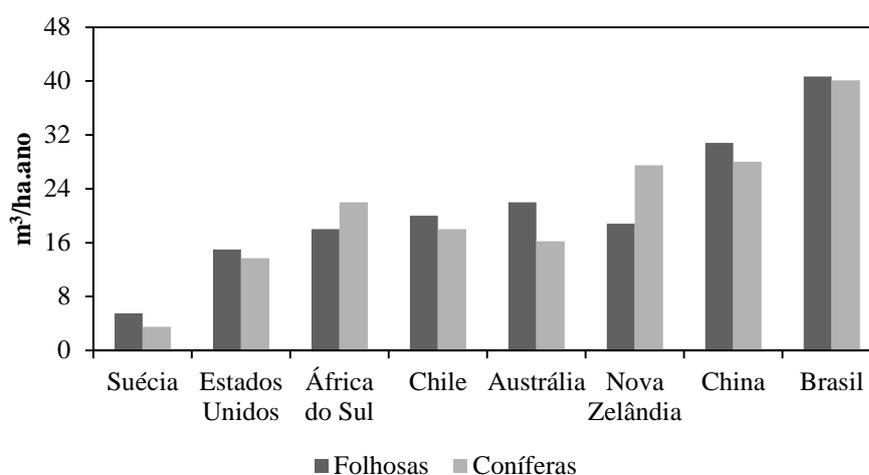


Figura 1 – Produtividade florestal de folhosas e coníferas (2012)

Em 2012, a área ocupada por plantios florestais no Brasil totalizou 6,6 milhões de hectares, sendo 70,8% correspondente à área com espécies do gênero *Eucalyptus*, 22% com gênero *Pinus* e 7,2% com outras espécies florestais (ABRAF, 2013). Entre os anos de 2005 e 2012, houve uma expansão na área de 26%, cerca de 1,4 milhões de hectares, representando uma taxa anual de crescimento de 3,3% no período.

A Figura 2 apresenta a evolução histórica da produção de madeira no Brasil entre 1990 a 2011 (IBGE, 2011). Em 2011 a produção anual de madeira em tora de plantios florestais (silvicultura) alcançou 194 milhões de m^3 , enquanto a produção por exploração dos recursos vegetais nativos (extração vegetal) totalizou 57 milhões de m^3 . Esse quadro demonstra a tendência de crescimento da demanda por produtos florestais e da gestão de florestas para a produção sustentável de madeira no Brasil.

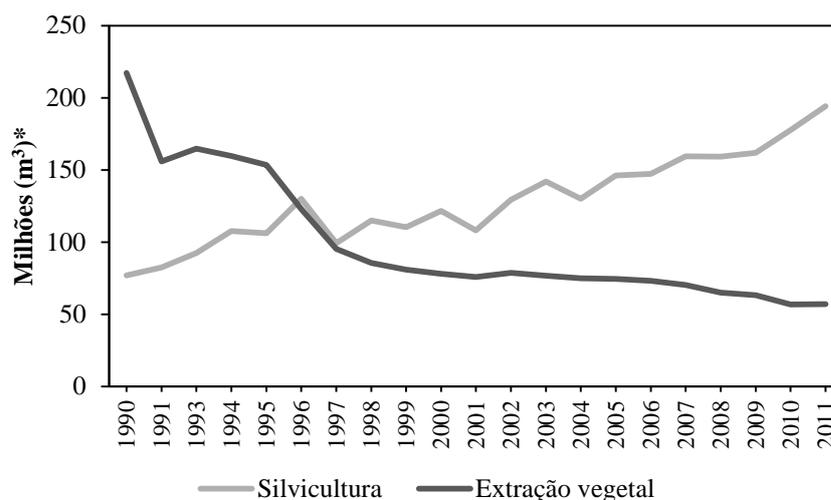


Figura 2 – Evolução da produção anual de madeira na silvicultura e extração vegetal no Brasil (1990-2011)

(*) Assumiu a densidade de 250 kg/m³ (EPE, 2012) para conversão do peso do carvão vegetal (unidade de origem) em volume de madeira

Segundo estimativas da Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas – ABRAF (ABRAF, 2013), historicamente no Brasil cerca 36% do volume total de madeira produzido na silvicultura é utilizado para a produção de celulose e papel, ao passo que a produção de serrados, carvão vegetal, painéis de madeira industrializada e compensados consomem, respectivamente, 15%, 10%, 7%, 3% (Figura 3) (ABRAF, 2012). O restante, cerca de 26%, é destinado a produção de lenha e uma pequena parcela para outros produtos florestais.

A Figura 3 expressa duas evidentes tendências do mercado brasileiro de produtos florestais. Primeiramente a diminuição da participação do setor de madeira mecanicamente processada. O consumo de madeira em tora de florestas plantadas do segmento de madeira serrada recuou em cerca de 1,5% ao ano no período entre 2005 e 2011. Outra tendência refere-se ao recuo do segmento de compensados, que no mesmo período apresentou uma diminuição média anual de 3,3%, recuando de 7,1 milhões de m³ em 2005 para 5,7 milhões em 2011.

Por outro lado, o mercado de painéis de madeira industrializada apresenta tendência de expansão, apresentando o maior crescimento médio anual dentre os produtos florestais brasileiros. Entre 2007 e 2011 a produção anual de painéis apresentou um crescimento de 9,9%, aumentando assim sua participação no consumo de madeira em tora de florestas plantadas.

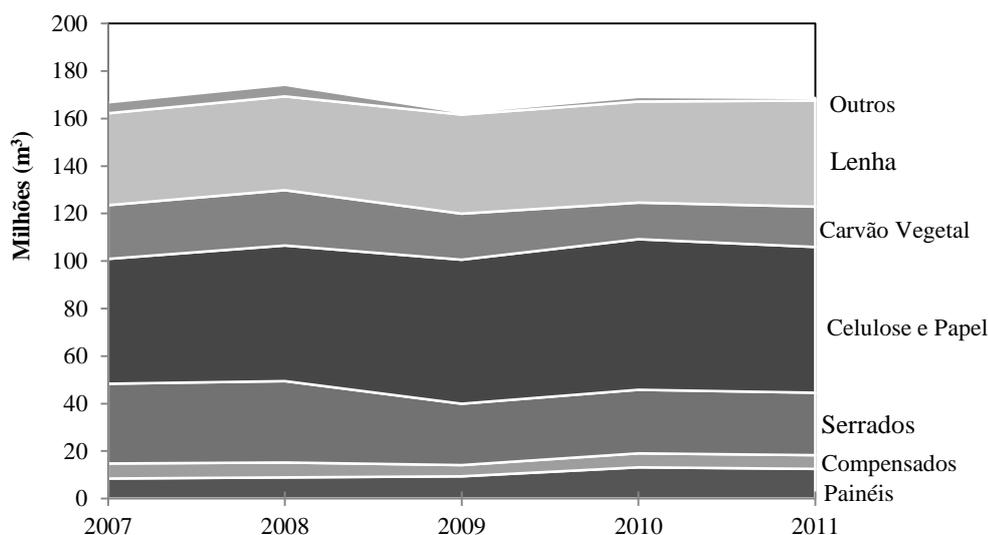


Figura 3 - Evolução da produção por florestas plantadas de madeira em tora para uso industrial, segundo principais produtos (2007-2011)

A participação do consumo de madeira em tora por gênero (Figura 4) (ABRAF, 2013) indica predominância do Eucalyptus na produção dos produtos industriais provenientes de plantios florestais, representando cerca de 72% (130,6 milhões de m³) em 2012. Nos últimos anos o Eucalyptus vem apresentando tendência de aumento na participação (3,8% a.a.), ao mesmo tempo em que permanece a tendência de diminuição do gênero Pinus, em cerca de 4% ao ano, em função de sua substituição pelo próprio Eucalyptus e por outras espécies, como a Teca.

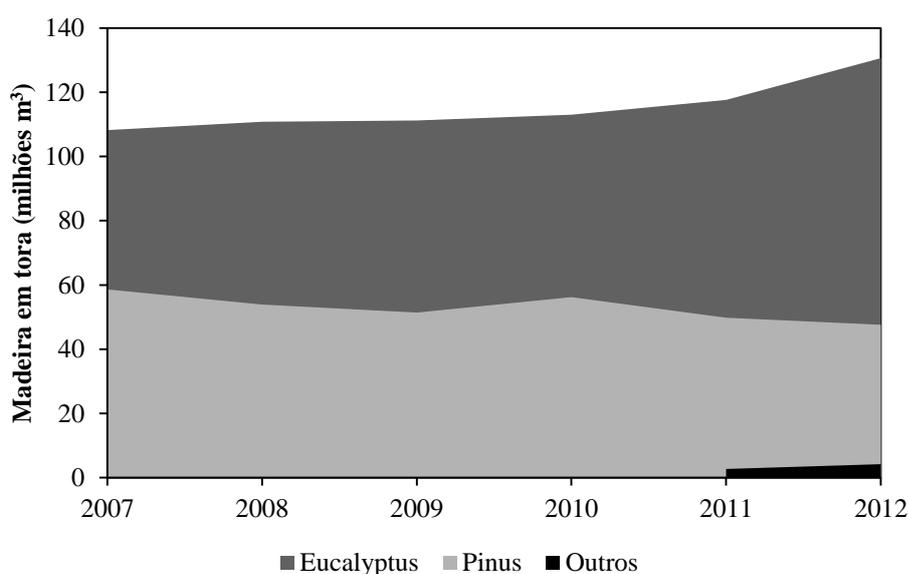


Figura 4 – Evolução da participação do consumo de madeira em tora de florestas plantadas, segundo gênero (2007-2012)

Os preços atrativos de madeira e derivados, em função do crescimento dos mercados interno e externo, têm pressionado o aumento da oferta pelos produtos florestais, impactando positivamente a atratividade do negócio florestal (ABRAF, 2013; VALVERDE *et al.*, 2004). Por exemplo, madeira *In Natura*, painéis industrializados e carvão vegetal mantêm, após a crise econômica mundial em 2008, taxas anuais de aumento dos preços nominais relativamente constantes (ABRAF, 2013).

Aliado a isso, as vantagens competitivas da silvicultura no país e a estruturação de específicas políticas, como a política nacional de florestas plantadas (BRASIL, 2011), apontam à continuidade da expansão dos plantios florestais no Brasil nos próximos anos. Essa tendência é reforçada por determinadas estratégias estabelecidas pelo governo brasileiro, dentre elas a meta de aumento da área de florestas plantadas, para alcance dos compromissos assumidos nas metas voluntárias de redução de emissão de gases de efeito estufa para mitigação dos efeitos das mudanças climáticas (BRASIL, 2012).

Essa tendência de expansão das florestas plantadas, por outro lado, suscita preocupação em termos dos impactos advindos da mudança do uso do solo, haja vista a necessidade de terra para sua alocação.

Isso está associado ao fato da mudança no uso da terra ser um dos principais processos pelos quais os seres humanos afetam o funcionamento do sistema terrestre, tendo implicações importantes para uma série de aspectos ligados ao ambiente físico e social, tais como: nas interações biosfera/atmosfera, na diversidade genética e de espécies em *habitat* ameaçado, condições do solo, da água e dos fluxos de sedimentos, na vulnerabilidade dos ecossistemas e dos grupos sociais e emissão de CO₂ (SOARES-FILHO *et al.*, 2006; ROUNSEVELL *et al.*, 2012; VELDKAMP e VERBURG, 2004; WAINWRIGHT e MULLIGAN, 2004). Esses potenciais impactos estimulam globalmente a pesquisa da compreensão das mudanças no uso da terra e as suas principais causas e efeitos (ROUNSEVELL *et al.*, 2012).

Todo esse quadro no presente contexto impõe a necessidade de gestão territorial apropriada para alocação do uso da terra, visto, dentre outros, a possibilidade de competição com a produção de alimentos e de aumento da pressão para conversão de florestas e vegetação nativa.

Shearer (2009) expressa essa apreensão em nível global, indicando que a futura demanda por alimentos, madeira, fibras e combustíveis a partir de biomassa só poderá ser viabilizada se as terras disponíveis e os recursos hídricos em escala globais forem utilizados e

geridos de forma tão eficiente quanto possível. Para isso, torna-se necessário direcionar as políticas públicas afim de promover tal conciliação, visando sobretudo mitigar os efeitos.

No Brasil, diversos estudos de modelagem do uso da terra são desenvolvidos (BOWMAN *et al.*, 2012; CÂMARA *et al.*, 2005; GALFORD *et al.*, 2013; GOUELLO *et al.*, 2010; LEITE *et al.*, 2012; MICHALSKI *et al.*, 2010; OLIVEIRA *et al.*, 2013; SOARES-FILHO *et al.*, 2012), no entanto há poucos esforços focados em uma visão geográfica das mudanças em curso e no futuro padrão de uso da terra associado à atividade de florestas plantadas no país.

Assim, esse estudo visa dimensionar e montar um panorama geográfico da expansão das florestas plantadas no Brasil (considerando o gênero *Eucalyptus*), subsidiando a necessidade de conhecimento, a partir do emprego da modelagem espacialmente explícita de mudança do uso da terra, de como as áreas de plantio podem se expandir de modo a produzir menos impactos e minimizando potenciais conflitos.

Apresentando a geografia dessa expansão, pretende-se então contribuir para a estrutura de políticas públicas estratégicas de gestão territorial, inclusive de financiamento e investimento, com foco específico nas florestas plantadas, assim como o planejamento do setor florestal brasileiro.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Visão geral

A Figura 5 ilustra o modelo conceitual da projeção e simulação espacial.

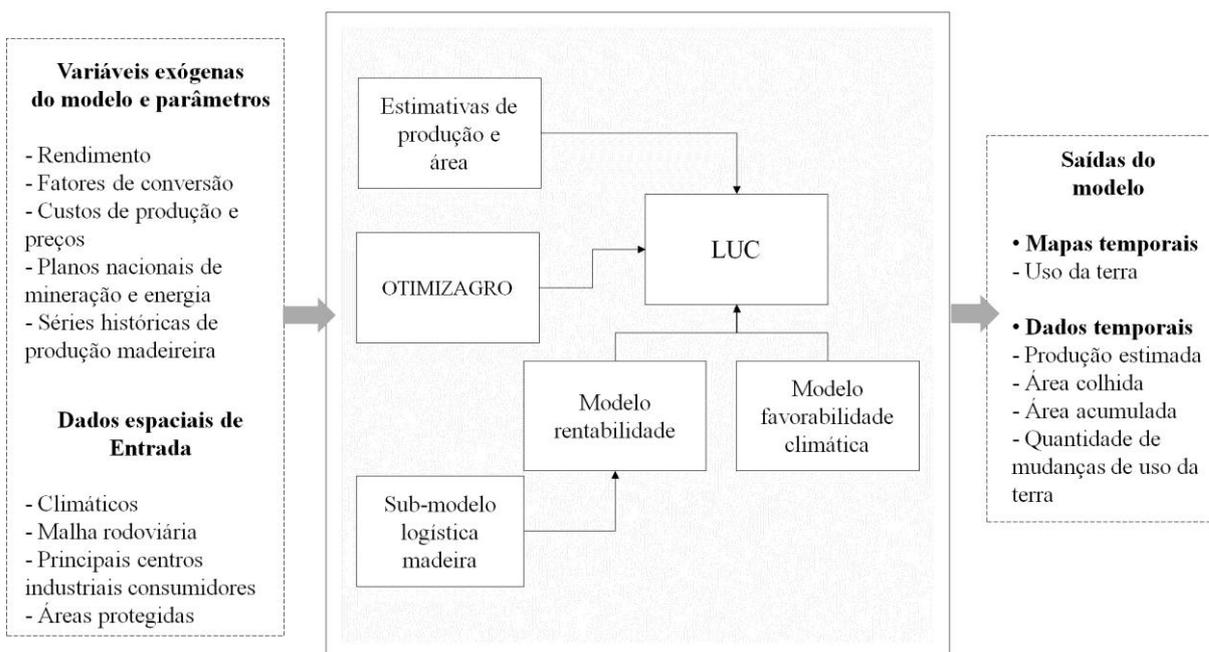


Figura 5 – Diagrama da modelagem desenvolvida

Na primeira parte do modelo é estimado o nível de produção de produtos madeireiros de florestas plantadas, considerando o gênero *Eucalyptus*, a cada passo de tempo. A partir disso é estimado o volume de madeira em tora consumido e assim obtida a área colhida e total plantada correspondente, assumindo a persistência das atuais características produtivas e de rendimento da silvicultura nacional. Os plantios são então distribuídos entre as regiões brasileiras.

Em seguida, o módulo LUC (*Land Use Change*) do modelo com resolução espacial de 500 metros, por um conjunto de componentes, calcula e aloca espacialmente as transições para floresta plantada com base em um mapa de probabilidade de transição, também calculado pelo módulo. Esse mapa associa dois aspectos relevantes, desenvolvidos em dois modelos complementares: a favorabilidade climática, que indica a propensão à ocorrência do plantio dadas as condições climáticas médias locais; e as superfícies de rentabilidade, visto que os projetos florestais tendem a se concentrar em regiões onde aspectos regionais e logísticos favorecem a geração de economias de escala e, conseqüentemente, a elevação de seus níveis de competitividade. Esse último aspecto é subsidiado por um sub-modelo de logística que calcula superfícies de custo acumulado do custo de transporte de madeira de florestas plantadas no Brasil.

O módulo LUC do modelo e seus componentes espaciais foram elaborados utilizando o software DINAMICA-EGO (SOARES-FILHO *et al.*, 2009), uma plataforma de modelagem ambiental para o desenvolvimento de modelos analíticos e espaço-temporais, disponibilizando uma biblioteca de algoritmos para análise e simulação de fenômenos (SOARES-FILHO *et al.*, 2013).

A área disponível para mudança de uso foi definida assumindo que não haveria desmatamento adicional e considerando que apenas a área disponível de pastagens poderia ser convertida, sem competição com as áreas para a produção das principais *commodities* agrícolas. Esse aspecto foi assegurado pela utilização dos padrões de uso do solo simulados pelo modelo OTIMIZAGRO, o qual fornece a paisagem base para execução das transições.

As saídas do modelo são séries temporais de dados e mapas do padrão de uso do solo mudando anualmente, que, além de subsidiar análises, podem servir como entrada para outros modelos.

2.2 Estimativa da produção dos produtos madeireiros e área ocupada por florestas plantadas

Para o cenário de referência neste estudo, assumiu a hipótese conservadora de manutenção das instituições (legislação, estrutura dos órgãos governamentais, falhas de mercado e regras informais) e da infraestrutura logística para o escoamento da produção. Assim, para avaliação do futuro nível de produção da silvicultura no Brasil, foi estimada a produção dos principais produtos madeireiros das florestas plantadas (ABRAF, 2012): carvão vegetal; celulose; e painéis de madeira industrializada (MDP, MDF e chapas de fibra). Como a recente tendência (Figura 4) sugere a tendência de não expansão do *Pinus* no Brasil, assumiu a manutenção da área correspondente a esse gênero florestal. Assim, não foram modelados os produtos associados, visto que por consequência não apresentam tendência de expansão (Figura S2).

A evolução em termos de área colhida parte do princípio que essas se expandiram para fornecer o nível de produção necessário no ano em que a plantação será colhida (FEARNSIDE, 1998).

Estudos anteriores, como Soares *et al.* (2004) e Vital e Pinto (2009), evidenciam a relação direta da produção do carvão vegetal no Brasil com a produção nos setores de metalurgia e siderurgia, sugerindo que a demanda por esse insumo é sensível, principalmente, a variações na quantidade produzida de ferrogusa, aço e ferroligas. Nesse sentido, optou-se por utilizar projeções consistentes e robustas para a produção desses produtos disponíveis por

meio do Plano Nacional de Mineração 2030 – PNM/2030 (MME, 2011) com vistas a estimar a produção futura de carvão vegetal com origem nas florestas plantadas brasileiras.

Como o processo de redução do minério de ferro praticado no Brasil, em que se obtém o ferro gusa, aço e das ferroligas há a utilização do coque de carvão mineral ou do carvão vegetal como agente termo-redutor (MME, 2009; SINDIFER, 2012), assumiu-se a manutenção das proporções históricas de uso desses agentes. Para dar maior caráter probabilístico, utilizou-se uma função de distribuição normal de probabilidade para estimativa da proporção de uso do carvão vegetal em cada passo de tempo, cujos parâmetros de média e desvio padrão foram obtidos das séries históricas.

Do mesmo modo, foram estimadas as proporções relativas à origem da madeira para a produção do carvão vegetal. Estudos evidenciam o uso misto pela indústria siderúrgica nacional de carvão vegetal de origem em florestas nativas e de plantadas (AMS, 2008; DUBOC *et al.*, 2007; MORELLO, 2009). Apesar de que, atualmente, em determinadas regiões o uso de florestas plantadas supera significativamente o uso de nativas, em outras, isso não ocorre, sobretudo nos estados do Pará e Maranhão (FEARNSIDE, 1998; MORELLO, 2009). Assim, foi considerada a manutenção dessa relação (uso misto) ao longo dos anos projetados, de acordo com a série histórica de 2000-2008 (Tabela S2) (AMS, 2008).

Como há indicações de que o consumo legal de produtos ou subprodutos originados da vegetação nativa, em especial o carvão vegetal, reduzirá progressivamente principalmente em Minas Gerais (MINAS GERAIS, 2009), o maior consumidor desse produto, um cenário alternativo de uso não misto é factível para os próximos anos. Esse cenário foi desenvolvido considerando-se um aumento linear de 5,8%aa do uso de carvão de origem em florestas plantadas, com proporcional redução de nativa, obtendo o percentual de 95% no uso a partir de 2018. O processo de estimativa da produção de carvão vegetal é detalhado no material suplementar desse estudo.

Para a estimativa da produção dos demais produtos madeireiros das florestas plantadas, partiu-se das taxas médias geométricas de produção verificadas no período entre 2000 e 2011 (Tabela S5), extrapolando-as para o futuro.

A estimativa do volume de madeira em tora consumido, a partir da produção dos produtos modelados, foi obtida pelos fatores de conversão representativos da equivalência entre o consumo de madeira em tora e a produção de determinado produto (Tabela S6). A combinação desse volume e o rendimento esperado das espécies florestais na idade de corte

por unidade de área (m³/ha) possibilitou a estimativa da área de floresta colhida (Ac), de acordo com a equação 1.

$$Ac = \sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_i P_i}{R_k} \right) \quad (1)$$

onde Q_i é a quantidade produzida do produto i no ano, P_i o fator de conversão do produto i e R_k o rendimento esperado do Eucalyptus, assumindo o Incremento Médio Anual – IMA de 39,5 (m³/ha.ano) (ABRAF, 2012) e o ciclo típico de 7 anos praticado para o gênero e os produtos modelados. A área total de floresta plantada em determinado ano (Fp_t) foi obtida tal como expressado na equação 2 (ABRAF, 2012):

$$Fp_t = Fp_{t-1} - Ac_t + P_t \quad (2)$$

em que Fp_{t-1} é a área total de floresta no ano anterior (considerou-se a área inicial de 6.515.844 hectares referente ao ano de 2011), Ac_t a área total colhida de floresta plantada e P_t a área total plantada no ano, corresponde a produção/colheita que ocorrerá no ano $t+7$ para o eucalipto. A correspondência entre o produto produzido e a espécie florestal utilizada é detalhada no material suplementar desse estudo.

A taxa de reflorestamento, determinada em macro-escala, é distribuída espacialmente de acordo com fatores regionais. A partir do nível de estruturação e desenvolvimento do mercado regional dos produtos modelados (ABRAF, 2013; BRASIL, 2011) e da série histórica (2009-2011) da produção de madeira na silvicultura pelos estados produtores (IBGE, 2011), que sugere as recentes tendências regionais de expansão, a projeção de área foi dividida entre as regiões brasileiras.

2.3 Calibração do modelo espacial

O processo de calibração do modelo espacial de alocação foi composto por métodos aplicados para obtenção do mapa de probabilidade de transição, o qual representa as áreas mais favoráveis para a mudança de uso modelada (SOARES-FILHO *et al.*, 2009). A seleção, pelo módulo LUC do modelo, das células do mapa de base do padrão de uso do solo em que ocorrerá a transição de classe na simulação, de pastagem para floresta plantada, é baseada no mapa de probabilidade de transição. Esse mapa representa as áreas mais favoráveis para a mudança.

Tendo em vista as limitações em representar, espaço-temporalmente, no mapa de probabilidade de transição as adaptações proporcionadas pelas técnicas e as tecnologias empregadas para formação dos plantios, optou-se por utilizar variáveis climáticas espacializadas para a indicação de regiões mais favoráveis ao plantio em termos climáticos médios locais. Essas compuseram o conjunto de variáveis ambientais, verificadas de modo empírico, que influenciam as transições.

Por outro lado, a ocorrência de projetos florestais em determinada localidade é produto também de outras variáveis, sobretudo de ordem econômica (SILVA *et al.*, 2002). Assim, foi analisada a variação espacial da rentabilidade potencial da atividade florestal com o objetivo de compreender a dinâmica espacial das formações de florestas plantadas e compor, conjuntamente a favorabilidade climática, a probabilidade de transição. Os métodos empregados para obtenção desses mapas são detalhados nos tópicos seguintes.

Os mapas resultantes da favorabilidade climática e as superfícies de rentabilidade potencial da atividade florestal foram normalizados. Além desses aspectos, foram utilizados os mapas das áreas protegidas brasileiras, para desfavorecer as transições nesses locais, e da distância normalizada às rodovias, para que a atratividade das áreas relativamente próximas às rodovias seja considerada na simulação.

O mapa de probabilidade de transição foi obtido pela associação desses componentes, sendo o resultado equalizado para ser representado com 65.535 níveis de cinza (Figura S9).

Favorabilidade climática

A propensão à ocorrência de certo cultivo dadas as condições climáticas médias locais em termos de disponibilidade hídrica e média termal representa a favorabilidade climática. Esse aspecto é caracterizado pela relação, verificada empiricamente, das variáveis climáticas e as mudanças no espaço geográfico.

Para verificar a relação entre a ocorrência atual das formações florestais e as características climáticas gerais dos locais correspondentes, optou-se por utilizar o método *Weights of Evidence* (Pesos de Evidência) (GOODACRE *et al.*, 1993; BONHAM-CARTER, 1994).

Trata-se de um método bayesiano tradicionalmente utilizado no campo da geoestatística que foi adaptado para o estudo das mudanças de cobertura e uso da terra por Soares-Filho *et al* (2002). O efeito de cada variável espacial em uma ocorrência é computado de forma independente de uma solução combinada (SOARES-FILHO *et al.*, 2009).

Desse modo, a favorabilidade foi caracterizada como a probabilidade de ocorrência, célula a célula, de um plantio florestal dado às características normais climatológicas correspondentes, conforme equação 3 e 4:

$$P(\text{PixelFlorestaPlantada}|A \cap B \cap C \cap \dots \cap N)_{(x,y)} = \frac{e^{\sum_{k=1}^n W_k^+(x,y)}}{1 + e^{\sum_{k=1}^n W_k^+(x,y)}} \quad (3)$$

onde

$$W_k^+ = \ln \left(\frac{P(B_k | \text{PixelFlorestaPlantada})}{(B_k | \overline{\text{PixelFlorestaPlantada}})} \right) \quad (4)$$

O termo $P(\text{FlorestaPlantadaPixel}|A \cap B \cap C \cap \dots \cap N)_{(x,y)}$ é a probabilidade de ocorrência de florestas plantadas dada a ocorrência das variáveis exploratórias climáticas A, B, C, N na célula (x,y) e W_k^+ é o somatório dos coeficientes de peso de evidência para a categoria k das variáveis.

Esse modelo foi calibrado baseando-se na localização das florestas plantadas do mapa de uso do solo para o Brasil para 2010 desenvolvido por Gouvello *et al* (2010). Considerou-se neste estudo a climatologia média para o Brasil, em termos de precipitação e temperatura média apresentadas sob a forma de normais climatológicas distribuídas em mapas matriciais (fontes indicadas na Tabela S1), e no cálculo dos excedentes e déficits hídricos mensais baseados nas normais climatológicas, utilizando o modelo espacializado do Balanço Hídrico Climatológico desenvolvido por Lima *et al*, (2012).

Os coeficientes dos pesos de evidência da ocorrência dos plantios em função das variáveis são apresentados no material suplementar desse estudo.

Análise de rentabilidade

A avaliação de viabilidade econômica no setor florestal é regida pelo mesmo princípio de qualquer atividade econômica, que está baseada em se comparar aos custos decorrentes do processo produtivo com as receitas obtidas com a venda do produto final (BERGER e GARLIPP, 1982). Silva *et al* (2002) argumentam que a avaliação dos projetos florestais deve-se basear em seu fluxo de caixa, que consiste nos custos e nas receitas distribuídos ao longo da vida útil do empreendimento.

Assim, foram modeladas superfícies espaço-econômicas representando a variação espacial da rentabilidade potencial da atividade florestal utilizando o Valor Presente Líquido –

VPL, método de avaliação usualmente utilizado visando indicar a efetividade econômica de empreendimentos florestais (BERGER e GARLIPP, 1982; RODRIGUES, 1991; REZENDE e OLIVEIRA, 2001; SILVA e FONTES, 2005), conforme equação 5:

$$VPL = \sum_{t=0}^n \frac{R_t}{(1+i)^t} - \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+i)^t} \quad (5)$$

em que R_t = Receitas no ano t , C_t = Custos no ano t , i = taxa de juros ou de desconto e t = tempo em anos. Embora muito sensível à taxa de desconto utilizada, o VPL é um dos melhores métodos, conduzindo geralmente ao resultado correto (SILVA *et al.*, 2002). Assumi o horizonte de 21 anos e a uma taxa de juros de 5%.

Foi utilizado o Valor Anual Equivalente – VAE (SILVA e FONTES, 2005) para representar a quantia anual que pagaria exatamente o VPL dentro do horizonte de tempo considerado. Esse critério, útil na comparação de investimentos com horizontes diferentes (REZENDE e OLIVEIRA, 2001; RODRIGUES, 1991), é calculado segundo a equação 6.

$$VAE = \frac{VPL * i}{[1 - (1+i)^{-n}]} \quad (6)$$

em que n = duração do projeto.

Baseou-se no fluxo de caixa típico e atual de projetos florestais no Brasil apresentado no Anuário da Agricultura Brasileira – AGRIANUAL 2012 (FNP, 2012). O cálculo do VPL foi fundamentado nos custos comuns (que ocorrem independentemente da finalidade da exploração) e específicos (para o caso do carvão vegetal) da atividade florestal identificados por Guedes *et al.*, (2011). Os custos e preços adotados são detalhados na Tabela S9 do material suplementar desse estudo.

Como não há dados disponíveis dos custos espacialmente específicos para as diversas regiões brasileiras produtoras, a espacialização do VPL foi determinada basicamente pelo custo de transporte. Esse item de custo tem alta participação nos custos finais da madeira (pode representar 50% dos custos segundo Canto *et al.*, 2006) e diretamente relacionado com a distância percorrida.

No Brasil, o transporte por meio rodoviário representa 85% de toda a madeira que é transportada e, ainda, 62% de todos os produtos transportados no país (SILVA *et al.*, 2007; MACHADO *et al.*, 2009).

O custo unitário de transporte da madeira é calculado empregando-se a seguinte equação (SILVA *et al.*, 2007):

$$CT = \frac{Pf}{Cap} 2D \times P \quad (7)$$

em que: CT = custo de transporte; Pf = fator indicativo do preço médio do frete no mercado por km (R\$ 2,42/km); Cap = capacidade de carga² (28,6 m³ para madeira ou 75 mdc para carvão); 2D = distância multiplicada por dois (km) e P = produção (m³/ha.ano).

Assim, foi desenvolvido o sub-modelo de logística da madeira para obter superfícies de custo acumulado do custo de transporte de madeira no Brasil. Essas representam o valor necessário para transportar a produção unitária até o centro de transformação/consumo mais próximo através da malha rodoviária brasileira. As principais entradas do sub-modelo são: o custo unitário; a localização dos centros de transformação/consumo da madeira no país para carvão vegetal, celulose e painéis industrializados (Figura 6); e o mapa rodoviário brasileiro. As fontes são indicadas na Tabela S1 e a origem dos valores assumidos é detalhada no material suplementar desse estudo.

² Capacidade de carga média dos caminhões que realizam esse tipo de transporte no Brasil indicada pela Associação Mineira de Silvicultura – AMS.

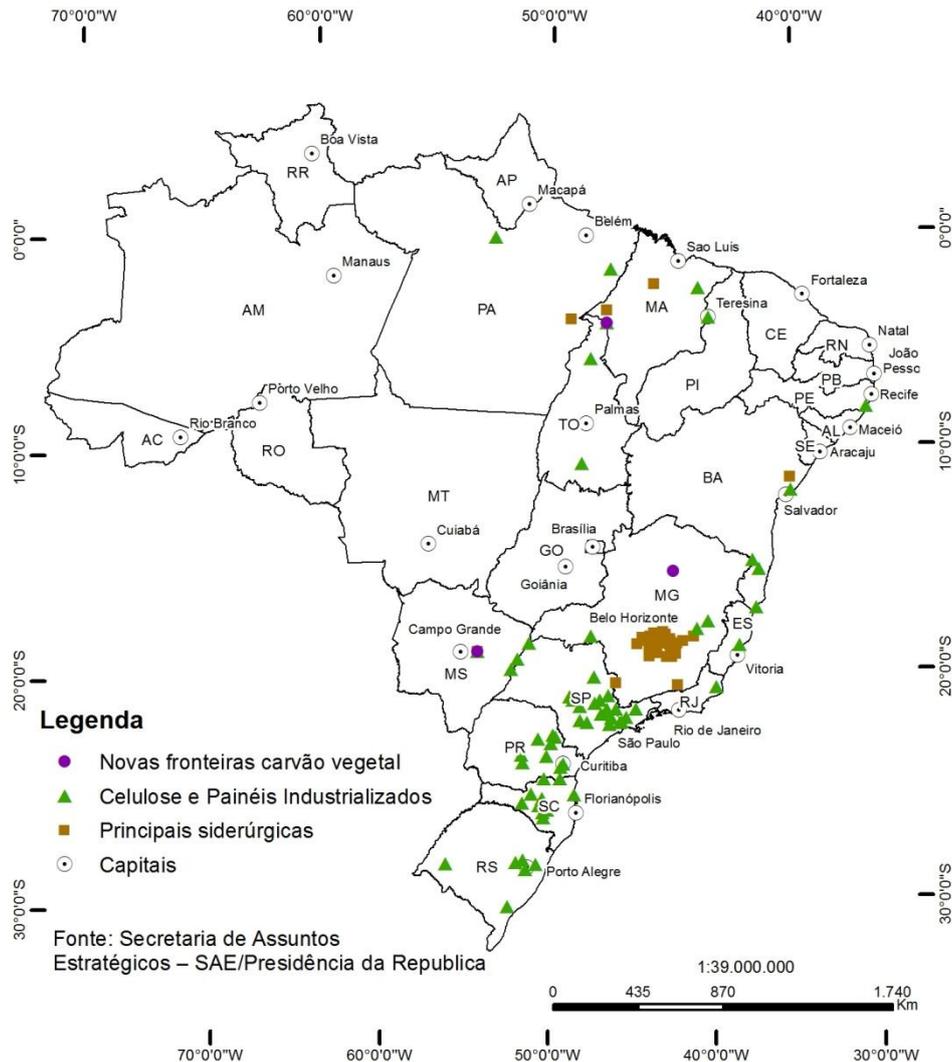


Figura 6 – Brasil, localização dos centros de transformação/consumo da madeira no país para carvão vegetal, celulose e painéis industrializados

2.4 Alocação de florestas plantadas

A seleção pelo módulo LUC do modelo das células do mapa de base do padrão de uso do solo em que ocorrerá a transição de classe na simulação, de pastagem para floresta plantada, é baseada no mapa de probabilidade de transição. A alocação espacial é efetuada por meio de um mecanismo de autômato celular para reproduzir o padrão espacial (SOARES-FILHO, 2009).

Ao simular a alocação de plantios florestais no Brasil tentou-se lidar de maneira conservadora com a questão da competição entre alimentos versus produção madeireira a partir de florestas plantadas, na expectativa de não questionar a prioridade da produção de alimentos sobre qualquer outra produção comercial. Embora haja indicações da existência de uma margem considerável para melhorar produtividade, persiste a tendência global de

aumento da demanda por terras agrícolas para produção de alimentos em função do crescimento e mudança no padrão de renda da população (FAO, 2011).

Nesse sentido, optou-se por utilizar os resultados do modelo de simulação espacialmente explícito de mudança de uso da terra para expansão agrícola brasileira *OTIMIZAGRO*, desenvolvido pelo Centro de Sensoriamento Remoto/Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. O modelo, integrando a complexa cadeia da agricultura e respondendo a cenários agrícolas, aloca um conjunto de culturas e pastagem em função da aptidão agrícola, favorabilidade climática e rentabilidade, em terras disponíveis ou convertendo floresta e cerrado quando não há disponibilidade.

O modelo espacial proposto neste estudo utilizou os mapas simulados pelo *OTIMIZAGRO* como base para simular a dinâmica espacial das florestas plantadas no Brasil em 2022. Desta forma, os plantios foram alocados, de acordo com os parâmetros calibrados de favorabilidade climática e as superfícies de rentabilidade, em terras que não competiram diretamente com a expansão agrícola.

Foi modelada apenas a transição de pastagem, restringindo assim a expansão dos plantios florestais apenas em terras já antropizadas. Além disso, a área de pastagem equivale a uma restrição de área máxima a ser ocupada por florestas, garantindo que nas projeções, para cada microrregião, a expansão da área de florestas seja maior do que o montante disponível de pastagem.

2.5 Validação dos modelos

A validação da alocação espacial das mudanças pelo modelo espacial foi feita através do algoritmo *Calculate Reciprocal Similarity Map* (SOARES-FILHO *et al.*, 2009), considerando o contexto de vizinhança para indicação da concordância espacial.

Foi calculada a mínima similaridade *fuzzy* entre mapas de mudança da paisagem simulada, gerada a partir de um mapa inicial, e a paisagem observada correspondente, para cada tamanho de janela usando uma função de decaimento constante para ponderar a distribuição do estado da célula ao redor de uma célula central de forma recíproca. Foram utilizadas janelas de análise de 1 a 201 células, visto a escala e a extensão tratada pelo modelo.

Nesse processo de validação, os parâmetros calibrados (mapa de probabilidade de transição) foram utilizados para simular a alocação espacial dos plantios florestais tendo como paisagem inicial e final observada os mapas do Inventário Florestal de Minas Gerais de 2005

e 2009 (SCOLFORO *et al.*, 2008), visto sua disponibilidade e significativa representatividade no contexto nacional.

O modelo de projeção foi utilizado para estimar a produção e a área total de floresta plantada para o período entre 2005 e 2011. Os resultados para esses anos foram contrapostos aos registrados pela ABRAF (ABRAF, 2012) para o mesmo período com o objeto de efetuar a validação do modelo. Utilizou-se a *Analysis Of Variance* - ANOVA e a estatística *F* como avaliação abrangente da significância geral do modelo, comparando a variação sistemática com a variação assistemática (MINGOTI, 2005) entre os dados estimados e reais registrados nesse período.

3 RESULTADOS

3.1 Projeção da produção e área ocupada

A Figura 7 e a Tabela 1 apresentam a produção de madeira pelas florestas plantadas no Brasil, expressa como tora equivalente, como resultado das projeções do governo brasileiro e nas recentes tendências de produção dos principais produtos de base florestal, guardadas as correntes condições na silvicultura, bem como assumindo a manutenção dos presentes aspectos técnicos, produtivos, tecnológicos e de rendimento.

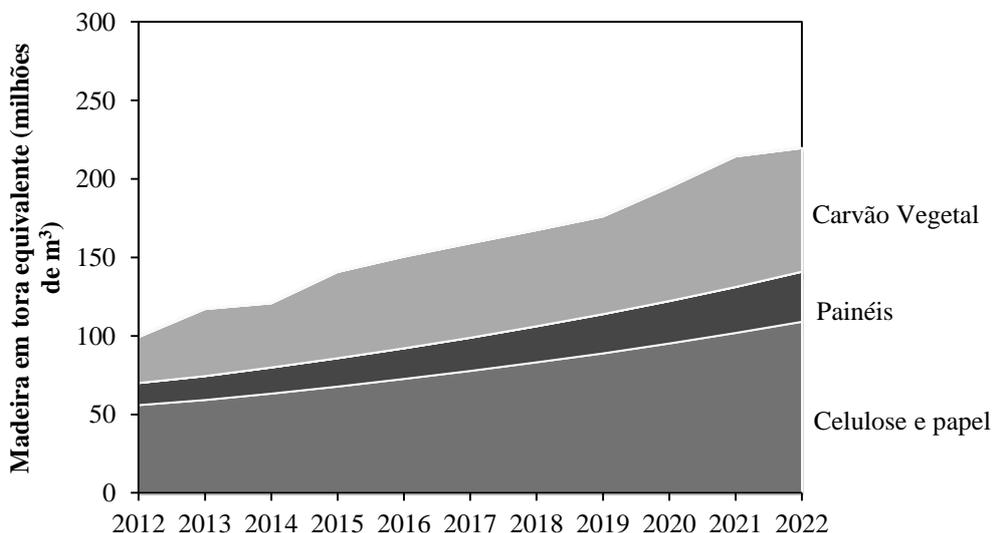


Figura 7 – Volume estimado de madeira produzido por florestas plantadas no Brasil (2012-2022).

Tabela 1 – Produção projetada para os produtos de plantios de Eucalyptus no Brasil (m³)

Ano	Carvão vegetal		Celulose e papel	Painéis
	Cenário uso misto	Cenário uso não misto		
2012	24.185.260	29.237.657	55.996.000	14.104.961
2013	32.915.210	42.661.955	59.243.768	15.303.840
2014	29.037.782	40.838.631	63.402.681	16.604.621
2015	35.370.714	54.906.038	67.853.549	18.015.964
2016	38.676.458	58.385.141	72.616.868	19.547.267
2017	33.054.315	60.140.013	77.714.572	21.208.726
2018	36.452.059	61.186.404	83.170.135	23.011.404
2019	36.361.157	62.251.164	89.008.678	24.967.304
2020	42.239.828	72.427.799	95.257.088	27.089.450
2021	50.161.864	83.111.567	101.944.135	29.391.972
2022	50.105.649	78.645.901	109.100.613	31.890.201
2012-2022 a.a.	5,81%	10,23%	6,30%	8,50%

A expectativa é que a produção de celulose e papel continue a ser o produto da cadeia de base florestal com maior demanda por madeira de florestas plantadas, com a produção estimada superior a 109 milhões m³ em 2022, 51% superior a 2011.

Os resultados da produção de madeira para carvão vegetal destinado a indústria siderúrgica brasileira, com base nas tendências de evolução do mercado, indicam a necessidade de cerca de 50 milhões m³ em 2022 para atender a produção de ferrogusa, aço e ferroligas baseada nesse insumo, 107% superior a 2012.

Por outro lado, no cenário alternativo de uso não misto, em que gradualmente toda a produção de aço e ferrogusa, atualmente baseada nesse agente termo-redutor, chega a ser suprida de forma renovável a partir de florestas plantadas, a produção de madeira correspondente seria superior a 78 milhões m³ em 2022, uma diferença de 28 milhões m³ se comparada ao cenário de uso misto. O distanciamento entre as curvas de produção em 2022 é superior à quantidade de madeira que se estima ser produzida na silvicultura para carvão vegetal atualmente, cerca de 24 milhões m³ segundo registros oficiais.

A exceção do carvão vegetal no cenário de uso não misto, os painéis de madeira industrializada é o segmento que apresenta a maior taxa média de crescimento da produção no período (8,5% ao ano), de 13 milhões de m³ em 2011 e superando 31 milhões de m³ em 2022.

A necessidade total de madeira de Eucalyptus em 2022 alcança cerca de 191 milhões de m³ no cenário tendencial de uso misto de carvão vegetal e de 220 milhões de m³ no

alternativo. Esses níveis de produção são respectivamente 92,4% e 121,1% superiores ao atual (99 milhões de m³), representando assim um novo patamar do mercado brasileiro de produtos florestais derivados do gênero.

A área colhida anualmente de floresta plantada compatível com o nível de produção no Brasil será de 606 mil de hectares em 2022 (Figura 8). Em 2022, estima-se que pelo menos 65% da área total colhida para essa finalidade será dedicada apenas à produção de celulose (394 mil hectares), compatível com a diferenciada taxa de crescimento da produção esperada para esse produto.

Para suprir essa demanda industrial e energética de madeira será necessário um ritmo médio anual de plantio de 970 mil a 1,08 milhões de hectares no período de 2012-2022, sendo pelo menos 400 mil ao ano em novas áreas.

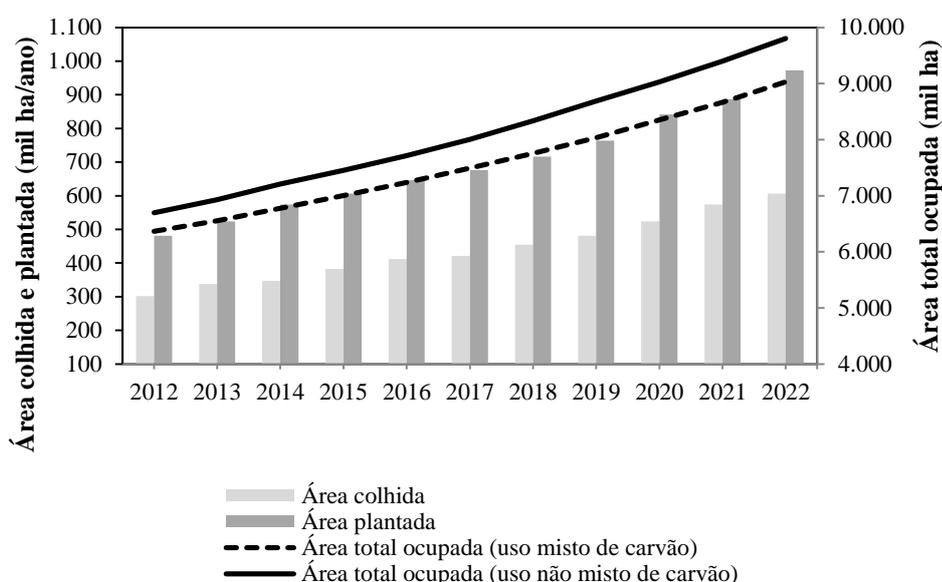


Figura 8 – Área anual estimada colhida, plantada e total ocupada por florestas plantadas no Brasil (2012-2022)

Estima-se que a área total ocupada por florestas plantadas no Brasil, segundo tais projeções e partindo de 6,5 milhões de hectares em 2011, totalizará cerca de 9 milhões de hectares em 2022, o que representa uma expansão de 46% no intervalo de dez anos (Figura 8). Os 2,8 milhões de hectares adicionais são representados pela expansão dos plantios de Eucalyptus. No cenário considerando o uso não misto, a área ocupada alcançaria 9,9 milhões de hectares naquele ano, cerca de 8,6% superior ao que assume a manutenção da proporção no uso de carvão não originário de florestas plantadas.

3.2 Rentabilidade e favorabilidade climática

A superfície espaço-econômica resultante é apresentada na Figura 9, que representa a variação espacial da rentabilidade potencial da atividade florestal baseando-se principalmente no custo de transporte, obtido pelo modelo de logística da madeira desenvolvido, além dos custos típicos da atividade e do preço médio dos produtos.

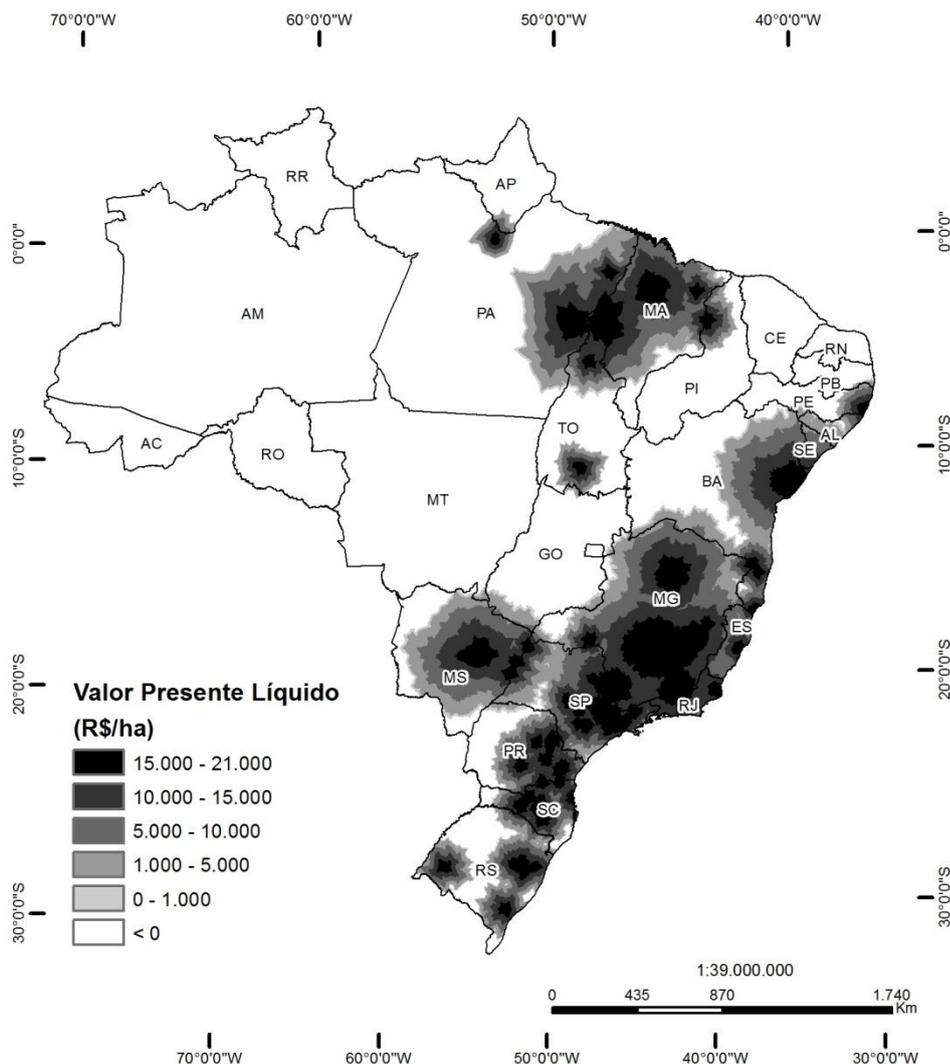


Figura 9 - Estimativa do VPL, consolidado, para a atividade florestal no Brasil com finalidade de produção de carvão vegetal, celulose e painéis industrializados.

Os resultados da estimativa do VPL para projetos de 21 anos, considerando o maior valor para cada célula resultante da rentabilidade dos produtos modelados, indicam uma faixa de retorno de até R\$ 21 mil para projetos de florestas plantadas no Brasil com finalidade de produção de carvão vegetal, celulose e painéis industrializados. A representação anualizada, o VAE (Figura 10), indica um limite de R\$ 1.100 de retorno anual para a atividade dentro do

horizonte de tempo considerado. Esses valores máximos são obtidos em células dentro de um raio de 100 km aos principais centros de consumo/transformação da madeira de florestas plantadas. Nessas regiões mais rentáveis, o retorno econômico médio obtido é de cerca de R\$ 780 por hectare.

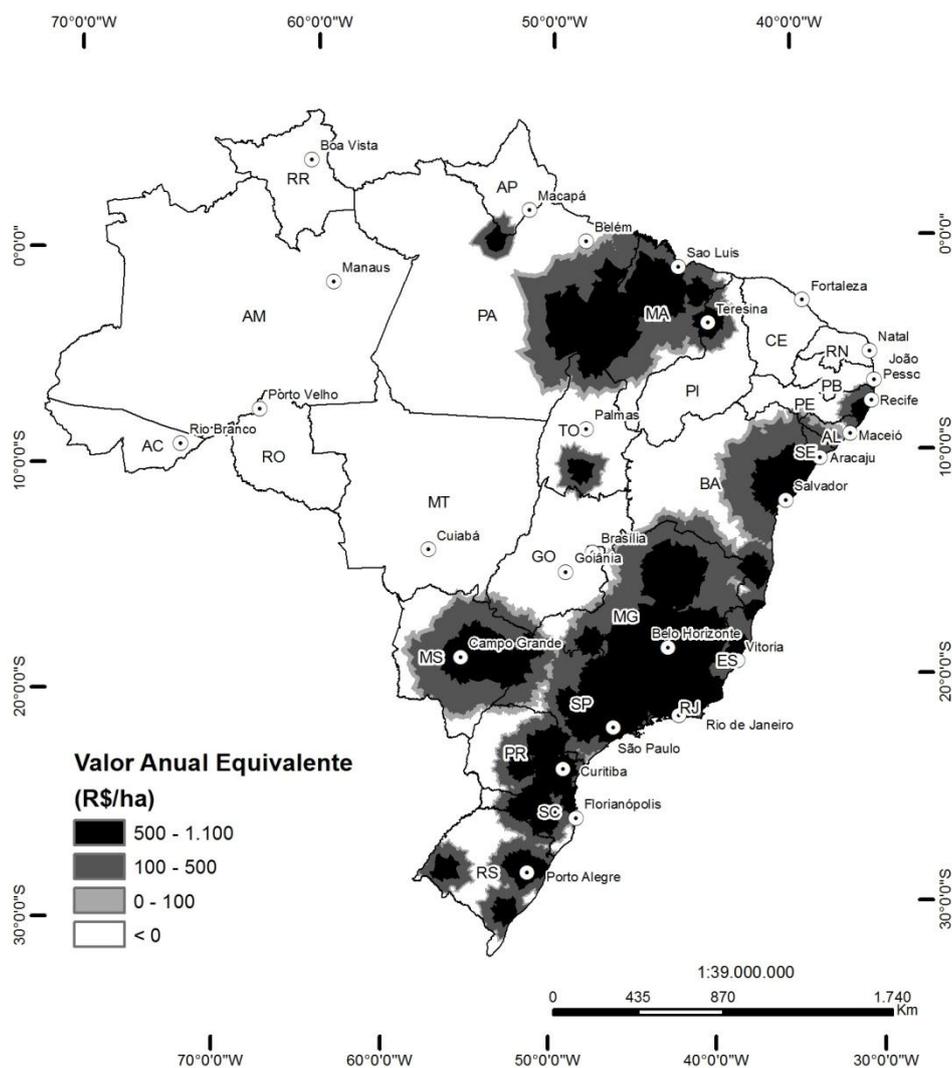


Figura 10 - Estimativa do VAE, consolidado, para a atividade florestal no Brasil com finalidade de produção de carvão vegetal, celulose e painéis industrializados.

Essas áreas estão concentradas principalmente nas regiões sul e sudeste do Brasil, em porções das regiões nordeste e centro-oeste e em específicas áreas da região norte (nos estados de Amapá, Pará e Maranhão), associadas principalmente à localização de plantas siderúrgicas a carvão vegetal e a indústria de celulose.

Por outro lado, o cálculo do VPL apresentou valores negativos de retorno econômico em função do aumento da distância percorrida, considerando a presente malha rodoviária brasileira e a localização atual dos principais centros industriais consumidores de madeira de florestas plantadas, indicando que o projeto não estaria remunerando o capital investido, conforme taxa de desconto assumida. Esses casos ocorreram em quase totalidade da região norte do Brasil, em grande parte do nordeste e em certas porções da região centro-oeste.

A Figura 11 apresenta a favorabilidade climática modelada para florestas plantadas, que representa a propensão à ocorrência do plantio dada as condições climáticas médias consideradas. Como regiões com características climáticas afins acabam obtendo pesos semelhantes, as regiões mais favoráveis indicadas no mapa são aquelas cujas características climáticas são próximas das características dos locais onde o plantio ocorre e que, desse modo, está associado ao nível de rendimento registrado e destacado por diversos estudos.

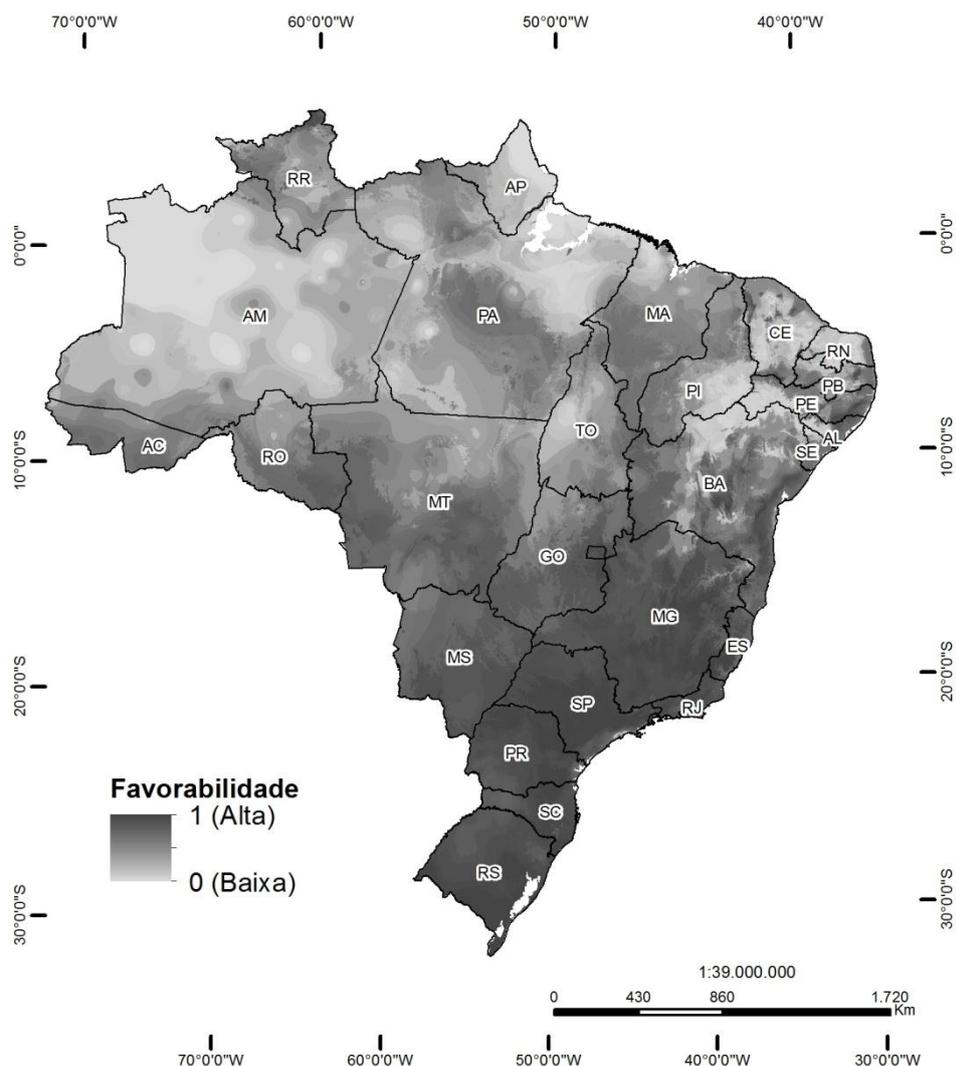


Figura 11 - Favorabilidade climática simulada para plantios florestais

Além disso, o mapa permite observar um padrão concordante com o esperado pelo nível de menor restritividade de exigências climáticas estabelecidas para implantação de povoamentos de produção de espécies do gênero *Eucalyptus* (RIBEIRO *et al.*, 2009).

3.3 Validação da alocação espacial

O cálculo da mínima similaridade *fuzzy* entre os mapas da paisagem observada e simulada para cada tamanho de janela em uma função de decaimento constante indica que o modelo atingiu um nível de acerto superior a 50% na janela de análise de 21 células (Figura 12). Isso sugere que a probabilidade de acerto nessa janela supera a probabilidade erro. Considerando a janela de 61 células, foi superado um grau de acerto de 70%, o que demonstra boa capacidade do modelo em prever localização das florestas plantadas no Brasil, tendo em vista a escala e a extensão tratada pelo modelo.

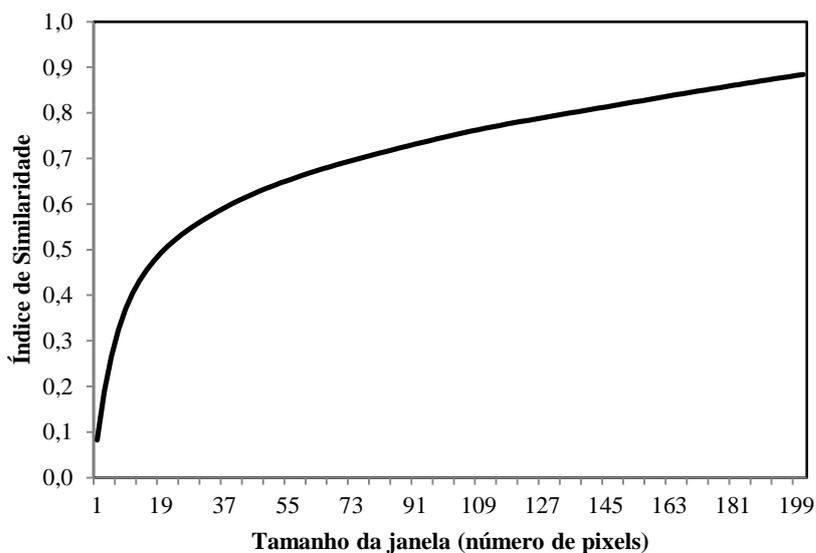


Figura 12 - Índices de acerto de alocação espacial do modelo em relação ao tamanho da janela de análise.

3.4 Validação do modelo de projeção

A área total ocupada simulada para o ano de 2011 foi de 6,6 milhões de hectares (Tabela S7) em comparação com 6,5 milhões de hectare registrados pela ABRAF (ABRAF, 2012). Isto significa que o modelo superestima a área ocupada em 2,3%, o que pode ser avaliado como insignificante no contexto do estudo. Isso pode ser explicado pela alta variabilidade espacial e temporal dos níveis de rendimento dos plantios florestais e intensidade de uso da terra, que não poderiam ser simulados em detalhe.

O resultado da ANOVA e do teste F para o período entre 2005 e 2011 (Tabela S8), comparando a quantidade de área ocupada observada e projetada, indicaram significância estatística do modelo para projeção das áreas a um nível de 5%, reforçando a adequabilidade do modelo. Os resultados detalhados são apresentados no material suplementar desse trabalho.

3.5 Simulação espacial

O resultado da simulação de mudança do uso da terra são séries temporais de mapas de uso da terra na resolução de 500 metros.

Para destacar o resultado da expansão das florestas plantadas sobre o padrão de uso do solo e da quantidade de mudança no uso da terra, as informações de tipo de cultura agrícola calculado pelo OTIMIZAGRO foram agregadas em uma classe. Esse tipo de uso do solo é mantido constante durante a simulação porque não foi objeto da modelagem nesse estudo. A Tabela 2 resume as tendências na área de cada classe para o Brasil em 2022.

Tabela 2 – Sumário das simulações de mudança de uso da terra pelo modelo

	2011 (ha)	2022 (ha)	2011 - 2022 (%)
<i>Cenário uso misto de carvão vegetal</i>			
Agrícola	48.849.800	63.087.400	29%
Pastagem	229.890.300	213.135.444	-7,3%
Floresta plantada	6.515.844	9.033.100	39%
<i>Cenário uso não misto de carvão vegetal</i>			
Agrícola	48.849.800	63.087.400	29%
Pastagem	229.890.300	212.361.850	-7,6%
Floresta plantada	6.515.844	9.806.694	51%

Um resultado evidente é o declínio da área de pastagens em cerca de 7%, tendo cedido áreas para a atividade agrícola e para plantios florestais. A expansão das florestas plantadas responde por cerca de 19% da redução de 16 milhões de hectares das áreas de pastagens no cenário de uso não misto. De modo geral, as projeções e a simulação indicaram que, se considerar esses plantios florestais em áreas antropizadas, somente essa expansão implica em uma redução de 1% das áreas de pastagens.

Os ecossistemas nativos, inseridos ou não em áreas de conservação da natureza, não são afetados por estes processos de expansão, uma vez que foram consideradas apenas transições a partir de pastagens. Do mesmo modo, os resultados indicaram que a expansão de florestas não interferiu na expansão agrícola projetada, na medida em que todas as áreas

foram alocadas, segundo microrregiões, sem necessidade de realocação em outras localidades para evitar a competição com a produção de alimentos.

Em termos das dinâmicas regionais, os plantios florestais se expandiram entre os estados brasileiros de acordo com a tendência de crescimento observada nos últimos anos. Nas projeções (Tabela 3), as regiões sudeste e sul continuaram reunindo pelo menos 70% da área plantada. Cerca de 2,5 milhões de hectares (25% da área nacional) concentram-se no estado de Minas Gerais em função da expansão conduzida pela substituição do carvão vegetal de origem em florestas nativas pelos de florestas plantadas na produção de ferrogusa e aço. Esse aspecto influencia fortemente também a tendência de expansão na região norte e nordeste, em que os estados do Pará e Maranhão apresentam altas taxas de crescimento anual da área.

Tabela 3 – Área total consolidada de floresta plantada no Brasil 2012 e 2022

Estado	2012	2022	2012-2022	2012-2022 a.a.
<i>Região sudeste</i>	2.884.073	4.475.201		
Minas Gerais	1.491.681	2.495.086	67%	5%
São Paulo	1.186.497	1.509.100	27%	2%
Espírito Santo	205.895	386.421	88%	6%
Outros	-	84.594	-	-
<i>Região sul</i>	1.913.064	2.714.097		
Paraná	817.566	1.235.372	51%	4%
Santa Catarina	645.965	898.680	39%	3%
Rio Grande do Sul	449.533	580.045	29%	3%
<i>Região nordeste</i>	817.748	1.177.355		
Bahia	616.694	833.633	35%	3%
Maranhão	173.324	253.168	46%	4%
Piauí	27.730	29.297	6%	1%
Outros	-	61.256	-	-
<i>Região norte</i>	319.461	653636,7		
Pará	159.657	343.617	115%	8%
Amapá	49.951	144.658	190%	11%
Tocantins	109.853	111.856	1,8%	0,2%
Outros	-	55.507	-	-
<i>Região centro-oeste</i>	711.628	1160787		
Goiás	54.513	57.899	6,2%	0,6%
Mato Grosso	59.980	63.478	5,8%	0,6%
Mato Grosso do Sul	597.135	1.035.841	73%	6%
Outros	-	10.453	-	-

A região centro-oeste tem significativo aumento de área ocupada por plantios florestais, com destaque para o estado de Mato Grosso do Sul. Isso se deve ao processo de consolidação do estado com um dos principais polos da produção de celulose no país (ABRAF, 2013).

Por outro lado, as regiões sul e nordeste apresentaram menores taxas de expansão dentre as regiões brasileiras. Os estados do Paraná e Bahia apresentam atualmente os menores índices de expansão da área plantada (ABRAF, 2013), conduzindo ao menor crescimento de áreas nas respectivas regiões nas projeções.

A Figura 13 apresenta as estimativas de densidade, pelo método Kernel, dos plantios florestais no Brasil em 2010 e para 2022, resultado da alocação espacial simulada. Essa representação expressa a tendência de expansão das formações florestais em direção às regiões centro-oeste, norte e nordeste. Sob esse aspecto, tem destaque os estados do Pará, Maranhão e principalmente Mato Grosso do Sul.

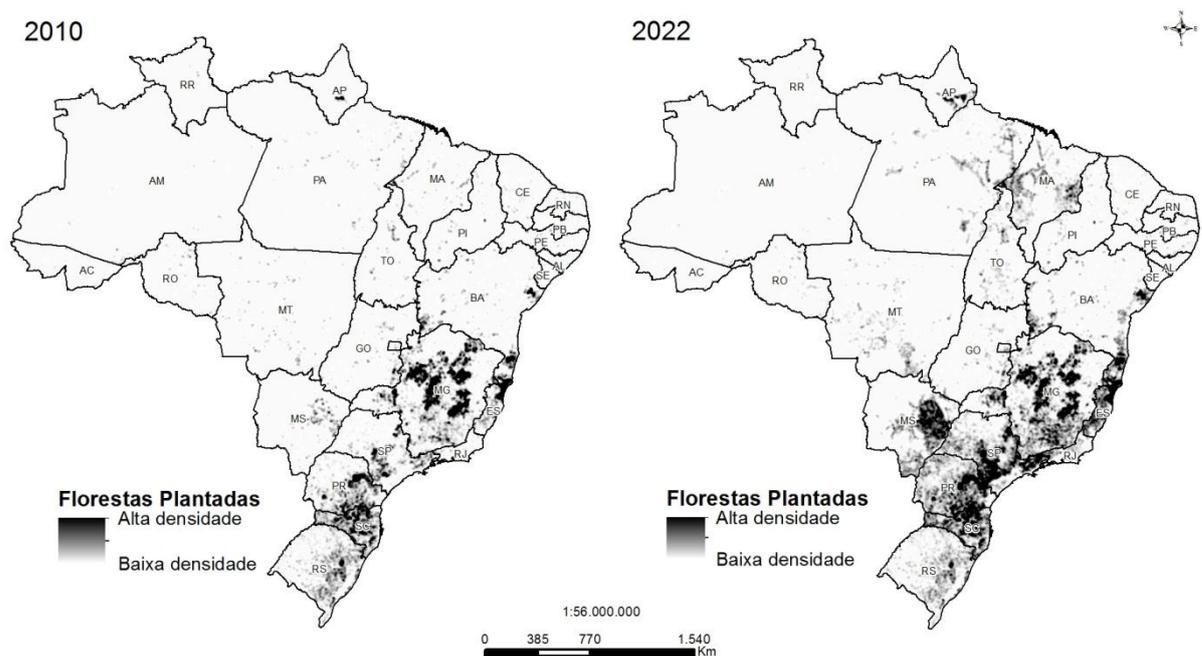


Figura 13- Mapas de densidade Kernel da localização das florestas plantadas em 2010 e 2022 (simulado)

O padrão de uso da terra simulado para o Brasil é demonstrado na Figura 14.



Figura 14 - Padrão de uso da terra para o Brasil em 2022 resultante da simulação

4 DISCUSSÃO

A identificação das áreas ocupadas com pastagens potencialmente conversíveis (com potencial rentabilidade para a atividade florestal) demonstra a viabilidade de expandir as florestas plantadas no Brasil de modo compatível com as expectativas de elevação do nível de desenvolvimento do setor florestal, conciliando-a a estratégias de gestão territorial que visem minimizar potenciais conflitos e efeitos marginais da mudança do uso da terra.

A alocação satisfatória por esse estudo dos 10 milhões de hectares de área ocupada por florestas plantadas em 2022, somada à expansão agrícola projetada pelo OTIMIZAGRO e a restrição ao desmatamento adicional, reforça a possibilidade, destacada por Gouvello *et al* (2010), da utilização das pastagens degradadas em acompanhar o desenvolvimento dessas atividades. A indisponibilidade de bases espacializadas referentes à condição das pastagens não viabilizou uma análise mais detalhada desse aspecto.

Por outro lado, Dias-Filho (2011), baseado em indicadores de capacidade de suporte das pastagens, estimou entre 50% a 70% da área de pastagens no Brasil estariam em algum grau de degradação, associada diretamente à baixa produtividade da pecuária e ao aumento do desmatamento. Isso remete a possibilidade de que a área de pastagem convertida para floresta plantada nesse estudo (1% da área total de pastagem) corresponda a algum nível de degradação.

O direcionamento territorial, como demonstrado nesse estudo, é importante para possibilitar a utilização e gestão de forma tão eficiente quanto possível as terras disponíveis frente a eminente ampliação da oferta de produtos florestais produzidos de forma sustentável, atendendo uma demanda crescente do mercado e das políticas públicas nacionais e internacionais.

Esse direcionamento é especialmente oportuno para o setor florestal brasileiro, visto os benefícios ecológicos e climáticos proporcionados e sua potencialidade como amplificador do desenvolvimento do país. A expansão do setor desvinculada de uma política pública mais territorializada e direcionada para ocupação daquelas áreas com potencial para recuperação produtiva (as pastagens como áreas já antropizadas, mas subutilizadas), poderiam, dentre outros, neutralizar esses benefícios ambientais.

Nesse sentido, a análise de rentabilidade representou uma importante consideração para simular a ocorrência dos plantios florestais para o modelo proposto, na medida em que indica uma maior possibilidade para obtenção de sucesso em projetos florestais nessas áreas, fator determinante segundo Silva *et al* (2002).

É importante chamar a atenção que as superfícies de retorno econômico modeladas representam a potencialidade de retornos econômicos compatível com a escala de trabalho. Assim, estão associadas às condições assumidas de localização dos principais centros industriais consumidores de madeira de florestas plantadas e a presente malha rodoviária brasileira.

Além disso, variáveis como a taxa de juros e os preços praticados, são altamente sensíveis às condições locais, e desse modo a aplicação do modelo em escalas mais detalhadas, como regional, pode retornar diferentes superfícies espaço-econômicas.

Poucos estudos já foram desenvolvidos na perspectiva de avaliar a disponibilidade de terras para produção florestal no Brasil. Piketty *et al* (2009) avaliaram as terras potencialmente disponíveis para plantações dedicadas a produção de carvão vegetal para a indústria siderúrgica considerando aspectos como fatores institucionais, critérios técnicos, legislação ambiental e segurança jurídica. Gouvello *et al* (2010) reproduziram a dinâmica região de distribuição dos plantios e consideraram a disponibilidade de pastagem para ser convertida. Esses estudos, no entanto, não abrangeram todo o setor florestal brasileiro e a potencial rentabilidade dos projetos, espacializada, como determinante para localização das formações e identificação de pastagens com potencial para recuperação produtiva através da atividade florestal, como feito neste.

De modo geral, a superfície de retorno econômico obtida pela a modelagem espacial da rentabilidade potencial da atividade florestal apresentou resultados compatíveis com a dinâmica espacial das florestas plantadas no Brasil, cujas áreas encontram-se concentradas nas regiões sudeste e sul (ABRAF, 2012), terras de altos retornos econômicos potenciais. Isso sugere que esse tipo de abordagem responde satisfatoriamente para a simulação de trajetórias de mudança no uso da terra.

Neste trabalho, o modelo para estimativa do volume de madeira correspondente às projeções do governo brasileiro e nas recentes tendências de produção dos principais produtos de base em florestas plantadas subsidiou a quantidade de mudanças da função de transição. As validações demonstraram pouco afastamento em comparação às estimativas registradas pela ABRAF, podendo a variação ser atribuída à alta variabilidade espacial e temporal dos níveis de rendimento dos plantios florestais e intensidade de uso da terra, que não foram modelados em detalhe. Os testes estatísticos indicaram a significância e a adequabilidade do modelo para estimar as áreas.

A alocação espacial, outro componente função de transição, apresentou um nível de acerto superior a 50%, o que pode ser considerado um bom resultado tendo em vista a escala e a extensão tratada pelo modelo. Além disso, a silvicultura no Brasil experimentou no passado vários ciclos de incentivo à expansão das formações florestais com finalidade produtiva (ANTONANGELO e BACHA, 1998). Esses incentivos, heterogêneos no espaço e no tempo, resultaram em projetos florestais implantados muitas vezes independentes de viabilidade econômica, já que os incentivos fiscais compensavam o baixo retorno (VALVERDE, 2013). Isso certamente dificultou a previsão espacial.

As formações florestais simuladas foram alocadas principalmente em áreas próximas aos principais centros de consumo/transformação da madeira de florestas plantadas devido à proximidade aos mercados consumidores e correspondentes maiores retornos econômicos apresentados pelo VPL. Característica compatível com a análise de rentabilidade de projetos florestais, cujo custo de transporte tem considerável representação (CANTO *et al.*, 2006; SILVA *et al.*, 2007).

Além de compatível com a dinâmica recentemente verificada dos plantios entre as regiões, a expansão das áreas de floresta plantada foi predominante nos estados com mercado regional de madeira estabelecido, principalmente para celulose e papel e carvão vegetal. No caso da celulose e papel, devido ao crescimento esperado da produção nacional, que apresenta uma das maiores taxas dentre os produtos modelados, e o nível de consumo da madeira produzida por florestas plantadas. A expansão das formações florestais em direção às regiões centro-oeste, norte e nordeste está ajustada com a dinâmica tendencial da segunda geração do desenvolvimento florestal brasileiro (BRASIL, 2011) que se volta principalmente para os estados do Mato Grosso do Sul, Tocantins e Maranhão.

Uma avaliação do modelo mais abrangente deve incorporar uma comparação detalhada do resultado espacial das transições com os dados de outras regiões, além de Minas Gerais. Uma análise sistemática de incerteza e da sensibilidade do modelo iria além do escopo deste trabalho, mas fazem-se também necessárias.

Por fim, a análise dos resultados da simulação indica que, de acordo com o cenário apresentado, dois processos de mudança no uso da terra foram responsáveis pela queda da área de pastagens no período: a expansão global de área cultivada, devido à crescente demanda de produção agrícola; e a expansão dos plantios florestais. Ambos poderiam ser parcialmente compensados pelos aumentos de rendimento assumidos. Em trajetórias paralelas, essa expansão também poderia resultar no deslocamento das terras de pastagens

existentes, compensando as perdas com conversão de áreas naturais. Isso demonstra a necessidade de analisar a dinâmica de mudança do uso da terra a partir de uma perspectiva integrada.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho ilustra a conveniência do uso de modelos de simulação espacialmente explícitos para investigar processos de longo prazo e grande escala de mudança de uso da terra.

A plataforma e os métodos utilizados mostraram-se capazes de modelar a dinâmica espacial das florestas plantadas no Brasil de forma satisfatória, podendo os resultados da simulação fornecer informações importantes para a avaliação da sustentabilidade da atividade florestal futura sob o aspecto de mudança de uso da terra.

As superfícies espaço-econômicas podem ser integralizadas às ferramentas de modelagem econômico-ambiental existentes, utilizadas para analisar as trajetórias de mudança no uso da terra. Além disso, essa representação da rentabilidade potencial pode dar suporte a programas e planos de fomento florestal que promovem a inserção remunerada dos produtores rurais na cadeia produtiva florestal.

A abordagem descrita neste artigo é geral e permite que sejam incorporadas em sua continuidade outras estratégias de gestão territorial e outras preocupações, como as consequências da mudança do uso da terra sobre a biodiversidade e sobre as emissões de gases de efeito estufa relacionados com a conversão das terras, que pode neutralizar os potenciais benefícios da substituição de combustíveis fósseis (FARGIONE *et al.*, 2008; LAPOLA *et al.*, 2010).

Por fim, esse estudo colabora para as estratégias de gestão territorial, com foco específico nas florestas plantadas, e portanto, para a utilização eficiente das terras disponíveis e ocupação daquelas áreas com potencial para recuperação produtiva. Integra uma proposta abrangente de instrumentos de regulação das tendências de distribuição de atividades produtivas e equipamentos, diante de objetivos estratégicos, dirigida, no tempo e no espaço, a coerência das múltiplas finalidades.

Contrapõe-se aos modelos dominantes de uso e ocupação do território brasileiro ambientalmente insustentáveis e contribui para o debate sobre a necessidade do governo brasileiro assumir de forma coordenada ações referentes ao ordenamento do território nacional.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo demonstrou a aplicação da modelagem espacialmente explícita para avaliar as implicações na mudança do uso da terra, compatível com a escala do estudo, da expansão do setor florestal brasileiro em função do nível de produção esperado. Os padrões de uso da terra computados foram resultantes de interações espaço-temporais em um cenário assumindo não concorrência entre a exploração florestal e a produção das principais *commodities* agrícolas, assegurando não desmatamento adicional de florestas primárias e outros ecossistemas florestais.

A abordagem apresentada, baseada na simulação espacial e em cenários, pode permitir avaliar e comparar os efeitos de políticas florestais e de desenvolvimento na mudança do uso da terra em todo o país. Com base nos mapas calculados é possível identificar regiões no Brasil potenciais e estratégicas, levando em conta a sustentabilidade ambiental e rentabilidade econômica para implantação das florestas plantadas, indicando assim áreas com potencial para recuperação produtiva.

Dentre as possíveis melhorias, pode-se citar a regionalização do processo de validação, que poderia melhorar o ajuste na predição dos padrões de uso da terra e a concordância com dinâmicas regionais.

A inclusão de mapeamos de áreas em regeneração e de pastagens em algum nível de degradação, na medida em que surgirem essas bases, poderá retornar ganhos sobre o aspecto de direcionamento territorial, indicando com melhor detalhamento áreas potencialmente prioritária.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAF. **Anuário estatístico 2012**: ano base 2011. Brasília: Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas; 2012.

ABRAF. **Anuário estatístico 2012**: ano base 2012. Brasília: Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas; 2013.

AMS. **Anuário estatístico 2008**. Belo Horizonte: Associação Mineira de Silvicultura; 2008.

ANTONANGELO, A.; BACHA, C.J.C. As Fases da silvicultura no Brasil. RBE, Rio de Janeiro, n. 52, p. 207-238, 1998.

ASSIS, W. S.; CARNEIRO, M. D. O uso do carvão vegetal como fonte de energia no Pará – o Parque Siderúrgico de Carajás: controvérsias sociais, ambientais e econômicas. In: Porro, R.; Toni, F.(Org.). Energia na Amazônia. Belém: Iniciativa Amazônica, 2011.

BENÍTEZ, P.C.; MCCALLUM, I.; OBERSTEINER, M.; YAMAGATA, Y. Global potential for carbon sequestration: Geographical distribution, country risk and policy implications. **Ecological Economics**, n. 60, p. 572-583, 2007.

BERGER, R.; GARLIPP, R.C.D. Custo-preço: uma alternativa financeira na avaliação da produção florestal. **Circular técnica 141**. Piracicaba: IPEF, 1982.

BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic Information Systems for geoscientists: modelling with GIS**. 1st ed. Kidlington, UK: Elsevier Science Ltd, 1994.

BOWMAN M.; SOARES-FILHO B.S.; MERRY, F.; NEPSTAD, D.; RODRIGUES, H.; ALMEIDA, O. Persistence of cattle ranching in the Brazilian Amazon: a spatial analysis of the rationale for beef production. **Land Use Policy**. 29, 558– 568. 2012.

BRITO, J.O. Fuelwood utilization in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, n. 1, p. 69-74, 1996

BRASIL. Diretrizes para a estruturação de uma política nacional de florestas plantadas. Brasília: Secretaria de Assuntos Estratégicos/Presidência da República, 2011. 104 p.

BRASIL. Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura: plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono). Brasília: MAPA, Casa Civil da Presidência da República, 2012. 172 p.

BROWN, S. Opportunities for mitigation carbon emissions through forestry activities. **Winrock International**. Arlington, p. 1-5. 1999.

CÂMARA, G.; AGUIAR, A.P.; ESCADA, M.I.; AMARAL, S.; CARNEIRO, T.; MONTEIRO, A.M.V. ARAUJO, R.; VIEIRA, I.; BECKER, B. Amazonian deforestation models. *Science*. n.5712 (307): p. 1043-1-44, 2005

CANTO, J.L.; MACHADO, C.C.; GONTIJO, F.M.; JACOVINE, L.A.G. Colheita e transporte florestal em propriedades rurais fomentadas no estado do Espírito Santo. **Revista Árvore**, n. 6, p. 989-998, 2006.

DIAS-FILHO, M.B. Degradação de pastagens: processos, causas e estratégias de recuperação. 4. Ed. Belém: Ed. do Autor, 2011, 215p.

DUBOC, E.; COSTA, C.J.; VELOSO, R.F.; OLIVEIRA, L.S.; PALUDO, A. **Panorama atual da produção de carvão vegetal no Brasil e no Cerrado**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2007.

EPE. **Balanco energético nacional 2012**: Ano base 2011. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética; 2012.

FARGIONE, J.; HILL, J.; TILMAN, D.; POLASKY, S.; HAWTHOME, P. LAND clearing and the biofuel carbon debt. **Science**, n. 319, p.1235–1238, 2008.

FAO. **Forest plantation productivity**. Report based on the work of W.J. Libby and C.Palmberg-Lerche. Forest Plantation Thematic Papers, Working Paper 3. Forest Resources Development Service, Forest Resources Division. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 2002.

FAO. **Responsible management of planted forests: voluntary guidelines**. Planted Forests and Trees Working Paper 37/E. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 2006

FAO. **Planted forest in sustainable forest management: A statement of principles**. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 2010.

FAO. **State of the world's forests**. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 2011.

FEARNSIDE, P.M. Plantation forestry in Brazil: projections to 2050. **Biomass and Bioenergy**, n. 6, p. 437-450, 1998.

FNP. Anuário da agricultura brasileira – AGRIANUAL 2012. São Paulo: FNP, Consultoria e Agroinformativos, 2012.

GALFORD, G.; SOARES-FILHO, B. S.; CERRI, C. E. P. Prospects for land-use sustainability on the agricultural frontier of the Brazilian Amazon. **Biological Sciences** v. 368, p. 20120171-20120171, 2013.

GOODACRE, C. M.; BONHAM-CARTER, G. F.; AGTERBERG, F. P.; WRIGHT, D. F. A statistical analysis of spatial association of seismicity with drainage patterns and magnetic anomalies in western Quebec. **Tectonophysics** n. 217, p. 205-305, 1993.

GOUVELLO, C.; SOARES-FILHO, B. S.; NASSAR, A. **Estudo de baixo carbono para o Brasil: uso da terra, mudanças do uso da terra e florestas**. Washington: The World Bank, 2010. 292 p.

GUEDES, I.C.L.; COELHO-JUNIOR, L.M.; OLIVEIRA, A.D.; MELLO, J.M.; REZENDE, J.L.P.; SILVA, C.P.C. Economic analysis of replacement regeneration and coppice regeneration in eucalyptus stands under risk conditions. **Cerne**, n. 3, p. 393-401, 2011.

IBGE. **Produção da extração vegetal e da silvicultura – PEVS 1990 - 2011**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística; 2011.

IPCC. **Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation**. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [O. Edenhofer, R.P. Madruga, Y. Sokona (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Intergovernmental Panel on Climate Change; 2012.

LAPOLA, D.M.; SHALDACH, R.; ALCAMO, J.; BONDEAU, A.; KOCH, J.; KOELKING, C.; PRIESS, J.A. Indirect land-use changes can overcome carbon savings from biofuels. **PNAS**, 2010.

- LEITE, C.; COSTA, H.M.; SOARES-FILHO, B.S.; VIANA, L. Historical land use change and associated carbon emissions in Brazil from 1940 to 1995. **Global Biogeochemical Cycles**. n. 26, p. 11-29, 2012.
- LIMA, L.S.; SOARES-FILHO, B.S.; RODRIGUES, H.O.H. Balanço hídrico climatológico espacializado para o Brasil. XVII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 23 a 28 de Setembro de 2012, Gramado, RS. Anais.
- MACHADO, C.C; MACHADO, R.R.; SILVA, E.A.; SOUZA, M.F.G. Avaliação do desempenho logístico do transporte rodoviário de madeira de áreas de fomento florestal com o uso de rede de Petri. **Revista Árvore**, n. 6, p. 1159-1167, 2009.
- MICHALSKI, F.; METZGER, J.P.; PERES, C. Rural property size drives patterns of upland and riparian forest retention in a tropical deforestation frontier. **Global Environmental Change**, v. 20, n. 4, p. 705-712, Out. 2010.
- MINGOTI, S.A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2005. 295 p.
- MME. **Perfil de ferroligas**. Relatório técnico 60. 112 p. Brasília: Ministério das Minas e Energia; 2009.
- MME. **Plano nacional de mineração 2030**. 178 p. Brasília: Ministério das Minas e Energia; 2011.
- MME/EPE. **Plano decenal de expansão de energia 2021**. Brasília: Ministério das Minas e Energia / Empresa de Pesquisa Energética; 2012
- MINAS GERAIS (Estado). Lei nº 18.365, de 01 de setembro de 2009. Dispõe sobre as políticas florestal e de proteção à biodiversidade no estado. Diário Oficial do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- MORELLO, T.F. **Carvão vegetal e siderurgia: de elo perdido a solução para um mundo pós-Kioto**. PhD thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- NAS. Advancing land change modeling: opportunities and research requirements. Washington, D.C.: National Academy of Sciences; 2013.
- OLIVEIRA, L.J.C.; COSTA, M. H.; SOARES-FILHO, B.S.; COE, M.T. Large-scale expansion of agriculture in Amazonia may be a no-win scenario. **Environmental Research Letters**, v. 8, p. 024021, 2013.
- PIKETTY, M.G.; WICHERT, M.; FALLOT, A.; AIMOLA, L. Assessing land availability to produce biomass for energy: The case of Brazilian charcoal for steel making. **Biomass and Bioenergy**, n. 33, p. 180-190, 2009.
- REZENDE, J. L. P., OLIVEIRA, A. D. **Análise econômica e social de projetos florestais**. Viçosa, MG: UFV, 2001.
- RIBEIRO, A.; PAIVA, Y.G.; BAESSO, R.C.; ALMEIDA, A.Q.; OLIVEIRA, A.S.; OLIVEIRA, R.A.; HAMAKAWA, P.J.; SILVA, M.P. Eucalipto. In: Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola. Monteiro, J.E. (Org.). Brasília, DF: INMET, 2009.
- RODRIGUES, L.C.E. **Tópicos de economia florestal**. Documentos florestais. Piracicaba, SP: ESALQ, 1991.

ROUNSEVELL, M.D.A.; ARNETH, A.; BROWN, D.G.; DE NOBLET-DUCOUDRÉ, N.; ELLIS, E.; FINNIGAN, J.; GALVIN, K.; GRIGG, N.; HARMAN, I.; LENNOX, J.; MAGLIOCCA, N.; PARKER, D.; O'NEIL, B.; VERBURG, P.H.; YOUNG, O. (2012). Incorporating human behaviour and decision making processes in land use and climate system models. GLP Report No. 7. GLP-IPO, São José dos Campos.

SCOLFORO, J.R.S.; CARVALHO, L.M.T.; OLIVEIRA, A.D. **Inventário florestal de Minas gerais: monitoramento dos reflorestamentos e tendências da produção em volume, peso de matéria seca e carbono, 2005-2007**. Lavras: Editora UFLA, 2008.

Shearer, A. W. **Land use scenarios: environmental consequences of development**. Boca Raton: CRC Press, 2009. 420 p.

SILVA, M. L.; JACOVINE, L. A. G., VALVERDE, S. R. **Economia florestal**. Viçosa, MG: UFV, 2002.

SILVA, M.L.; FONTES, A. A. Discussão sobre os critérios de avaliação econômica: valor presente líquido (VPL), valor anual equivalente (VAE) e valor esperado da terra (VET). **Revista Árvore**, n. 6, p. 931-936, 2005.

SILVA, M.L.; OLIVEIRA, R.J.; VALVERDE, S.R.; MACHADO, C.C.; PIRES, V.A.V. Análise do custo e do raio econômico de transporte de madeira de reflorestamentos para diferentes tipos de veículos. **Revista Árvore**, n. 6, p. 1073-1079, 2007.

SINDIFER. Anuário 2012. Belo Horizonte: Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais; 2012.

SOARES-FILHO, B. S.; PENNACHIN, C. L.; CERQUEIRA, G. DINAMICA: a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. **Ecological Modelling**, n. 3, p. 217-235, 2002.

SOARES, N.S.; SILVA, M.L.; FONTES, A. A. Análise econométrica do mercado brasileiro de carvão vegetal no período de 1974 a 2000. **Scientia Forestalis**, n. 66, p. 84-93, 2004.

SOARES-FILHO B. S.; NEPSTAD, D.; CURRAN, L.; VOLL, E.; CERQUEIRA, G.; GARCIA, R. A.; RAMOS, C. A.; MCDONALD, A.; LEFEBVRE, P.; SCHLESINGER, P. Modeling conservation in the Amazon basin. **Nature**, London, v. 440, p. 520-523, 2006.

SOARES-FILHO B.S.; RODRIGUES H.O.; COSTA, W.L. Modeling environmental Dynamics with Dinamica EGO. Belo Horizonte: Centro de Sensoriamento Remoto. Disponível em: http://csr.ufmg.br/dinamica/tutorial/Dinamica_EGO_guidebook.pdf. 2009.

SOARES-FILHO, B.S.; LIMA, L.; BOWMAN, M.; VIANA, L.; GOUVELLO, C. 2012. Challenges for a low carbon agriculture and forest conservation in Brazil. Sustainability Reports. IADB, Washington. Disponível em: <http://www.iadb.org/sustainability/soares>. Acesso em Outubro 2012.

SOARES-FILHO, B.; RODRIGUES, H.O.; FOLLADOR, M. A hybrid analytical-heuristic method for calibrating land-use change models. **Environmental Modelling & Software**, n. 43, p. 80-87, 2013.

UNEP. **Forests in a green economy: a synthesis**. St-Martin-Bellevue, França: United Nations Environmental Programme; 2011.

VALVERDE, S.R.; SOARES, N.S.; SILVA, M.L.; JACOVINE, L.A.G.; NEIVA, S.A. O comportamento do mercado da madeira de eucalipto no Brasil. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 4, p. 393-403, 2004.

VALVERDE, S.R. A legislação que afaga é a mesma que pune. **Revista Opiniões**, n. 33, p. 34-35, 2013.

VELKAMP, A.; LAMBIN, E.F. Predicting land-use change. **Agriculture, Ecosystems and Environmental**. n. 85, p. 1-6, 2001.

VELDKAMP, A.; VERBURG, P.H. Modelling land use change and environmental impact. **Journal of Environmental Management**, n. 72, p. 1-3, 2004.

VERBURG, P.H.; ERB, K.; MERTZ, O.; ESPINDOLA, G. Land system science: between global challenges and local realities. *Current Opinion on Environmental Sustainability*. n. 5, p. 433-437, 2013.

VITAL, M.H.F.; PINTO, M.A.C. Condições para a sustentabilidade da produção de carvão vegetal para a fabricação de ferrogusa no Brasil. **Banco Nacional do Desenvolvimento**. BNDES Setorial 30, p. 237-297, 2009

WAINWRIGHT, J.; MULLIGAN, M. *Environmental modelling: finding simplicity in complexity*. Chichester, West Sussex, England; Hoboken, NJ: Wiley, 2004. xxii, 408 p.

APÊNDICE

Material Suplementar

Base de dados

As bases de dados utilizadas integram informações disponibilizadas por órgãos governamentais e não governamentais, coletadas considerando critério de atualização, escala e representatividade nacional (Tabela S1).

As normais climatológicas de temperatura e precipitação foram obtidas a partir do banco de dados WorldClim (Hijmans *et al.*, 2005) e as normais de umidade relativa obtidas do banco de dados Climond (Kriticos *et al.*, 2012). O balanço hídrico climatológico - BHC (Thornthwaite e Mather, 1955) foi utilizado neste trabalho para o cálculo dos excedentes hídricos e déficits hídricos mensais baseados nas normais climatológicas, baseando-se no modelo especializado do BHC desenvolvido por Lima *et al.* (2012) para a plataforma DINAMICA-EGO. Foi assumida uma capacidade máxima de armazenamento de água no solo (CAD) de 300 mm, conforme é indicado para espécies florestais (Pereira *et al.*, 2002).

Tabela S1: Variáveis espaciais com as respectivas fontes

Variável	Fonte	Resolução / Escala
Precipitação anual (mm/ano)	Normais climatológicas do banco de dados WorldClim (Hijmans <i>et al.</i> , 2005).	30 arco-segundos
Temperatura média anual (°C)	Normais climatológicas do banco de dados WorldClim (Hijmans <i>et al.</i> , 2005).	30 arco-segundos
Déficit hídrico anual (mm/ano)	Calculado a partir do modelo de balanço hídrico especializado de Lima <i>et al.</i> , 2012 com base nas normais climatológicas do banco de dados WorldClim (Hijmans <i>et al.</i> , 2005).	30 arco-segundos
Malha rodoviária brasileira	Base de Dados Georreferenciados do Plano Nacional de Logística e Transportes – PNLT 2010. Disponível em: http://www.transportes.gov.br/conteudo/36604	
Centros industriais consumidores de madeira de florestas plantadas	Presidência da República/Secretária de Assuntos Estratégicos/Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento. Projeto BRA 06/32 – Mapeamento de oportunidades do negócio florestal brasileiro	
Unidades de conservação	Ministério do Meio Ambiente/Cadastro nacional de unidades de conservação. Disponível em: http://mapas.mma.gov.br/i3geo/	

O Worldclim (<http://www.worldclim.org/>) consiste em um banco de dados climáticos distribuídos (conhecidos como superfícies climáticas) desenvolvido com base na interpolação de dados observados para uma resolução espacial de 30 arco-segundos (aproximadamente 1 km). O WorldClim foi criado com base na combinação de diferentes bancos de dados que coletam e organizam informações meteorológicas de estações ao redor do mundo, entre eles, o Global Historical Climatology Network (GHCN), Food and Agriculture Organization e World Meteorological Organization (WMO). Foram considerados para a criação deste banco de dados a precipitação mensal, bem como as temperaturas médias, mínimas e máximas mensais obtidas dos bancos de dados citados. Os dados foram interpolados espacialmente utilizando o software ANUSPLIN, através do 'thin-plate smoothing spline algorithm'. Latitude, longitude e relevo foram as variáveis independentes no processo de interpolação. Os dados de altimetria foram obtidos do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM, <http://srtm.csi.cgiar.org/>), inicialmente disponíveis em 90 metros de resolução e posteriormente agregados para 30 arco-segundos (aproximadamente 1 km). As normais climatológicas mensais foram calculadas para o período 1960-1990 (Hijmans *et al.*, 2005). Para cada variável, as normais são apresentadas em doze mapas, correspondentes às normais de cada mês no período.

As normais climatológicas mensais de umidade relativa do ar foram obtidas a partir do banco de dados Climond (Kriticos *et al.*, 2012) em resolução espacial original de 10 arco-minutos (aproximadamente 19 km na latitude do Equador). O banco de dados se encontra disponível no sítio <https://www.climond.org/>.

Estimativa da produção dos produtos madeireiros e área ocupada por florestas plantadas

Segundo o plano PNM/2030 (MME, 2011), baseado em um cenário de referência que considerou o histórico recente e a análise qualitativa de tendências de evolução do mercado, o governo brasileiro espera que a produção de aço bruto crescerá 7,5%aa no período entre 2012 e 2015, 4,8%aa entre 2015 e 2022 e cerca de 5,1%aa até 2030. Por outro lado, para o ferrogusa de mercado³ prevê-se um modesto crescimento de 2,8%aa de 2012 a 2015 e de 4,2%aa entre 2015 e 2030 (Figura S1).

³ O ferrogusa de mercado é uma mercadoria (*commodity*) produzida nas usinas produtoras exclusivamente de gusa com especificações para o uso nas aciarias (fabricação de aço) e fundições (fabricação de peças fundidas de ferro) normalmente de terceiros. Corresponde à produção independente de gusa. A produção total de ferrogusa é o resultado da produção independente e integrada, ou seja, aquela integrada fisicamente na planta produtora de aço.

Mantendo o ritmo de crescimento econômico esperado de 5,1% ao ano e as expectativas para o mercado externo, em 2015, ainda segundo o Plano, a previsão é de que o Brasil alcançará uma produção de aço bruto de 56 Mt, em 2022, de 78 Mt e, em 2030, de 116 Mt. Prevê-se que, mesmo com a manutenção do déficit de infraestrutura e do baixo consumo de bens intensivos em aço no Brasil, o consumo aparente de aço evolua acima do crescimento da economia, pelo menos até 2022, podendo, em 2030, o consumo *per capita* alcançar 400 kg. Para o ferrogusa por outro lado, o PNM/2030 adotou uma baixa taxa de crescimento das exportações até 2015, alinhada com a previsão de evolução da economia do principal país importador, os EUA (mais de 50%).

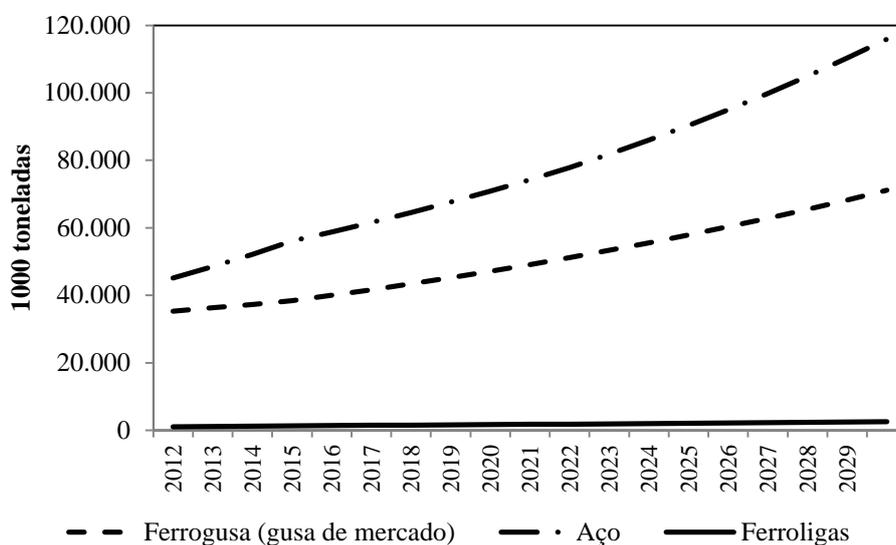


Figura S1 - Projeção da produção brasileira de aço, ferrogusa e ferroligas (2012-2030).
Fonte: MME, 2011

No processo de redução do minério de ferro praticado no Brasil, em que se obtém o ferrogusa, e na produção das ferroligas há a utilização como agente termo-redutor o coque de carvão mineral, de origem fóssil, e do carvão vegetal. As séries históricas de produção disponíveis (2003-2012) indicam que, em média, cerca de 29% da produção brasileira de ferrogusa e 89% da produção de ferroligas e silício metálico foi baseada em carvão vegetal (Tabela S2).

Tabela S2: Produção brasileira de ferrogusa e ferroligas segundo agente termo-redutor
 Fonte: MME, 2012; MME, 2009

Ano	Produção de Ferrogusa (ton)				Produção de Ferroligas e Silício metálico* (ton)					
	Baseado em Carvão Vegetal	%	Baseado em Coque	%	Total Ferrogusa	Baseado em Carvão Vegetal	%	Baseado em Coque	%	Total Ferroligas
2002	8.054.074	27%	21.595.610	73%	29.649.684	880.000	89%	107.150	11%	987.150
2003	9.450.617	30%	22.564.026	70%	32.014.643	939.000	89%	113.680	11%	1.052.680
2004	11.534.777	33%	23.225.888	67%	34.760.665	968.000	89%	120.600	11%	1.088.600
2005	11.423.114	34%	22.460.688	66%	33.883.802	1.048.000	89%	127.920	11%	1.175.920
2006	11.175.691	34%	21.275.851	66%	32.451.542	980.000	89%	126.350	11%	1.106.350
2007	11.260.707	32%	24.310.350	68%	35.571.057	1.002.000	88%	134.057	12%	1.136.057
2008	10.490.433	30%	24.380.975	70%	34.871.408	-	-	-	-	-
2009	6.271.100	25%	18.995.360	75%	25.266.460	-	-	-	-	-
2010	7.162.748	23%	23.702.000	77%	30.864.748	-	-	-	-	-
2011	8.080.504	25%	23.702.000	75%	31.782.504	-	-	-	-	-
2012	7.866.841	24%	24.580.910	76%	32.447.751	-	-	-	-	-

(*) Ligas de manganês e de silício e silício metálico

Não há indícios de que haverá mudanças substanciais nesse padrão de utilização carvão vegetal observado no passado, haja vista o evidente déficit de plantios dedicados, relatado por diversos estudos e relatórios de organizações governamentais e representativas do setor produtivo, e a existência de outras possibilidades economicamente mais atrativas do que o investimento em formações florestais dedicadas, como a utilização do carvão mineral.

Aplicando como parâmetro de média e desvio padrão em uma função de distribuição normal de probabilidade os dados registrados nas séries históricas de produção de ferrogusa e ferroligas, obteve-se os percentuais, ano a ano, relativos à produção baseada no carvão vegetal. Por seguinte, foi obtida a quantidade de carvão vegetal necessária para atender esse nível de produção, considerando o rendimento de 0,709 toneladas de carvão por tonelada de ferrogusa (PLANTAR, 2010) e de 1,6, 1,66 e 0,28 para cada tonelada de ferrosilício, silício metálico e ferromanganês respectivamente (FEAM, 2010).

Outro importante aspecto considerado para a estimativa final de área de floresta plantada foi relacionado ao carvão utilizado que teve origem nessas formações florestais (Duboc *et al.*, 2007; Morello, 2009).

Em 2008, o anuário da AMS (AMS, 2008) indicava que até aquele ano, em média, 50% do carvão vegetal consumido no Brasil tinha origem de florestas nativas. Assim, para composição do cenário tendencial, considerou-se manutenção da relação *carvão nativo x*

carvão plantado (Tabela S3) aplicando uma função de distribuição normal de probabilidade com média de 50% e desvio padrão de 6%, com o objetivo de representar essa dinâmica.

Tabela S3: Consumo final energético e participação por fonte
Fonte: AMS, 2008

Ano	Carvão vegetal nativo		Carvão vegetal plantado	
	mdc	%	mdc	%
2000	7.500	30%	17.900	70%
2001	9.115	35%	17.105	65%
2002	9.793	37%	17.027	63%
2003	12.216	42%	16.986	58%
2004	19.490	53%	17.430	47%
2005	18.862	50%	19.189	50%
2006	17.189	49%	17.936	51%
2007	17.653	48%	19.125	52%
2008	15.470	47%	17.554	53%

Os valores históricos foram validados através da relação entre a quantidade de carvão vegetal correspondente à produção total de ferrogusa registrada (MME, 2012) e a quantidade total de carvão produzido na silvicultura (IBGE, 2011). A partir disso, obteve-se a quantidade estimada de carvão vegetal produzido por florestas plantadas.

Nas projeções do PDEE (MME/EPE, 2012) os biocombustíveis, incluindo o bagaço de cana, a lixívia e a lenha, aumentam sua participação no decênio, passando de 29,3% para 33,3%. O consumo final energético para a lenha será de 12.961 x 10³ tep em 2012, 13.726 x 10³ tep em 2016 e 14.754 x 10³ tep em 2021, com uma variação líquida de 1,4%a.a. no período 2012-2016 e de 1,5%a.a. em 2016-2021 (Tabela S4).

Tabela S4: Consumo final energético e participação por fonte
Fonte: Plano Decenal de Expansão de Energia 2021

Discriminação	2012		2016		2021		Variação anual		
	10 ³ tep	%	10 ³ tep	%	10 ³ tep	%	2012 / 2016	2016 / 2021	2011 / 2021
Gás natural	17.867	7,5	22.808	7,8	29.414	8,1	6,1	5,2	5,7
Lenha	12.961	5,4	13.726	4,7	14.754	4,1	1,4	1,5	-1
Bagaço de cana	29.032	12,2	39.367	13,4	50.010	13,7	7,6	4,9	6,2
Eletricidade	43.011	18,1	53.232	18,1	66.544	18,3	5,2	4,6	4,9
Etanol	11.353	4,8	21.158	7,2	31.655	8,7	14,5	8,4	11,4
Biodiesel	2.339	1	2.865	1	3.408	0,9	5,6	3,5	4,6
Outros	8.309	3,5	10.871	3,7	13.925	3,8	7	5,1	6,1
Derivados de petróleo	95.637	40,1	107.003	36,4	126.626	34,8	3,5	3,4	3,5
Consumo final energético	238.243	100	294.057	100	363.798	100	5,1	4,3	4,7

A variação percentual anual do consumo desse energético entre 2012 e 2021 mostrou-se pouco significativo no horizonte do projeto e conseqüentemente para a área de floresta plantada correspondente. Além disso, como a lenha no Brasil é um insumo energético demandado por diversos setores, conforme Balanço Energético Nacional (EPE, 2012), sua trajetória tendencial de produção e consumo passa por complexas análises da dinâmica dos setores e seus determinantes, além da competição com substitutos. Com isso, a lenha não foi considerada nas projeções desse estudo.

Para a produção dos produtos madeireiros das florestas plantadas: celulose e painéis de madeira industrializada (formado pelas indústrias produtoras de painéis de MDP (aglomerado), MDF, OSB e chapas de fibra), partiu-se das taxas médias de produção verificada no período entre 2000 e 2011 (Tabela S5), extrapolando-as para o futuro.

Tabela S5: Produção de produtos madeireiros das florestas plantadas e taxa média geométrica de crescimento no período (2000-2011)
 Fonte: BRACELPA, 2013 e ABRAF, 2006 e 2012

	Celulose	Painéis de madeira industrializada
	(ton x 10 ³)	(m ³ x 10 ³)
2000	6.600	2.650
2001	7.412	2.977
2002	8.021	3.096
2003	9.069	3.466
2004	9.620	3.998
2005	10.352	3.962
2006	11.180	4.426
2007	11.997	4.963
2008	12.697	5.202
2009	13.315	5.283
2010	14.164	6.400
2011	13.922	6.500
%a.a	7,02	8,50

Nos últimos cinco anos (2007-2011), a indústria nacional de celulose cresceu em média cerca de 7,02 % a.a., reflexo principalmente do aumento das exportações realizadas para os mercados asiático e europeu (ABRAF, 2012). Em 2011, a produção de celulose totalizou 13,9 milhões de toneladas.

Segundo a ABRAF, a produção anual de painéis de madeira industrializada cresceu de 2,7 milhões de toneladas para 6,4 milhões, ou seja, um crescimento médio de 8,5% a.a. no período entre 2000 e 2011.

Quando a produção de compensados e madeira serrada a partir de florestas plantadas, o histórico recente (Figura S2) indica a tendência de declínio da produção desses produtos. Entre 2005 e 2011 a produção de compensados recuou cerca de 3,4% ao ano, enquanto a produção de madeira serrada recuou em média 1,5% ao ano no mesmo período. Especialistas consultados indicaram a consistência da tendência apresentada pelo histórico e sua manutenção nos próximos anos. O declínio da produção de madeira serrada está relacionada a competição frente a madeira originaria do manejo de espécies nativas brasileiras, por outro lado, o declínio da produção do compensado estaria respondendo ao menor consumo desse produto no Brasil.

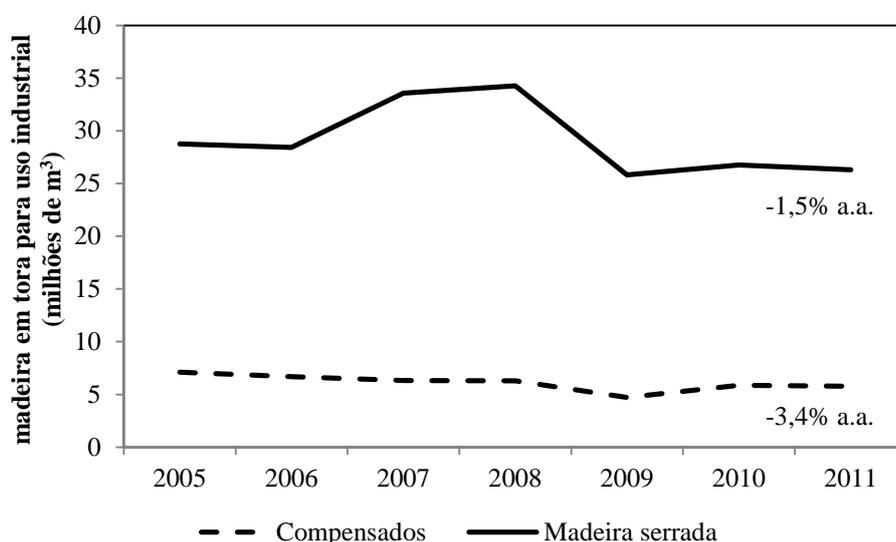


Figura S2: Produção brasileira de madeira em tora para uso industrial por segmento (2005-2011)

Por seguinte, foram utilizados os fatores de conversão tora equivalente-produto (Tabela S6) combinados com as taxas históricas de crescimento da produção de madeira para a obtenção da quantidade aproximada em volume de tora de madeira utilizada na produção.

Tabela S6: Fatores de conversão tora equivalente-produto

Fonte: ABRAF, 2012

Produto	Unidade	Fator de Conversão
Celulose (Fibra Curta e Longa)	m ³ tora / t (produto)	4,00
Aglomerado / MDF / Chapa Dura	m ³ tora / m ³ (produto)	2,00

Validação da quantidade

A *Analysis Of Variance* - ANOVA consiste na análise da variabilidade total, medida pela soma de quadrados total (SQT), que associa as fontes da variação decompostas, conforme expresso na equação A.1 (Mingoti, 2005):

$$SQT = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (\bar{y}_i - \bar{y}_{...})^2 \quad (A.1)$$

A primeira componente da equação, $\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$, sendo y a área de floresta plantada, representa a soma de quadrados do erro e indica o quanto o modelo não consegue explicar (área de floresta observada versus área de floresta estimada). A segunda, $\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} (\bar{y}_i - \bar{y}_{...})^2$, representa a soma de quadrados do modelo e remete ao quanto de variação (área de floresta estimada pelo modelo versus a média global) o modelo conseguiu explicar e que é admitido, considerando que y é uma variável aleatória. A razão entre esses componentes, a estatística F , indica se o modelo pode explicar (>1) mais do que não explicar (<1) a variabilidade da estimativa, sugerindo se há ou não ajuste, com significância estatística expressa pelo p -valor, calculado utilizando a distribuição F .

Os resultados são indicados nas Tabelas S7 e S8.

Tabela S7: Área total, estimada e observada, de floresta plantada no Brasil
Fonte: ABRAF, 2012

Ano	Área total estimada (ha)	Área total observada (ha)	Erro
2006	5.474.609	5.620.303	-145.694
2007	5.643.905	5.844.367	-200.462
2008	5.989.059	6.157.750	-168.691
2009	6.234.380	6.310.450	-76.070
2010	6.440.879	6.510.693	-69.814
2011	6.670.479	6.515.844	154.635

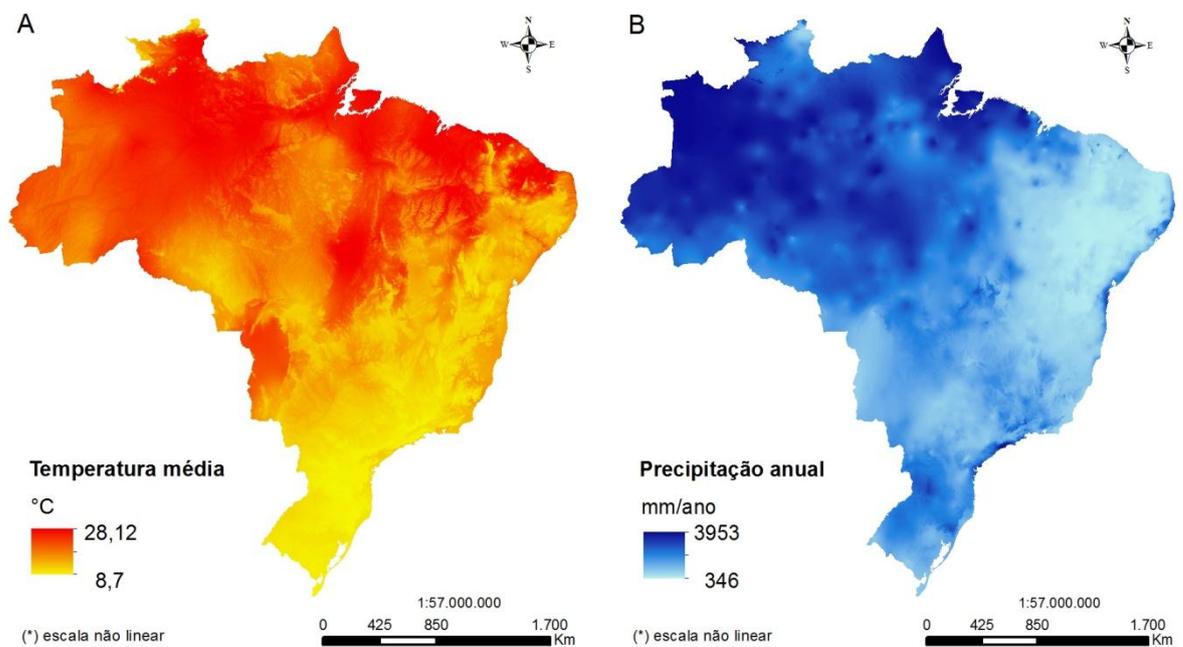
Tabela S8: Resultados ANOVA e teste F da validação da estimativa de área de floresta plantada

ANOVA e Teste F					
	gl	SQ	MQ	F	F de significação (p -valor)
Modelo	1	1,06756E+12	1,06756E+12	52,23395906	0,001944256
Resíduo	4	81752232883	20438058221		
Total	5	1,14931E+12	2,29863E+11		

Calibração do modelo espacial

As variáveis espaciais climatológicas, cujas fontes dos dados estão indicadas na Tabela S1, utilizadas para o mapa de favorabilidade climática foram: i) precipitação anual; ii) temperatura média anual e; iii) déficit hídrico anual (Figura S3).

Além dessas variáveis, utilizou-se o mapa dos plantios florestais em Minas Gerais como o componente do método para indicar as células de ocorrência dos plantios florestais. Como resultado, obteve-se os coeficientes de pesos de evidência (Figuras S4, S5 e S6). Valores positivos elevados para pesos de evidência indicam um favorecimento ao evento modelado, de modo que quanto maior for o valor, mais forte é a associação. Por outro lado, valores negativos de W_k^+ indicam um efeito inibitório, enquanto que valores próximos de zero sugerem um insignificante efeito (Bonhan-Carter 1994).



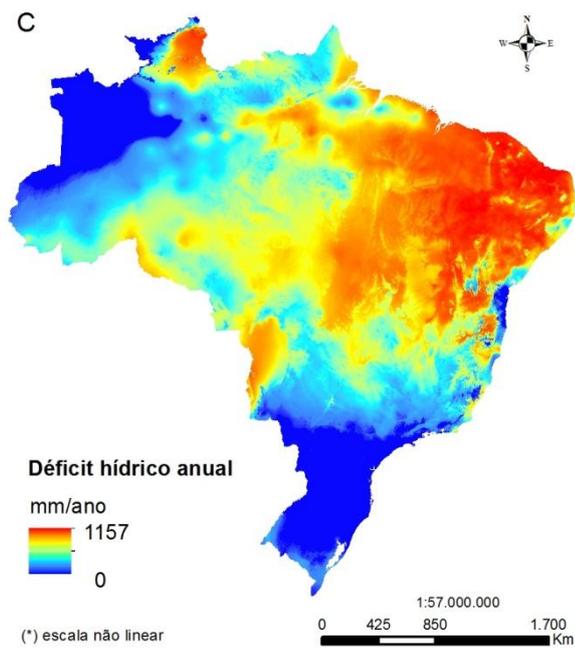


Figura S3: Variáveis climáticas. (A) Temperatura média (B) precipitação total anual (C) déficit hídrico anual

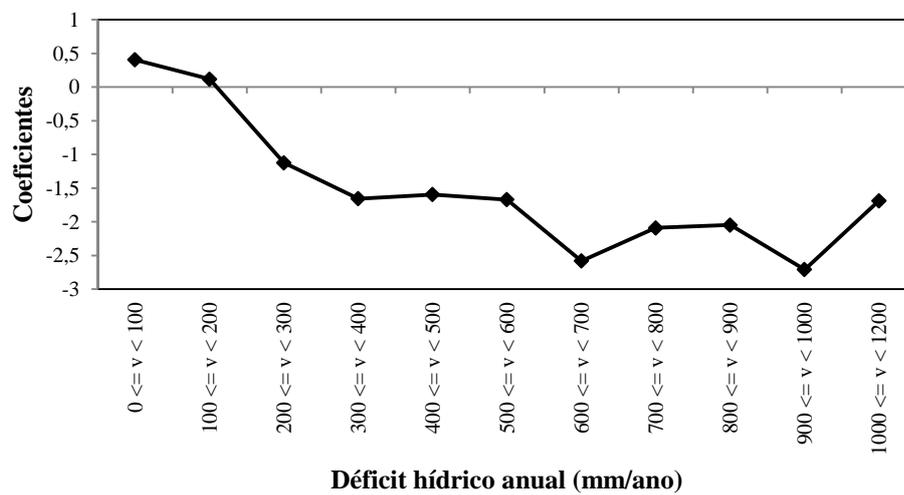


Figura S4: Coeficientes dos pesos de evidência da ocorrência dos plantios em função do déficit hídrico anual

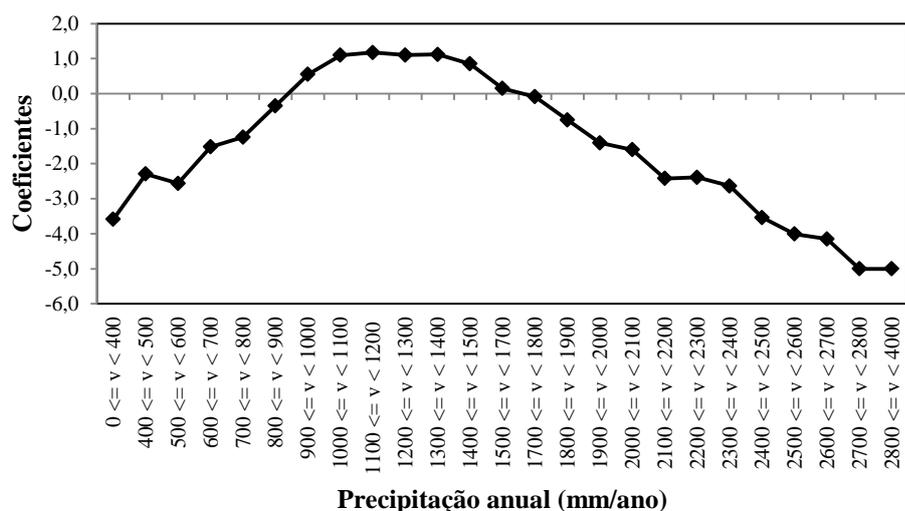


Figura S5: Coeficientes dos pesos de evidência da ocorrência dos plantios em função da precipitação anual

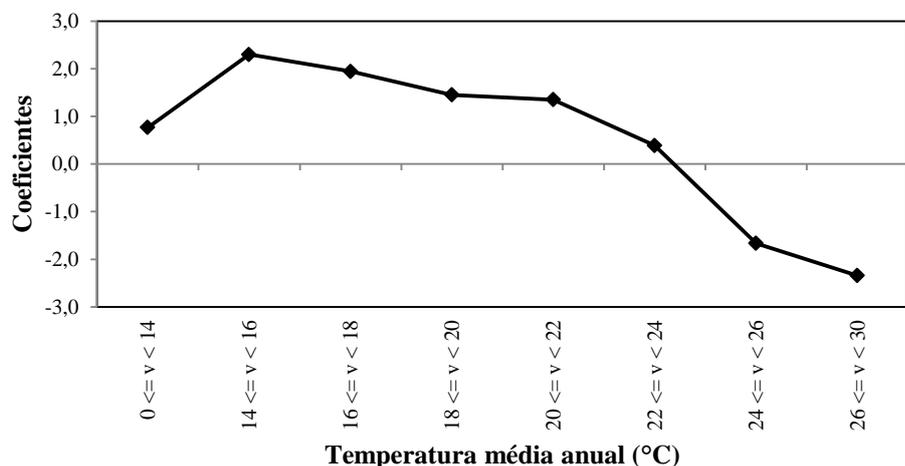


Figura S6: Coeficientes dos pesos de evidência da ocorrência dos plantios em função da temperatura média anual

Como resultado da integração dos coeficientes em função da característica de cada célula dos mapas de entrada indicando a condição climatológica, regiões definidas como mais favoráveis às formações de florestas plantadas são aquelas cujas condições climáticas são próximas das características dos locais onde atualmente ocorrem as formações. A favorabilidade é representada em valores contínuos de 0 a 1.

Como o único requisito para este método é que todas as variáveis sejam independentes, essa hipótese foi testada a partir da análise de correlação entre pares de variáveis aplicando o teste de Incerteza de Informação Conjunta (Bonhan-Carter, 1994; Soares-Filho *et al.*, 2002; Soares-Filho *et al.*, 2009). Além disso, a significância de cada variável exploratória (poder de explicação) foi avaliada comparando o contraste dos pesos de evidência ($W_k^+ - W_k^-$) para cada uma das variáveis categóricas, de modo que as variáveis mais

importantes apresentaram os maiores contrastes e, portanto, a relação mais forte com a localização da célula de floresta plantada.

As dimensões continentais do Brasil favoreceram o desenvolvimento do parque industrial de base florestal ao longo de todo o seu território, porém concentrado em algumas regiões. Projetos florestais tendem a se concentrar em regiões onde aspectos regionais e logísticos favorecem a geração de economias de escala e, conseqüentemente, a elevação de seus níveis de competitividade. As regiões onde estão localizados os principais centros industriais consumidores de madeira de florestas plantadas estão assinaladas na Figura S7 (dados cedidos pela Secretaria de Assuntos Estratégicos – SAE/Presidência da República).

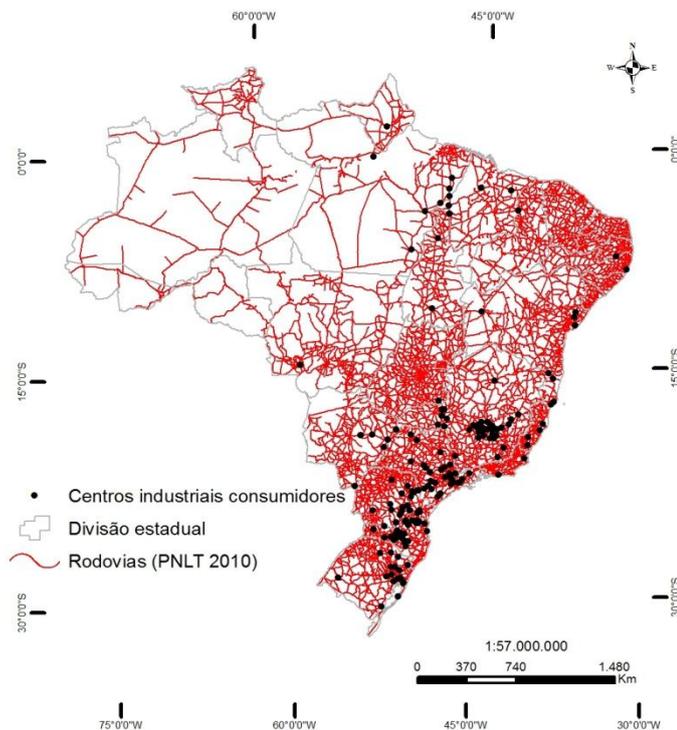


Figura S7: Principais centros industriais consumidores e malha rodoviária

Rezende *et al.* (2006), identificaram um valor para transporte em 2006 equivalente a um litro de óleo diesel por quilometro rodado. Desta forma, considerou neste estudo o valor médio do diesel no Brasil em 2012 de R\$ 2,42. A capacidade média de carga indicada pela Associação Mineira de Silvicultura - AMS é de 75 mdc, para carvão vegetal, e de 28,6 m³ para o transporte de madeira. O resultado obtido aplicando-se a equação foi validado a partir de dados disponibilizados pela AMS de seus associados.

As superfícies espaço-econômicas representando a variação espacial da rentabilidade potencial da atividade florestal, por produto e baseando-se principalmente no custo de transporte, são apresentadas na Figura S8.

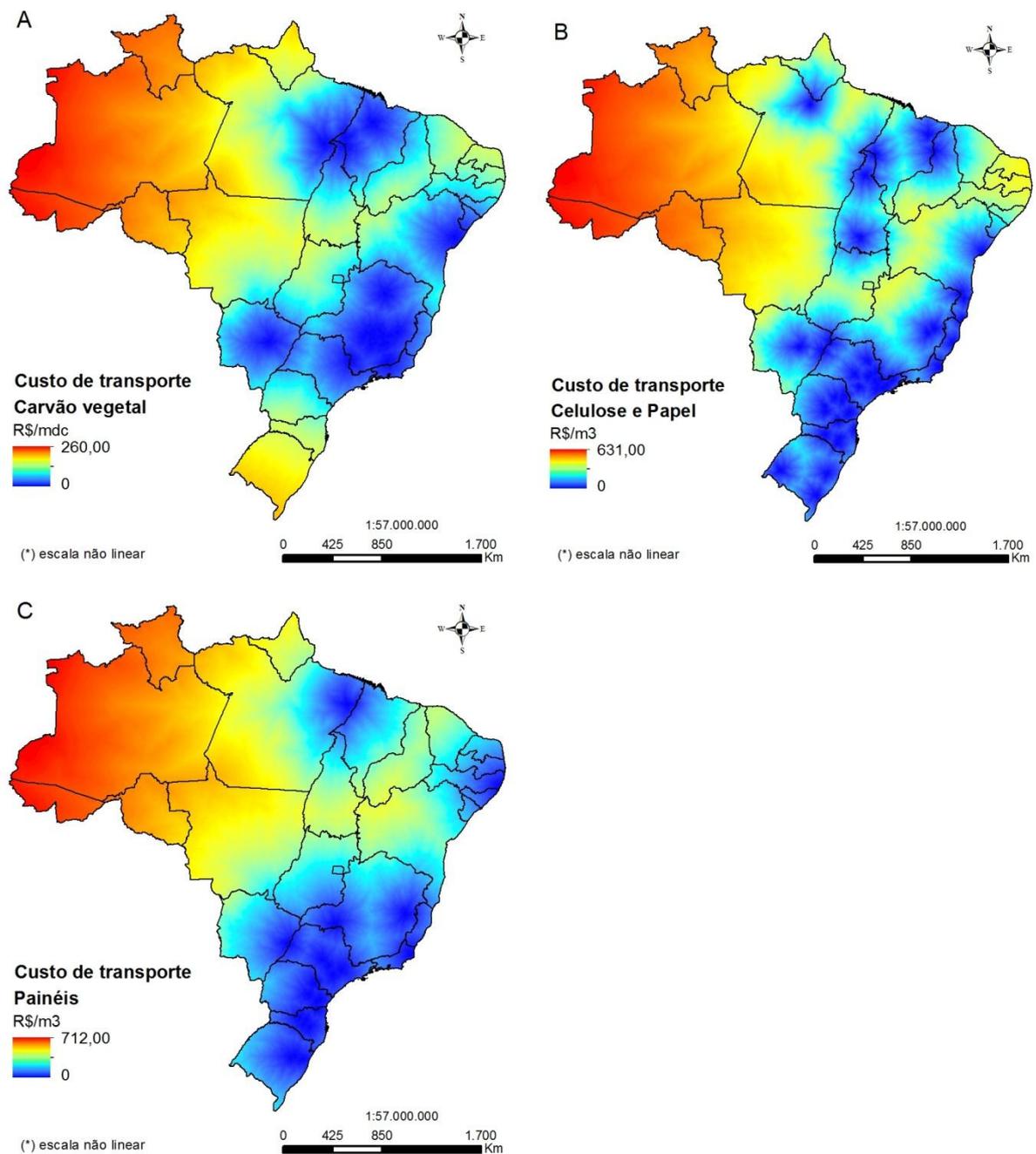


Figura S8: Superfície do custo unitário de transporte rodoviário de madeira. (A) Carvão vegetal (B) madeira para celulose e papel e (E) madeira para painéis industrializados

Para a análise de rentabilidade de projetos florestais neste estudo, não foi considerado o custo da terra, de maneira a compatibilizar essa análise com o conceito de custo operacional da agricultura definido pela Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB como a soma das despesas efetivamente desembolsadas pelo produtor nos tratos da cultura (CONAB, 2010). Esse custo não inclui a retribuição ao fator terra, a remuneração ao empresário e a remuneração ao capital fixo (juros de investimentos), itens que fazem parte das estruturas de

custo total de produção. Os valores de custos comuns referentes à implantação, manutenção e replantio foram baseados no custo de produção (R\$/ha) apresentado no Anuário da Agricultura Brasileira – 2012 (AGRIANUAL, 2012).

Todos os fatores componentes dos custos de implantação (preparo do solo, aplicação de herbicidas, combate a formigas, plantio, replantio, etc.) podem variar devido a peculiaridades locais e particularidades de cada produtor, apresentando efeito menos evidente na análise econômica (Rezende *et al.*, 2006). Assim, adotou-se um valor fixo, para o efeito da análise, levantado por empresas de silvicultura na adoção de todos os tratos silviculturais para um correto estabelecimento e condução do povoamento florestal.

Como não há dados disponíveis dos custos de colheita e carbonização especialmente específicos para as diversas regiões produtoras, foram utilizados valores típicos atualmente praticados no estado, de acordo com empresas florestais envolvidas na produção madeireira (Guedes *et al.*, 2011) e custos correntes (FNP, 2012). Esses itens do custo de produção são apresentados na Tabela S9.

Tabela S9: Custos envolvidos na produção madeireira
Fonte: Guedes *et al.*, 2011; FNP, 2012

Descrição	Anos de ocorrência	Unidade	Total
Custo implantação ⁴	0	R\$/ha	3.609,74
Custo manutenção ⁵	Anual	R\$/ha	591,30
Custo manutenção	2	R\$/ha	670,87
Custo manutenção	Anos de colheita	R\$/ha	1.135,53
Custo replantio	Anos de colheita	R\$/ha	213,00
Custo colheita	Anos de colheita	R\$/m ³	24,47
Custo carbonização	Anos de colheita	R\$/mdc	30,10

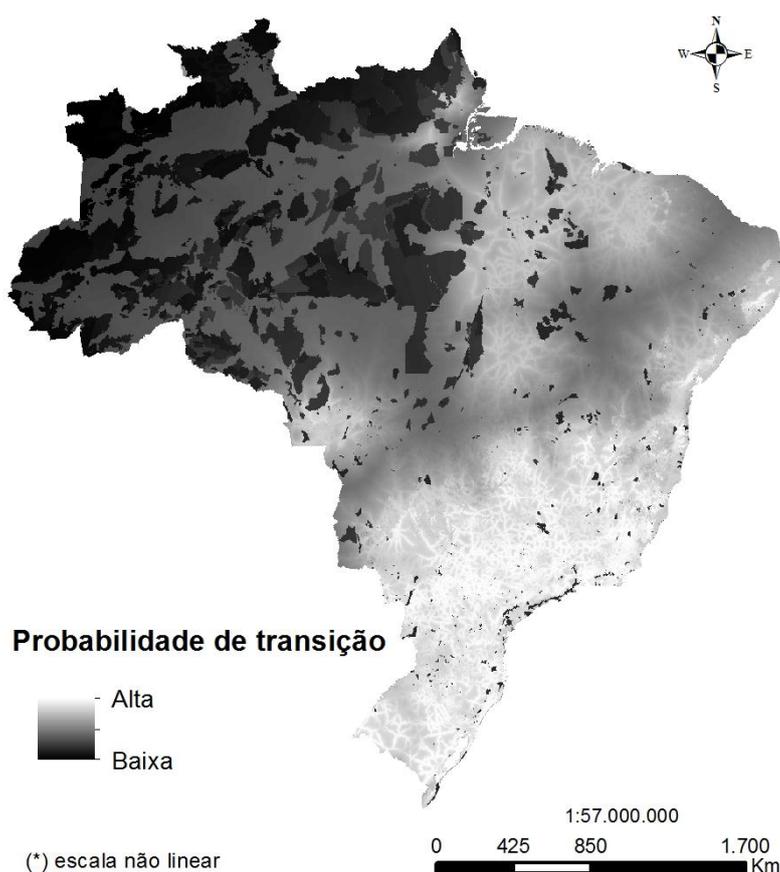
⁴ Referente a: Operações Mecanizadas (Preparo do Solo + Adubação, Outras Despesas); Operações Manuais (Preparo do solo + adubação, Preparo do solo + Plantio, Tratos Culturais); Insumos e; Administração

⁵ Referente a: Operações Mecanizadas (Tratos Culturais, Outras Despesas); Operações Manuais (Tratos Culturais); Insumos e; Administração

Considerou-se três rotações do eucalipto com cortes rasos aos 7, 14 e 21 para a produção de carvão e madeira para processo, com produtividade esperada para o primeiro corte de 300 m³/ha e decaimento de 10% a cada ciclo. Assim, assumiu projetos florestais para a produção de madeira com o horizonte de 21 anos e a uma taxa de juros de 5%. É comum em pesquisas relativas à viabilidade econômica no setor florestal o uso de taxas de juros arbitrariamente escolhidas na amplitude de 4 a 15% a.a (Rezende *et al.*, 2006).

O fator de conversão m³/mdc aplicado foi de 1,45 (Guedes *et al.*, 2011) e de 1,40 para m³/st. O preço de venda da madeira considerado foi de 97,27 R\$/mdc para o carvão, de 70,00 e R\$/st de madeira para torete, que representam a média dos preços em 2012 registrados pelo Centro de Inteligência em Florestas⁶.

O mapa de probabilidade de transição foi obtido pelo somatório desses componentes, sendo o resultado equalizado para ser representado com 65535 níveis de cinza (Figura S9).



FiguraS9: Probabilidade de transição para floresta plantada

⁶ Séries históricas da cotação dos principais produtos madeireiros e não-madeireiros de florestas plantadas disponível em: <http://www.ciflorestas.com.br/cotacoes.php>

As transições de células, baseadas quantitativamente nas projeções de área obtidas, ocorreram pela expansão das áreas de florestas plantadas previamente existentes ou através da geração de novas áreas através de um mecanismo de semeadura (Soares-Filho *et al*, 2009). Sendo os estados j (floresta plantada) e i (pastagem), para a expansão de áreas foram executadas transições para o estado j somente nas vizinhanças adjacentes de células com o estado j . Já para a geração novas áreas efetuaram-se transições do estado i para um estado j apenas nas vizinhanças imediatas de células com estado diferente de j .

Referências bibliográficas

AGRIANUAL – 2009. **Anuário da agricultura brasileira: cebola**. São Paulo: FNP Consultoria e Comércio, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico 2006**: ano base 2005. Brasília: ABRAF, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS. **Anuário estatístico 2012**: ano base 2011. Brasília: ABRAF, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL. **Dados do setor** – fevereiro 2013. São Paulo: BRACELPA, 2013.

BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic Information Systems for geoscientists: modelling with GIS**. 1st ed. Kidlington, UK: Elsevier Science Ltd, 1994.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB. **Custos de produção agrícola**: a metodologia da CONAB. Brasília, 2010. Disponível em <http://www.conab.gov.br/>.

DUBOC, E.; COSTA, C.J., VE.LOSO, R.F.; OLIVEIRA, L.S.; PALUDO, A. **Panorama atual da produção de carvão vegetal no Brasil e no Cerrado**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2007.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE. Levantamento da situação ambiental e energética do setor de ferroligas e silício metálico no estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: FEAM, 2010

GUEDES, I.C.L.; COELHO-JUNIOR, L.M.; OLIVEIRA, A.D.; MELLO, J.M.; REZENDE, J.L.P.; SILVA, C.P.C. Economic analysis of replacement regeneration and coppice regeneration in eucalyptus stands under risk conditions. **Cerne**, n. 3, p. 393-401, 2011.

HIJMANS, R.J.; CAMERON, S.E.; PARRA, J.L.; JONES, P.G.; JARVIS, A. (2005) Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology** 25: 1965-1978.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Produção da extração vegetal e da silvicultura – PEVS 1990 - 2011**. 2011. Disponível em www.sidra.ibge.gov.br.

KRITICOS, D.J.; WEBBER, B.L.; LERICHE, A.; OTA, N.; MACADAM, I.; BATHOLS, J.; SCOTT, J.K. CliMond: global high resolution historical and future scenario climate surfaces for bioclimatic modelling. **Methods in Ecology and Evolution**. n. 3, p. 53-64, 2012.

LIMA, L. S.; OLIVEIRA, L. J. C.; SOARE FILHO, B. S.; RODRIGUES, H. O. H. Balanço hídrico climatológico espacializado para o Brasil. **XVII Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 23 a 28 de Setembro de 2012, Gramado, RS. Anais.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA - MME. **Plano nacional de mineração 2030**. 178 p. Brasília: MME, 2011.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. **Anuário estatístico do setor metalúrgico**. 119 p. Brasília: MME, 2012

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA – MME e EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Plano decenal de expansão de energia 2021**. 386 p. Brasília: MME/EPE, 2012.

MINGOTI, S.A. **Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada**. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2005. 295 p.

MORELLO, T.F. **Carvão vegetal e siderurgia: de elo perdido a solução para um mundo pós-Kioto**. PhD thesis, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 2002. 478 p

PLANTAR. **Mecanismo de desenvolvimento limpo**: formulário do documento de concepção do projeto (CDM-PDD). Belo Horizonte: PLANTAR S/A, 2010.

REZENDE, J.L.P.; PADUA, C.T.J.; OLIVEIRA, A.D.; SCOLFORO, J.R.S. Análise Econômica de fomento florestal com eucalipto no estado de Minas Gerais. **Cerne**, n. 3, p. 221-231, 2006.

SOARES-FILHO, B. S.; PENNACHIN, C. L.; CERQUEIRA, G. DINAMICA: a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. **Ecological Modelling**, n. 3, p. 217-235, 2002.

SOARES-FILHO, B.; RODRIGUES, H.O.; COSTA, W.L. **Manual Dinamica EGO**. Belo Horizonte: CSR/UFMG, 2009. Disponível em: <<http://www.csr.ufmg.br/dinamica/>>. Acesso em: 23 de março de 2012.

THORNTHWAITE, C.W.; MATTHEW, J.R. **The water balance**. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Techonology, 1955. 104p.