

Consequências da expansão de biocombustíveis no Brasil sobre uso da terra, água e a economia até 2030 sob mudanças climáticas

Tema: Fontes Renováveis de energia

Perspectiva: Econômica, Social, Ambiental

Martin Obermaier, William Wills, Carey W. King, Marcelo M. Moreira, Renata del Giudice, Rodriguez, Willian Kimura, Leila Harfuch, Luciane Chiodi Bachion

Martin Obermaier, D.Sc. e William Wills, D.Sc.

Programa de Planejamento Energético – COPPE/UFRJ

Centro de Tecnologia, Sala C-211,

Centro Universitário – Ilha do Fundão

21941-972 Rio de Janeiro - RJ

Brasil

E-mails: martin@ppe.ufrj.br, wwills@lima.coppe.ufrj.br

Tel.: +55 21 3939-8760

Carey W. King, Ph.D. e Renata del Giudice Rodriguez, D.Sc.

Energy Institute, The University of Texas at Austin, TX, USA

E-mails: careyking@energy.utexas.edu, rdgrodriuez76@gmail.com

Marcelo M. Moreira, D.Sc., Willian Kimura, M.Sc., Leila Harfuch, D.Sc. e Luciane Bachion, M.Sc.

Agroicone

Avenida Angélica, nº 2447 conjunto 173 – Higienópolis

01227-200 São Paulo – SP

Brasil

E-mails: marcelo@agroicone.com.br, leila@agroicone.com.br, luciane@agroicone.com.br

Consequências da expansão de biocombustíveis no Brasil sobre uso da terra, água e a economia até 2030 sob mudanças climáticas

Resumo

A expansão de biocombustíveis brasileiros está no centro de um debate sobre a sustentabilidade do setor; inicialmente pelo seu potencial para contribuir para mitigação de emissões de efeito estufa (GEE), mas hoje também em relação a impactos sociais e ambientais como no caso do possível deslocamento da fronteira agrícola para a floresta amazônica, impactos sobre a disponibilidade de recursos hídricos ou a sua contribuição para objetivos sociais como é o caso para a redução da pobreza. O impacto da mudança climática até 2030 pode ainda fortalecer esses potenciais conflitos (ou *trade-offs* em inglês). Pelo outro lado, há uma expectativa de que a expansão sustentável da produção de biocombustíveis poderá contribuir para uma transição para uma economia de baixo carbono. Para identificar e quantificar possíveis sinergias ou *trade-offs* entre os setores da energia, uso da terra, macroeconomia e recursos hídricos essa pesquisa buscou a desenvolver uma modelagem integrada, utilizando um conjunto de cenários socioeconômicos, climáticos e energéticos até 2030. O artigo aqui apresenta uma primeira tentativa de sumarizar os resultados dessa pesquisa, mostrando de que a sustentabilidade dos biocombustíveis só pode ser entendida dentro de uma análise setorialmente integrada que inclui a expansão da agropecuária, metas para conservação, e o desenvolvimento sustentável.

1. Introdução

Biocombustíveis possuem um papel importante no contexto das mudanças climáticas. Limitar o aquecimento global até 2100 entre +1.5°C a +2°C, conforme concordado na COP21 em Paris, vai requerer ações ambiciosas nos setores uso da terra e florestas (e.g. redução de desmatamento em florestas tropicais) e energia (e.g. transição para biocombustíveis sustentáveis), já que estes setores respondem atualmente (2012) por cerca de 38.0% das emissões antropogênicas anuais em todo mundo – agricultura, florestas e outros uso da terra por 24% (17 GtCO₂eq), e transporte 14% (7 GtCO₂eq) (IPCC, 2014). Biocombustíveis líquidos como opções de baixo carbono para mitigação de emissões de gases de efeito estufa (GEE) afetam esses setores, já que o desmatamento direto ou indireto (uso da terra e florestas) induzido pela produção de matérias-primas de biocombustíveis pode invalidar o seu potencial dentro de uma matriz energética mais sustentável (energia para transporte).

Esta discussão está muito presente no Brasil no processo de implementação das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDC, ou *Nationally Determined Contributions* em inglês) (BRASIL, 2015) em que o país se comprometeu a reduzir as suas emissões de GEE em relação ao ano base de 2005 em 37% no ano 2025, com a proposta de reduzir ainda mais as emissões em 43% para ano 2030. O alcance destas metas ambiciosas é ligado a (i) um forte aumento em escala e desenvolvimento tecnológico no setor de biocombustíveis sustentáveis (inclusive etanol e biodiesel) que deveriam suprir 18% da matriz energética brasileira até 2030, e (ii) à adoção de medidas de larga escala na área de uso da terra e florestas, incluindo uma meta de zerar o desmatamento ilegal na Amazônia brasileira até 2030 (BRASIL, 2015).

Neste contexto, uma dúvida é se será possível aumentar a produção e uso de biocombustíveis (inclusive um aumento provável da área agrícola para esta produção) sem afetar de forma adversa outros usos e fins (e.g. preços de alimentos, segurança hídrica ou pressões para expandir a fronteira agrícola).

Aqui o atual cenário para o planejamento energético já mostra desafios para a sustentabilidade dos biocombustíveis em sua função de mitigação, uma vez que estudos recentes projetam que um grande potencial de expansão dos mesmos pode ocorrer em regiões ecologicamente sensíveis dada a alta viabilidade econômica da produção de matéria-prima nessas regiões (ENGLUND et al., 2015; LAPOLA et al., 2010; YUI; YEH, 2013). Outro problema é o risco climático para a produção agrícola que tende a aumentar com a mudança climática, por exemplo, por uma maior incidência e frequência de eventos climáticos extremos (secas, chuvas extremas, etc.), o que pode levar a perdas na produção agrícola ou induzir uma nova demanda por irrigação em áreas de estresse hídrico, e assim, entre outros, exacerbar conflitos por recursos hídricos ou segurança alimentar, já que haveria – *ceteris paribus* – uma maior competição por terras agrícolas entre a produção de alimentos e de biocombustíveis. Isso somente enfatiza a questão da interconectividade entre os diferentes setores vinculados à produção de biocombustíveis, e a questão onde haverá sinergias e onde haverá *trade-offs* entre os objetivos setoriais, centrado nos setores biocombustíveis, agropecuária e segurança alimentar, florestas e conservação, e desenvolvimento socioeconômico. A tal interconectividade setorial é complexa: por exemplo, um crescente cultivo de matérias-primas para produção de biocombustíveis poderia gerar impactos positivos para o PIB, mas na ausência de outras medidas também tornar os preços de alimentos mais caros, o que poderia tornar as classes mais pobres da população (classes D e E) mais vulneráveis – o que é um argumento frequentemente usado contra a produção de biocombustíveis, ao menos em grande escala. Por outro lado, uma crescente demanda por irrigação para produção de soja ou cana-de-açúcar – dentro de condições climáticas mais adversas causadas pela mudança climática – poderia causar conflitos com outros usos, principalmente o consumo humano.

Neste contexto, pesquisas em modelagem integrada e interdisciplinar sobre energia, uso da terra e recursos hídricos têm sido úteis em analisar processos de expansão de bioenergia, e biocombustíveis em particular, onde é possível identificar e quantificar possíveis sinergias e *trade-offs* entre diferentes setores.

Um exemplo é o projeto CLIMA (clima.org.br) cuja metodologia e resultados são apresentados no presente artigo de forma sumarizada. O CLIMA utilizou conjuntos de cenários socioeconômicos, climáticos e energéticos até 2030 para identificar e quantificar possíveis sinergias ou *trade-offs* entre os setores citados, por exemplo, mensurando o possível impacto de uma crescente demanda por biocombustíveis sobre os preços de alimentos. Assim, o projeto buscou responder a uma série de questões políticas, desde a escala macro até o nível local: o papel de recursos hídricos na seca e sua disponibilidade para produção de matéria-prima de biocombustíveis, a possibilidade de conflitos entre a produção de alimentos e biocombustíveis, ou a eficácia de bioenergia de segunda geração para atenuar pressões sobre o desmatamento, segurança alimentar e outras questões ligadas ao uso da terra. Com foco para o ano 2030, o CLIMA integrou também os impactos da mudança climática sobre a produtividade de culturas, com o objetivo de identificar e entender potenciais

necessidades de adaptação no médio prazo nos setores da agricultura, recursos hídricos e biocombustíveis.

O projeto assim contribuirá para fortalecer o planejamento para o setor de biocombustíveis em (1) indicando onde a futura expansão de biocombustíveis provavelmente ocorrerá devido a forças de mercado e sob impactos da mudança climática, (2) por providenciar informações detalhadas no nível de bacias hidrográficas sob impactos da expansão de biocombustíveis sobre os recursos hídricos, (3) mostrar se – e em caso positivo, como – os cenários analisados se alinham com os atuais planos e as estratégias do Governo Brasileiro (incluindo questões relacionadas à sustentabilidade, certificação e potencial para exportação), (4) informar as partes interessadas sobre os impactos socioeconômicos e ambientais relacionados à expansão (incluindo emissões de GEE, segurança alimentar, renda e distribuição de renda), e (5) dar orientações sobre como possíveis conflitos poderiam ser mitigados.

Com base nessa argumentação, a estrutura desse artigo segue a seguinte lógica: no próximo capítulo apresentamos a metodologia de modelagem integrada do projeto. O Capítulo 3, em seguida, mostra os principais resultados de forma resumida, e o artigo termina com uma discussão dos resultados e indicações para futuras pesquisas.

2. Metodologia

2.1 Modelos e métodos utilizados

2.1.1 Redução do rendimento agrícola em relação ao requerimento líquido para irrigação

Para a análise do impacto do clima sobre a produtividade e recursos hídricos utilizamos o índice YR (*yield reduction* em inglês) que é indicativo da produção de uma cultura x relacionado aos recursos hídricos disponíveis para o seu crescimento durante o seu período vegetativo – ou seja, medem perdas relativas na produção do cultivo devido à ocorrência de estresses hídricos (BOKEN et al., 2005).

Para estimar o YR (%) relacionado ao estresse hídrico é preciso obter esses parâmetros: clima durante o cultivo (e.g., temperatura, precipitação, humidade), data do plantio e colheita, e parâmetros específicos para as culturas (e.g., cana-de-açúcar, soja). Cada cultura possui um ciclo único de plantio-colheita (e.g., o ciclo para a cana-de-açúcar é de 12 meses). A redução de rendimento para cada cultura em % sob agricultura de sequeiro assim como o requerimento líquido para irrigação sob irrigação plena para satisfazer a demanda de cada cultura foram estimados para cada município para o período 1980–2013. Precipitação diária e evapotranspiração de referência (ET_0) se baseiam numa nova série de dados meteorológicos matriciais de alta definição ($0,25^\circ \times 0,25^\circ$) referente ao período de 1980–2013 (XAVIER et al., 2015), incorporando também informações sobre tipos de solo e culturas para estimar o índice YR. Os dados para estimar a ET são baseados na equação de Penman-Monteith.

2.1.2 Redução do rendimento agrícola e mudanças climáticas

Pelo ano final de 2030 para a nossa análise buscou-se estimar o impacto da mudança do clima sobre o rendimento agrícola. Para isso estimámos o YR (%), com base na metodologia da Food and Agricultural Organization (DOORENBOS e KASSAN, 1979):

$$YR = Ky \left(1 - \frac{ET_{adj}}{ET_c} \right)$$

onde Ky é o fator de resposta sobre o rendimento (sem dimensão), ET_{adj} é a ET atual por cultura (ajustada) resultando de estresses ambientais ou hídricos (mm), e ET_c é a ET potencial (esperada) por cultura na ausência de estresses (DOORENBOS e KASSAN, 1979). A YR por cultura na equação acima é a redução porcentual no rendimento agrícola somente pela falta de água. Para utilizar o YR para estimar o rendimento absoluto (i.e., kg/hectare) é preciso de estimar de forma separadamente o rendimento absoluto sob condições de disponibilidade hídrica plena, ou seja, com $YR = 0\%$.

Para considerar os impactos da mudança climática sobre o YR utilizamos em seguida resultados de um *Global Circulation Model* (GCM) para simular os parâmetros climáticos para o futuro. O estimado YR futuro é então comparado com os estimativos para o YR histórico utilizando dados dos últimos 30 anos. Sendo assim, aumentos ou perdas no YR para cada cultura no futuro nos dão uma estimativa de impactos vinculadas ao estresse hídrico devido à mudança do clima.

Esses dados em seguida foram incluídos nas simulações sobre mudanças no uso da terra.

2.1.3 Mudanças no uso da terra

O BLUM é um modelo econômico dinâmico de equilíbrio parcial, multi-regional e multimercados para o setor agropecuário brasileiro composto por dois módulos: oferta e demanda e uso da terra. O módulo de oferta e demanda contempla produção, consumo, exportações líquidas e estoques dos principais produtos agropecuários. O módulo de uso da terra estima a área alocada para cada um dos produtos modelados, assim como a área total utilizada para agricultura. Os resultados são obtidos para seis grandes regiões no Brasil. O BLUM foi ampliado para calcular as emissões de AFOLU (agricultura, florestas e uso da terra) seguindo as orientações do IPCC (PAUSTIAN et al., 2006).

Utilizaram-se os parâmetros publicados para as atividades da Agricultura de modo que o modelo replica o segundo inventário brasileiro para esse setor. No caso de uso do solo e mudança de uso do solo, o BLUM já contemplava um modelo de cálculo emissões (EPA, 2010; Harris et al., 2009).

As estimativas do BLUM serviram de insumo para o modelo de equilíbrio geral utilizado neste estudo – o IMACLIM-R BR que descreve e simula a economia brasileira e é alimentado por modelos setoriais, combinando as abordagens de modelagem *top-down* e *bottom-up*, para avaliar as implicações macroeconômicas e sociais dos diferentes cenários. Como ambos os modelos necessitam apresentar anos base iguais, optou-se pela utilização do ano-base 2005, dado que são referentes a este ano os últimos resultados relativos à matriz insumo-produto brasileira divulgados pelo IBGE.

2.1.4 Simulação dos impactos macroeconômicos

O IMACLIM-R BR é um modelo de equilíbrio geral computável híbrido (CGE) projetado para analisar os efeitos macroeconômicos no médio e longo prazo de políticas climáticas, seja uma taxa de carbono ou um mercado de cotas de emissão de GEE, numa estrutura de contabilidade casada em que os fluxos em valores monetários e físicos (com um foco especial no Balanço Energético) estão em equilíbrio. O modelo IMACLIM-R BR utiliza informações *top-down*, como faz tradicionalmente um modelo CGE, e informações setoriais ou *bottom-up*. Esta abordagem combina dados de setores específicos da economia, como diferentes possibilidades tecnológicas para geração e uso de energia, ou processos produtivos (assim como seus custos, curvas de aprendizado, índices de penetração, etc.) com informações acerca da estrutura da economia. Com isso, contorna-se o fato de que dados *bottom-up* não têm capacidade de responder adequadamente a mudanças macroeconômicas referentes a preços de energia, à evolução da produtividade do capital e trabalho, e ao comércio exterior. Analogamente, dados puramente macroeconômicos altamente agregados, não são capazes de prever, por exemplo, a flexibilidade tecnológica que permite aos setores da economia se ajustar às políticas climáticas no médio e longo prazo (WILLS, 2013; HOURCADE et al., 2006).

No caso do presente estudo, são projetados cenários que abrangem o período entre os anos de 2005 e 2030. A atual versão do IMACLIM-R BR parte daquela desenvolvida por WILLS (2013), contando com algumas diferenças com relação à simulação das políticas climáticas simuladas, ao detalhamento do módulo das famílias, pelo fato de levar em conta os efeitos sobre a competitividade internacional das principais indústrias da economia, e principalmente por ser a uma versão que incorpora uma simulação dinâmica recursiva.

2.1.5 Impactos sobre recursos hídricos e requerimento de irrigação

Para avaliar via dois estudos de caso o impacto sobre a irrigação pela expansão da matéria-prima para produção de biocombustíveis utilizamos o modelo WEAP (*Water Evaluation And Planning system*) que é um sistema de suporte à decisão baseado no Windows para gerenciamento integrado de recursos hídricos e análise de políticas. O WEAP é uma ferramenta de construção de modelos, utilizada para criar simulações de demanda de água, fornecimento, escoamento, evapotranspiração, infiltração, requisitos de irrigação de culturas, requisitos de fluxo interno, serviços de ecossistemas, armazenamento de águas subterrâneas e de superfície, operações de reservatórios e geração de poluição, tratamento, descarga e a qualidade da água, em cenários de políticas variáveis, hidrologia, clima, uso do solo, tecnologia e fatores socioeconômicos. O WEAP foi criado em 1988, e é amplamente utilizado para estudos de adaptação às mudanças climáticas e foi aplicado por pesquisadores e planejadores em centenas de organizações em todo o mundo.

O WEAP é conhecido pela sua abordagem integrada para simular sistemas de água e pela orientação de diferentes políticas a serem testadas. O WEAP coloca o lado da demanda da equação – padrões de uso da água, eficiências de equipamentos, reutilização, custos e alocação – em pé de igualdade com o lado da oferta - fluxo, águas subterrâneas, reservatórios e transferências de água. Dessa forma, o WEAP fornece um laboratório para examinar estratégias alternativas de desenvolvimento e gerenciamento de água. Como banco de dados, o WEAP fornece um sistema para manter a demanda de água e fornecer diversas informações. Como ferramenta de previsão, o WEAP simula demanda de água, suprimento, escoamento, fluxos, armazenamento, geração de poluição, tratamento e descarga e qualidade da água. Como uma ferramenta de análise de políticas,

a WEAP avalia uma gama completa de opções de gerenciamento de água. O WEAP é distribuído gratuitamente para organizações sem fins lucrativos, acadêmicas e governamentais baseadas em países em desenvolvimento.

2.2 Modelagem Integrada

Para uma correta execução do projeto foram necessárias diversas etapas de projeto, e o envolvimento das diversas partes interessadas que ajudaram a guiar as simulações na direção mais interessante de acordo com seus pontos de vista, incluindo a definição do que seria um cenário de referência realista para a economia brasileira. Os diferentes modelos utilizados ao longo do projeto CLIMA foram interligados através de soft-links.

A primeira etapa do projeto foi a de se estimar qual seria a perda de produtividade de diversas culturas agrícolas em cenários com mudanças climáticas, e para isto, a UT Austin precisou fazer um extenso levantamento dos dados hidrológicos no Brasil desde a década de 80, e desenvolver uma metodologia para preencher os dados faltantes. A seguir, essas informações sobre a projeção de variação da produtividade com base no modelo HadGEM2ES cenário rcp6.0 foram processadas e enviadas para o modelo BLUM, que simulou a competição pelo uso do solo e projetou qual seria a variação dos preços agrícolas e da produção total de cada cultura, em cada cenário estudado. O modelo IMACLIM-R BR recebeu então as informações sobre a produção dos principais bens agrícolas, a variação de preços e de área, e os investimentos necessários para se atingir as metas de cada cenário, para cada cultura. Essas informações serviram de choque exógeno ao modelo IMACLIM-R BR, que calculou um novo ponto de equilíbrio da economia brasileira, para cada cenário. O IMACLIM analisou então indicadores macroeconômicos (PIB, balança comercial, nível de investimentos, etc.), sociais (taxa de desemprego, renda média por classe social, consumo físico e monetário de alimentos, energia, e outros consumos), e ambientais (emissões de gases de efeito estufa).

2.3 Cenário de referência e cenários alternativos

Para as nossas simulações, formulamos cinco cenários que foram posteriormente validados por um painel de especialistas. As informações para esses cenários foram solicitadas durante uma oficina de partes interessadas em agosto de 2015 e reuniões adicionais com especialistas chave no Brasil sobre biocombustíveis e sustentabilidade, e lacunas adicionais de conhecimento chave identificadas no relatório do IPCC WG2-AR5 (2014), especialmente os capítulos 27 ‘Central and South America’, 13 ‘Livelihood and Poverty’, e 9 ‘Rural areas’ (DASGUPTA et al., 2014; MAGRIN et al., 2014; OLSSON et al., 2014). Tabela 1 abaixo resume a informação sobre os cenários e as hipóteses-chaves.

Tabela 1: Cenário de referência e cenários alternativos

Cenário	Descrição
Referência (REF)	O cenário business-as-usual não adota mudanças políticas relevantes. Os dados relativos ao PIB, à população, aos preços do petróleo, etc. são retirados de fontes nacionais (IBGE, EPE) ou internacionais (FMI, OCDE) relevantes para este tipo de estudo.

	<ul style="list-style-type: none"> • Preço do petróleo: IEA - cenário de preços baixos • 10% de mistura de biodiesel no diesel em 2030 • Mercado não regulamentado de etanol de cana-de-açúcar
Referência + CC (CC1)	REF incluiu reduções na produtividade agrícola devido às mudanças climáticas.
Cenário Alternativo 1 (CC2)	Com base em CC (isto é, integrando reduções de rendimentos devido a mudanças climáticas), assumimos que o Brasil atinge desmatamento zero até 2030, mas não avança significativamente na restauração de pastagens degradadas (linha de base atual). Sob este cenário, a terra disponível para alimentos, pecuária e biocombustíveis é substancialmente reduzida tanto por causa das restrições de uso de novas terras como de mudanças climáticas. Além das hipóteses apresentadas no REF, no cenário CC1, assumimos: <ul style="list-style-type: none"> • 12 milhões de hectares de restauração de florestas para múltiplos propósitos (especialmente florestas comerciais) • Mandato de etanol fixo (54 bi litros de etanol, dos quais 2,5 são biocombustíveis de 2ª geração) • 68 TWh de bioeletricidade
Cenário Alternativo 2 (CC3)	No cenário CC3 temos a simulação dos compromissos brasileiros da NDC. Igual ao CC2, mas adicionalmente inclui: <ul style="list-style-type: none"> • Recuperação de 15 milhões de hectares de pastagens degradadas • 5 milhões de hectares de integração lavoura-pecuária-florestas (ILPF), que também reduzem as pressões sobre a terra.
Cenário Alternativo 3 (CC4)	No cenário CC4 incluímos além do cenário CC3 (NDC): <ul style="list-style-type: none"> • Metas mais ambiciosas sobre a eficiência dos transportes (redução da demanda global de combustíveis por etanol e biodiesel de cana-de-açúcar) • Biocombustíveis de 2ª geração, reduzindo ainda mais a pressão sobre a terra do que no cenário da NDC (CC3).

3. Resultados

3.1 Uso da terra com base na análise dos cenários de referência

Resumimos aqui os principais resultados dos cinco cenários utilizados para analisar os resultados da expansão dos biocombustíveis. Para o cenário **REF**, nossos resultados mostram que a área da cana-de-açúcar aumenta principalmente nos estados Centro-Oeste (Mato Grosso do Sul e Goiás), seguido pelo Sudeste (São Paulo e Minas Gerais), onde a cana é tradicionalmente cultivada;. Enquanto nossos resultados observam significativa expansão de grãos (soja) na região de MATOPIBA, grande parte da expansão ainda está no Centro-Oeste (Mato Grosso). Vemos uma redução da vegetação nativa na região do Cerrado de aproximadamente 4,1 MM ha (Centro-Oeste e MAPITOBA) causada pela expansão de grãos e pastagens.

Para o cenário **CC1** descobrimos que, apesar de reduções significativas em rendimentos agrícolas regionais, a mudança climática tem um impacto relativamente moderado na produção agrícola como um todo até 2030; exceto para o caso do etanol onde se espera que desempenhe um papel menor nos mercados de etanol não regulamentados. Isto é principalmente devido à demanda pouco elástica de produtos agrícolas que precisam aumentar suas áreas devido às perdas de mudanças climáticas, enquanto a demanda por etanol é bastante sensível a preço. Em termos de impactos na

mudança do uso da terra, os rendimentos agrícolas menores levam a uma redução adicional da vegetação nativa no Cerrado (principalmente na região Centro-Oeste), seguida pela Amazônia, além de limitar a expansão da cana-de-açúcar.

Sob o cenário **CC2** vemos uma expansão significativa do etanol e das florestas, o que resulta em redução significativa dos GEE setoriais, o que também – devido à redução das pastagens e da área de grãos – leva a pressões significativas sobre os preços, incluindo os preços dos alimentos, que aumentam cerca de 15% até 2030. A razão desses aumentos de preços reside na falta de incentivos para recuperação de pastagens degradadas com a simultânea redução das terras disponíveis para expansão das indústrias do agronegócio e dos biocombustíveis devido à limitação de desmatamento.

No caso que os NDCs brasileiros são totalmente implementados (**CC3**) com a estímulo à recuperação de 15 milhões de hectares de pastagens degradadas e 5 milhões de hectares de ILPF, nossas estimativas mostram que os níveis de preços caem significativamente em relação ao cenário CC2. Também vemos maiores reduções de emissões de GEE, uma vez que quantidades significativas de carbono são armazenadas em solos agrícolas. O impacto geral do uso da terra diminui significativamente em relação ao CC2 e aos cenários anteriores.

As pressões em relação ao fator terra diminuem ainda mais no cenário **CC4** devido a mudanças na mobilidade urbana e tecnologia de segunda geração para produção de etanol. Fica evidente a necessidade de que as avaliações setoriais de biocombustíveis ocorram dentro de um contexto mais amplo, incluindo políticas ambientais e sua aplicação e progresso tecnológico (eficiência de transporte, biocombustíveis de 2ª geração), além naturalmente das ‘politics’ de gestão do território descritas nos cenários anteriores. O CC4 é o cenário mais sustentável, onde as sinergias entre conservação e expansão agrícola sustentável podem ser realizadas em conjunto com a produção de biocombustíveis. Vale lembrar que a demanda por terra pelos biocombustíveis é menor do que no CC3 devido à maior aos biocombustíveis de segunda geração e maior do transporte público.

A produção de óleo de palma para biodiesel é um caso específico. Com base em análises anteriores, não esperamos qualquer impacto significativo da expansão do dendê sobre vegetação nativa a em 2030. Apesar da viabilidade econômica das plantações de dendezeiro (ENGLUND et al., 2015; YUI; YEH, 2013), o atual quadro institucional para o dendê ainda está pouco desenvolvido e, como tal, também é “imprevisível” para nossos esforços de modelagem. Merece atenção especial que os recentes planos do Congresso Nacional do Brasil para transformar as áreas de conservação em áreas menos protegidas no estado do Pará, de longe o estado produtor de óleo de palma mais importante do país, provavelmente aumentarão a viabilidade dessa matéria-prima, o que também pode aumentar os conflitos com povos indígenas, entre outros.

Além disso, as consequências socioeconômicas da expansão dos biocombustíveis nas comunidades tradicionais também são difíceis de estimar: atualmente, alguns pequenos agricultores conseguem se beneficiar da produção de biocombustíveis, mas de forma geral, não os mais pobres. As melhorias no bem-estar ofuscam possíveis impactos negativos sobre os serviços ecossistêmicos e a perda de estilos de vida tradicionais – o que também não está exclusivamente ligado à expansão dos biocombustíveis. Com base em uma revisão de mais de 60 trabalhos de pesquisa sobre este tema, encontramos que a base de evidência sobre os impactos socioeconômicos e ambientais ainda está relativamente baixa (OBERMAIER, *em desenvolvimento*).

3.2 Resultados da modelagem de requisitos de irrigação e fluxos de água em regiões com significativa expansão de biocombustíveis

Para entender os impactos relacionados à água relativos à expansão de biocombustíveis, calculamos a redução da pegada hídrica (WF) e a redução do escoamento da água para a agricultura da cana-de-açúcar – a principal cultura de biocombustíveis do Brasil – em condições de agricultura de sequeiro e o requisito de irrigação sob irrigação total. O WF geralmente inclui o WF azul (recursos de superfície e águas subterrâneas alocados pelo homem), WF verde (umidade do solo proveniente de chuvas que é consumida através da evapotranspiração de culturas, ET) e WF cinzento (volume de água doce necessário para assimilar cargas de poluentes associadas). Neste estudo, não avaliamos a WF cinza. As WFs verdes e azuis foram estimadas para a fase agrícola da cana vegetal e para a 4ª soqueira.

As reduções nos rendimentos agrícolas sob condições de sequeiro são superiores a 50% em mais de 60% das áreas totais adequadas para a cana-de-açúcar, indicando que a irrigação seria importante para aumentar a produtividade. O centro-sul do Brasil, que produz a maior parte da cana-de-açúcar, tem requisitos de irrigação líquida variando de 200 a 700 mm/ciclo. Os maiores requisitos de irrigação foram observados no NE brasileiro, atingindo uma irrigação líquida superior a 800 mm/ciclo. A grande fração do WF verde (> 70%) no centro-sul do Brasil, que cobre 72% do total das áreas adequadas para a cana-de-açúcar, confirma a importância das chuvas para a produção da cana-de-açúcar. No NE, a fração WF verde diminui e a redução do rendimento agrícola relacionado ao estresse hídrico aumenta, indicando a importância da irrigação no cultivo de cana na região. Considerando informações gerais sobre a quantidade e a qualidade da água, não parece haver pressão significativa sobre os recursos hídricos próximos das áreas potenciais da cana-de-açúcar no centro do Brasil, o que pode favorecer sua expansão. Contudo, estudos em locais específicos são importantes para uma análise mais detalhada da sustentabilidade das produções de cana-de-açúcar em um nível local.

Dois estudos de caso foram desenvolvidos para medir impactos ao nível de bacias hidrográficas. No caso da bacia hidrográfica de Ivinhema (Mato Grosso do Sul), o objetivo era explorar a expansão das matérias-primas de biocombustíveis e culturas em uma região que já sofreu uma expansão significativa da cana-de-açúcar para investigar o potencial de agricultura de sequeiro e de irrigação para as culturas. Usando o WEAP, descobrimos que somente a irrigação dedicada para a cana-de-açúcar (excluindo soja ou milho) pode levar a reduções substanciais (60-100%) na vazão, especialmente durante a estação seca, enquanto os aumentos estimados de produtividade agrícola permanecem limitados (7-14%). Isso, por sua vez, pode afetar outros usos (por exemplo, demanda para consumo humano), de modo que o ganho no rendimento agrícola da cana-de-açúcar devido à irrigação provavelmente não justifica a redução na vazão, particularmente durante a estação seca.

Para a bacia hidrográfica do Corrente (Bahia), estimamos uma redução do rendimento agrícola em condições de sequeiro e a necessidade de irrigação líquida para cada matéria-prima de biocombustíveis na região da bacia, uma das principais regiões afetadas pela seca. Aqui, a análise revela que o uso da irrigação aumenta consideravelmente o potencial de expansão da área terrestre para a produção de biocombustíveis, intensificando a produção de biocombustíveis (soja, cana-de-açúcar) nas áreas irrigadas, enquanto potencialmente reduzindo a pressão agrícola em outras terras, como o bioma do Cerrado, que recebe proteção limitada sob a legislação atual. Ao mesmo tempo, descobrimos que as áreas adequadas para a cana-de-açúcar mostram uma perda de produtividade

(YR) ao longo do tempo, o que se reflete em um estresse hídrico crescente (pegada hídrica azul) nos últimos 30 anos, um problema que pode ser exacerbado pelas mudanças climáticas.

3.3 Resultados da avaliação macroeconômica

Em todos os cenários, encontramos um impacto reduzido nos indicadores macroeconômicos, mesmo quando há uma alta pressão sobre o uso da terra (CC2). Isso implica que nem a mudança climática, nem a implementação de medidas sustentáveis para gestão do uso da terra como previsto pelos NDCs do Brasil (CC3, CC4) causariam impactos negativos significativos sobre o PIB. Os rendimentos das diferentes classes de renda brasileira não variam muito entre os diferentes cenários, com as variações seguindo movimentos similares para todas as classes de renda.

Descobrimos também que as classes de renda mais pobres (o que inclui os classes D e E) já consomem alimentos em níveis muito baixos – perto do nível de subsistência – e, portanto, não podem reduzir seu consumo ainda mais quando o preço da comida sobe no cenário CC2; no entanto, como o gasto total com alimentos aumenta, eles têm que reduzir o consumo de serviços e outros bens, indicando uma perda no bem-estar em um cenário onde a NDC não está implementada de forma completa, que é o caso do CC2. Não é possível atribuir esta perda de bem-estar à expansão dos biocombustíveis, uma vez que as crescentes pressões sobre a disponibilidade de terra são em grande parte devido ao déficit na recuperação de pastos degradados.

Descobrimos que cenários mais sustentáveis (CC3 e CC4) – com ganhos maiores no transporte público e na eficiência de veículos leves e pesados – também contribuem para reduzir as pressões sobre a terra, aliviando dessa forma também a perda no bem-estar das famílias mais pobres. Ao mesmo tempo em que o PIB não seria afetado significativamente, as emissões de GEE no transporte diminuiriam de forma importante, mostrando que os caminhos para uma economia de baixo carbono são possíveis e viáveis.

4. Discussão

O objetivo principal da pesquisa do projeto CLIMA foi entender onde a futura expansão dos biocombustíveis provavelmente ocorrerá devido às forças do mercado e ao impacto das mudanças climáticas, e quais os impactos associados a essa expansão, na segurança alimentar, nos recursos hídricos e na economia. Descobrimos que as reivindicações já concorrentes sobre a terra para alimentação, biocombustíveis e conservação são intensificadas pela falta de implementação de políticas atuais no Brasil, como é o caso das metas para recuperação de terras degradadas, conforme estipulados pelo Plano de Agricultura de Baixo Carbono. Sob um cenário de produção crescente de alimentos (gado bovino, alimentos), de biocombustíveis e redução do desmatamento, mas sem uma recuperação de terras degradadas (CC2), conforme previsto nos NDCs do Brasil, nossos resultados mostram que os preços dos alimentos podem aumentar fortemente até 2030, com famílias mais pobres tendo que reduzir seus gastos em outros bens/serviços (energia, outros), a fim de garantir sua segurança alimentar. As reivindicações concorrentes para a água (irrigação de culturas de biocombustíveis versus irrigação da produção de alimentos) serão uma preocupação fundamental nas regiões mais secas do Brasil (como a região semiárida do NE), onde as perdas de produtividade ocorreram nos últimos 30 anos, aumentando o estresse hídrico (pegada hídrica azul) mesmo para culturas de biocombustíveis adaptadas às condições das terras secas, como é o caso da cana-de-

açúcar. Embora as necessidades de irrigação provavelmente aumentem até 2030, a irrigação também pode desempenhar um papel potencial na redução potencial da pressão agrícola em terra, como o bioma do Cerrado, que tem proteção limitada de acordo com as leis atuais.

Nossa análise dos *trade-offs* e sinergias – como no caso do cenário CC4, onde os programas de eficiência e de conservação reduzem significativamente as pressões sobre a terra, ao mesmo tempo dando espaço para a expansão dos biocombustíveis – mostra que a sustentabilidade dos biocombustíveis só pode ser entendida dentro de um contexto setorial e político maior e de forma integrada, particularmente no que se refere à gestão do uso da terra e aos esforços de conservação. As discussões sobre a sustentabilidade dos biocombustíveis devem, portanto, levar em consideração fatores contextuais e não se concentrar em avaliações setoriais limitadas. Neste contexto, é importante lembrar que as NDCs brasileiras dependem fortemente de escolhas sobre o uso da terra, incluindo biocombustíveis e o desenvolvimento agropecuário. Nossa pesquisa torna visíveis os impactos dessa interconectividade para o tempo de implementação das NDCs (2030) e mostra como um desenvolvimento mais sustentável – a exemplo do cenário CC4 – podem dar suporte às transições para uma economia de baixo carbono.

Para futuras pesquisas recomendamos avaliar cenários de prazo maior (2050) para entender os impactos de mudanças mais complexas, sejam elas tecnológicas, hídricas, climáticas, socioeconômicas ou de uso da terra. Investindo na gestão do conhecimento isso também poderia mobilizar discussões sobre compromissos de mitigação e adaptação pós-NDC. Refinar a estrutura de modelagem apresentada aqui para outros setores da economia brasileira, ou até modelos regionais, poderiam dar novos resultados e contribuir para o debate.

5. Agradecimentos

O CLIMA é apoiado pela Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety da Alemanha (BMUB) via a International Climate Initiative (IKI). Martin Obermaier é bolsista da FAPERJ/CAPES e William Wills da CAPES. Todos os erros são da responsabilidade dos autores.

Referências bibliográficas

BOKEN, V.K., CRACKNELL, A.P., HEATHCOTE, R.L. Monitoring and Predicting Agricultural Drought: A Global Study, Sponsored by the World Meteorological Organization. Oxford University Press: Oxford, New York, 2005.

BRASIL. Intended Nationally Determined Contribution towards achieving the Objective of the United Nations Framework Convention on Climate Change. Brasília, D.F.: República Federativa do Brasil, 2015.

DASGUPTA, P. et al. Rural areas. In: FIELD, C. B. et al. (Eds.). . Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2014. p. 613–657.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. Yield response to water. Rome: FAO, 1979. 306p. (Irrigation and Drainage Paper, 33).

ENGLUND, O. et al. Oil palm for biodiesel in Brazil—risks and opportunities. *Environmental Research Letters*, v. 10, n. 4, p. 044002, 2015.

HOURCADE, J.-C. et al. IMACLIM-R: A modeling framework for sustainable development issues. Working Paper. Paris: CIRED, 2006.

IPCC. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2014.

LAPOLA, D. M. et al. Indirect land-use changes can overcome carbon savings from biofuels in Brazil. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 107, p. 3388–3393, 2010.

MAGRIN, G. O. et al. Central and South America. In: BARROS, V. R. et al. (Eds.). . Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2014. p. 1499–1566.

OBERMAIER, M. Social and environmental consequences of biofuels production on traditional communities: the case of Brazil. (*Em desenvolvimento*.)

OLSSON, L. et al. Livelihoods and poverty. In: FIELD, C. B. et al. (Eds.). Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2014. p. XXX-YYY.

PAUSTIAN, K.; RAVINDRANATH, N.H.; AMSTEL, A.R. VAN. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IPCC: Geneva, 2006.

WILLS, W. Modelagem dos Efeitos de Longo Prazo de Políticas de Mitigação de Emissão de Gases de Efeito Estufa na Economia do Brasil. Tese de Doutorado no Programa de Planejamento Energético. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2013.

XAVIER, A.C.; KING, C.W.; SCANLON, B.R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013), *International Journal of Climatology*, 2016, 36 (6), 2644–2659.

YUI, S.; YEH, S. Land use change emissions from oil palm expansion in Pará, Brazil depend on proper policy enforcement on deforested lands. *Environmental Research Letters*, v. 8, n. 4, p. 044031, 1 dez. 2013.