

IMPACTOS DA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS SOBRE OS RECURSOS
HÍDRICOS: ESTUDO DE CASO DA PRODUÇÃO DE ETANOL DE CANA-DE-
AÇÚCAR NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARANAÍBA

Natália Pezzi Fachinelli

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Planejamento Energético.

Orientador: Amaro Olímpio Pereira Júnior

Rio de Janeiro
Dezembro de 2013

IMPACTOS DA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS SOBRE OS RECURSOS
HÍDRICOS: ESTUDO DE CASO DA PRODUÇÃO DE ETANOL DE CANA-DE-
AÇÚCAR NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARANAÍBA

Natália Pezzi Fachinelli

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA
(COPPE) UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM PLANEJAMENTO ENERGÉTICO.

Examinada por:

Prof. Amaro Olímpio Pereira Júnior, D.Sc.

Prof. Emílio Lèbre La Rovere, D.Sc.

Dr. Christiano Pires de Campos, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
DEZEMBRO DE 2013

Fachinelli, Natália Pezzi

Impactos da Produção de Biocombustíveis Sobre Os Recursos Hídricos: Estudo de Caso da Produção de Etanol de Cana-de-Açúcar na Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba / Natália Pezzi Fachinelli. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2013.

XIV, 87 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Amaro Olímpio Pereira Júnior

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Planejamento Energético, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 67-73.

1. Etanol de cana-de-açúcar. 2. Recursos hídricos. 3. Pegada hídrica. 4. Sustentabilidade. 5. Irrigação I. Pereira, Amaro Olímpio. II Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Planejamento Energético. III. Título.

À minha família.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais pela educação, incentivo e apoio.

Às minhas irmãs, Gabi, Bruna e Taís, por tudo.

Ao meu querido professor e orientador Amaro pela paciência, conselhos e oportunidades de aprendizado.

Aos membros da banca por aceitarem integrá-la.

Aos professores, funcionários e amigos do PPE.

Ao CNPq e à UFRJ/COPPE pelos auxílios concedidos.

À Agência Internacional de Energia Atômica pela contribuição com ferramentas metodológicas e parte do auxílio financeiro para realização deste trabalho.

E em especial ao Max pelo apoio, carinho e presença constante em todos os momentos.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

IMPACTOS DA PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS SOBRE OS RECURSOS HÍDRICOS: ESTUDO DE CASO DA PRODUÇÃO DE ETANOL DE CANA-DE-AÇÚCAR NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARANAÍBA

Natália Pezzi Fachinelli

Dezembro/2013

Orientador: Amaro Olímpio Pereira Júnior

Programa: Planejamento Energético

A expansão esperada de bioenergia no mundo vem ao encontro do desenvolvimento sustentável. No entanto, a produção de biocombustíveis é uma preocupação crescente na sociedade moderna, em parte devido à produção da biomassa energética e suas relações com a escassez de recursos hídricos.

No caso do Brasil, a expansão de áreas de cultivo de cana-de-açúcar destinadas ao processamento de etanol pode representar diferentes impactos sobre os recursos hídricos, dependendo da região hidrográfica de cultivo.

Neste trabalho foi calculada a pegada hídrica (PH) da produção de cana-de-açúcar na bacia hidrográfica do rio Paranaíba, resultando no valor de 251m³ de água por tonelada de cana-de-açúcar produzida (169m³/t da PH verde, 75m³/t da PH azul e 7m³/t da PH cinza), superior à PH da produção de cana-de-açúcar no estado de São Paulo, de 200m³/t (153m³/t da PH verde, 47m³/t da PH azul e 7m³/t da PH cinza). Ainda, foram verificadas situações de comprometimento hídrico devidas à irrigação da cultura de cana-de-açúcar na bacia do Paranaíba.

Os resultados deste estudo contribuem e apontam para a necessidade de uma avaliação regionalizada da produção de culturas energéticas destinadas ao processamento de biocombustíveis considerando a disponibilidade hídrica e os usos múltiplos das bacias. Essa análise contribuirá para adoção de medidas e ações visando à produção sustentável do etanol de cana-de-açúcar brasileiro ao longo de sua cadeia produtiva.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

IMPACTS OF BIOFUELS PRODUCTION ON WATER RESOURCES: CASE
STUDY OF ETHANOL PRODUCTION BY SUGARCANE IN THE PARANAÍBA
HYDROGRAPHIC BASIN

Natália Pezzi Fachinelli

December/2013

Advisor: Amaro Olímpio Pereira Júnior

Department: Energy Planning

The expected expansion of bioenergy in the world comes within the perspectives of sustainable development. However, biofuel production is a growing concern in modern society, in part due to the production of biomass and its strong relationships with the scarcity of water resources.

In the case of Brazil, the expansion of cultivated areas of sugarcane for ethanol processing may represent different impacts on water resources, depending on the region of cultivation.

In this work, it was calculated the water footprint (WF) of sugarcane production in Paranaíba basin, resulting in a value of 251m³ of water per ton of sugarcane produced (169m³/t of green WF, 75m³/t of blue WF and 7m³/t of gray WF), higher than WF of sugarcane production in São Paulo, which is 200m³/t (153m³/t of green WF, 47m³/t of blue WF and 7m³/t of gray WF). Still, it was observed situations of pressure in water resources due sugarcane irrigation in Paranaíba basin.

The results of this study contribute and highlight the need for a regionalized assessment of energy crops production to biofuel processing considering water availability and multiple uses of water in different basins. This analysis will contribute to the adoption of measures and actions aiming at sustainable production of Brazilian ethanol throughout its supply chain.

Sumário

Capítulo 1: Introdução.....	1
Capítulo 2: Etanol de Cana-de-Açúcar Brasileiro: Histórico e Perspectivas	6
2.1 Histórico	6
2.2 Perspectivas de demanda e oferta nacional e internacional de etanol de cana-de-açúcar...	11
2.3 Perspectivas de expansão de áreas para a cultura de cana de açúcar no Brasil	16
Capítulo 3: Biocombustíveis e Desenvolvimento Sustentável: o Uso da Água para Produção de Etanol de Cana-de-açúcar no Brasil	22
3.1 Biocombustíveis líquidos e desenvolvimento sustentável.....	22
3.2 Considerações sobre o uso da água e a sustentabilidade da produção de etanol combustível	26
Capítulo 4: Estudo de Caso: Produção de Etanol de Cana-de-açúcar e Impactos sobre os Recursos Hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba.....	35
4.1 Caracterização da Área de Estudo	35
4.2 Metodologia utilizada para a avaliação de impactos sobre os recursos hídricos pela produção de cana-de-açúcar destinada ao processamento de etanol na bacia do rio Paranaíba	43
4.2.1 Contabilização da pegada hídrica do crescimento de culturas na bacia do Rio Paranaíba	46
4.2.2 Avaliação da sustentabilidade da pegada hídrica da produção de cana-de-açúcar destinada ao processamento de etanol na bacia do rio Paranaíba	50
4.2.3 Avaliação dos impactos da produção de cana-de-açúcar sobre os recursos hídricos da bacia do rio Paranaíba em cenários de expansão de demanda de etanol	51
4.2.4. Análise de sensibilidade da necessidade hídrica da cultura de cana-de-açúcar na bacia do rio Paranaíba considerando diferentes cenários de mudanças climáticas para o período de 2010-2040.....	52
4.3 Resultados e discussão do estudo de caso	55
4.3.1 Contabilização da pegada hídrica do crescimento de culturas na Bacia do Rio Paranaíba	55
4.3.2 Avaliação da sustentabilidade da pegada hídrica da produção de cana-de-açúcar destinada ao processamento de etanol na bacia do rio Paranaíba	60

4.3.3 Avaliação dos impactos da produção de cana-de-açúcar sobre os recursos hídricos da bacia do rio Paranaíba em cenários de expansão de demanda de etanol	64
4.3.4 Análise de sensibilidade da necessidade hídrica da cultura de cana-de-açúcar na bacia do rio Paranaíba considerando diferentes cenários de mudanças climáticas para o período de 2010-2040.....	69
Capítulo 5: Resultados e Discussão	71
Capítulo 6: Conclusão	75
6.1 Principais conclusões e limitações.....	75
6.2 Sugestão para trabalhos futuros.....	79
Referências Bibliográficas	83

Índice de Figuras

Figura 1: Produção de etanol combustível pelos maiores países produtores entre 2000-2010. Fonte: EIA, s/d.....	7
Figura 2: Produção de autoveículos no Brasil por combustível - 1970/2011. Fonte: ANFAVEA, 2013.	9
Figura 3: Evolução da produção de cana-de-açúcar, etanol e açúcar no Brasil. Fonte: UNICA, s/d.....	10
Figura 4: Consumo de biocombustíveis (etanol e biodiesel) no mundo e de etanol pelos principais países consumidores (2000 a 2010). Fonte dados: EIA, s/d.	12
Figura 5: Exportações brasileiras de etanol por continente nos anos de 2005-2012. Fonte dados: UNICA, s/d.	13
Figura 6: Produção de cana-de-açúcar por região do Brasil entre os anos 1980-2011. Fonte: ÚNICA, s/d.....	17
Figura 7: Distribuição espacial das usinas em operação, em implantação e em fase de projeto no Brasil e infraestrutura de escoamento de etanol. Fonte: MME/EPE, 2012...	18
Figura 8: Alterações no uso do solo no Brasil e regiões Sudeste e Centro-Oeste entre 1995-2006. Fonte: IBGE, s/d.....	20
Figura 9: Esquema dos usos da água no ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar. Adaptado de FINGERMAN et al., 2010.	29
Figura 10: Comparativo de áreas cultivadas com cana-de-açúcar, com destaque para a bacia do rio Paranaíba, nos anos de 2006 e 2011. Fonte: CANASAT, s/d.	34
Figura 11: Figura: Região Hidrográfica do Paraná (foto menor) e Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba. Fonte: ANA, 2013.....	36
Figura 12: Divisão das (a) Unidades de Planejamento Hídrico (20 unidades) e das (b) Unidades de Gestão Hídrica (10 unidades) da bacia do rio Paranaíba. Fonte: ANA, 2013.	38
Figura 13: Uso e ocupação do solo (a) relativizado por setor e (b) plotado no mapa para a Bacia do rio Paranaíba. Fonte: ANA, 2013.	39
Figura 14: Demandas de retirada e consumo por UGH. Fonte: ANA, 2013.....	41
Figura 15: Área plantada (ha) das principais culturas agrícolas em GO e MG e taxas decenais de crescimento da área plantada de soja e cana-de-açúcar. Fonte: IBGE, s/d.	42
Figura 16: Esquema da metodologia utilizada.	48
Figura 17: Projeções de anomalias de chuva para DJF, MAM, JJA e SON com referência ao período base 1961-1990 para a América do Sul, nos cenários A2 e B2 pelo modelo HadCM3. O <i>time-slice</i> é centrado em 2020. Fonte: MARENGO, 2007.....	53

Figura 18: Projeções de anomalias de temperatura para DJF, MAM, JJA e SON em relação ao período base 1961-1990 para a América do Sul, nos cenários A2 e B2 pelo modelo HadCM3. O *time-slice* é centrado em 2020. Fonte: MARENGO, 2007..... 54

Figura 19: Pegada hídrica (verde, azul e cinza) da produção de cana-de-açúcar (m^3/t) na bacia do Paranaíba e São Paulo e da produção de etanol de cana-de-açúcar (m^3/GJ). Pegada hídrica (verde e azul) da produção de culturas agrícolas na bacia do Paranaíba. 57

Figura 20: Demanda hídrica (componentes verde e azul) por hectare (m^3/ha) de culturas cultivadas na bacia do rio Paranaíba..... 59

Índice de Tabelas

Tabela 1: Quadro comparativo das projeções de demandas internas e externas de etanol para os anos de 2020/2022.	15
Tabela 2: Uso do solo no Brasil	23
Tabela 3: Seleção de alguns princípios e critérios de sustentabilidade relacionados ao tema água de acordo com a iniciativa considerada.....	27
Tabela 4: Área de cana-de-açúcar (ha) com uso de irrigação e método utilizado no Brasil e grandes regiões no ano de 2006.	32
Tabela 5: Área e número de municípios por Unidade da Federação (UF) pertencentes à bacia do rio Paranaíba.....	36
Tabela 6: Demandas hídricas por usuário na bacia do rio Paranaíba (ano base 2010)...	40
Tabela 7: Dados e variáveis considerados para o cálculo da pegada hídrica do crescimento de culturas na Bacia do Rio Paranaíba.	47
Tabela 8: Cenários de expansão da área plantada de cana-de-açúcar em 2022.	52
Tabela 9: Pegada hídrica para diferentes coberturas do solo na bacia do rio Paranaíba.	58
Tabela 10: Demandas de retirada, disponibilidades hídricas e balanços hídricos (ano base 2010).....	61
Tabela 11: Demandas de consumo, disponibilidades hídricas e balanços hídricos (ano base 2010).....	62
Tabela 12: Demandas de retirada, disponibilidades hídricas e balanços hídricos.....	66
Tabela 13: Demandas de consumo, disponibilidades hídricas e balanços hídricos.....	67
Tabela 14: Dados de evapotranspiração ajustada e pegada hídrica da cana-de-açúcar irrigada destinada ao processamento de etanol na bacia do rio Paranaíba em diferentes cenários.....	69

Lista de Siglas

ANA: Agência Nacional de Águas

ANP: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

AR4: *Fourth Assessment Report*

Cenário A2: Cenário de alta emissão de gases de efeito estufa, ou “pessimista”

Cenário B2: Cenário de baixa emissão de gases de efeito estufa, ou “otimista”.

CIMA: Conselho Interministerial do Açúcar e do Alcool

CMMAD: Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento

CONAB: Companhia Nacional de Abastecimento

CTC: Centro de Tecnologia Canavieira

DH: Demanda Hídrica

DJF: Dezembro-janeiro-fevereiro

EIA: *U.S Energy Information Administration*

EPA: *Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos*

EPE: Empresa de Pesquisa Energética

ETa: Evapotranspiração ajustada da cultura

ETc: Evapotranspiração da cultura

ETo: Evapotranspiração de referência

FIESP: Federação das Indústrias do Estado de São Paulo

GBEP: *Global Bioenergy Partnership*

GEEs: Gases de Efeito Estufa

GRI: *Global Reporting Initiative*

HadCM3: *Hadley Centre Coupled Model, version 3*

IAA: Instituto do Açúcar e do Alcool

IAEA: *International Atomic Energy Agency*

ICONE: Instituto de Estudos do Comércio e Negociações Internacionais

IEA: *International Energy Agency*

IPCC: *Intergovernmental Panel on Climate Change*

JJA: Junho-julho-agosto

Kc: Coeficiente de cultura

Ks: Coeficiente de estresse hídrico

MAM: Março-abril-maio

MAPA: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

MEA: *Millennium Ecosystem Assessment*

N: Nitrogênio

NECAT: Nexus-Água-Clima-Uso da Terra

ONU: Organização das Nações Unidas

PH: Pegada Hídrica

PRH: Plano de Recursos Hídricos

RED: *Renewable Energy Directive*

RSF: *Renewable Fuel Standard*

SON: setembro-outubro-novembro

TAR: Third Assessment Report

UGH: Unidades de Gestão Hídrica

UNICA: União da Indústria de Cana-de-Açúcar

UPH: Unidades de Planejamento Hídrico

USDA: *United States Department of Agriculture*

WEAP: *Water Evaluation and Planning*

Capítulo 1: Introdução

Na busca pelo desenvolvimento sustentável a utilização de energias renováveis tornou-se uma grande prioridade no mundo e os biocombustíveis líquidos, como o etanol de cana-de-açúcar, assumem importância cada vez maior na política energética de países que visam a redução da dependência de combustíveis fósseis.

Este tipo de energia renovável surgiu como uma alternativa às fontes fósseis, bem como para a redução da dependência energética, para mitigação dos efeitos das mudanças climáticas e para desenvolvimento rural (FRAITURE *et. al.* 2008; GOLDEMBERG, 2008; SIMS, 2003). Aproveitando-se de suas condições climáticas, disponibilidade de terras e da experiência acumulada ao longo do tempo como pioneiro no ressurgimento de sistemas de energia a partir de biomassa, o governo brasileiro vem investindo em programas para produção de biocombustíveis.

No entanto, preocupações quanto aos impactos econômicos, sociais e ambientais da produção de biocombustíveis resultam em questionamentos sobre a sustentabilidade da produção desse tipo de energia (SMEETS; AL., 2008). Dentre estas preocupações estão as relações da produção dos biocombustíveis com a perda da biodiversidade, com escassez de recursos hídricos, com a insegurança alimentar e, ao contrário de estudos anteriores, com aumentos nas emissões de GEEs devidos ao desmatamento indireto e adubação nitrogenada (FARGIONE; ET.AL, 2008; FRAITURE, 2008; GIBBS *et al.*, 2008; LAPOLA *et al.*, 2010).

Considerando a manutenção do Brasil como líder no mercado internacional de etanol, devido a taxas de exportação crescentes e ao aumento do uso doméstico do etanol brasileiro (MME/EPE, 2012; USDA, 2013), a demanda por uma maior produção de cana-de-açúcar a curto e médio prazo exigirá a expansão das áreas de cultivo. Estados da região norte, como Tocantins, e incluindo Maranhão e Piauí apresentaram considerável crescimento da área plantada com cana na última década, cerca de 200% entre 2000-2011. A região Centro-Oeste do Brasil vem se destacando pelo rápido crescimento da área plantada com cana, um aumento de cerca de 280% entre os anos 2002 e 2011.

A incorporação de novas áreas para a produção de culturas energéticas demandará água para o crescimento de biomassa resultando em pressões sob os recursos hídricos,

caso essa expansão ocorra em áreas com déficit hídrico. Segundo a *International Energy Agency* (IEA, 2012) os biocombustíveis serão os grandes responsáveis pelo aumento relativo do consumo de água para a produção de energia em 2035, o que exercerá grande importância como critério de viabilidade de projetos energéticos sustentáveis.

Diante do sucesso do programa de etanol no Brasil, das projeções de expansão da cultura de cana-de-açúcar e aumento no consumo e exportações de etanol, são necessários o desenvolvimento e aplicação de mecanismos que garantam a sustentabilidade deste combustível. Diversos esforços transnacionais de governança são direcionados para um modelo regulatório híbrido que combina elementos do poder público e privado na adoção de instrumentos e medidas que resultem em práticas sustentáveis para produção de biocombustíveis (LIN, 2011). Apesar da maioria destes instrumentos e medidas cobrir um grande número de critérios de sustentabilidade, aspectos baseados no ciclo de vida da produção dos biocombustíveis que integrem os diversos fatores ambientais raramente são abordados pelas metodologias de avaliação de impactos.

De forma complementar, critérios relacionados ao uso da água e pressões sobre recursos hídricos, sobretudo na fase agrícola da produção de etanol, são incipientes (CGEE, 2009).

Importante destacar que uma questão chave para o planejamento e gestão sustentável da produção de biocombustíveis é que o elemento água não está dissociado dos elementos terra e clima. Segundo a *International Atomic Energy Agency* (IAEA)¹ entre os principais desafios da sociedade para a próxima década está a integração de questões relacionadas ao aquecimento global, uso do solo e segurança alimentar, oferta de energia a preços módicos e segurança e acesso a água potável.

Assim, uma análise que integre estas variáveis é a mais indicada para se obter uma visão holística de um sistema de produção sustentável de biocombustíveis. De acordo com BAZILIAN et al., 2011 a não integração de temas como energia, uso do solo, água e alimentos em áreas de produção de bioenergia resulta em políticas e regulamentos que, muitas vezes, inadvertidamente criam sinais sub-ótimos para a segurança nacional, para economia e meio ambiente.

Apesar das lavouras de cana-de-açúcar serem intensivas em água, não prevalece a prática da irrigação no Brasil devido estas ocuparem áreas com pluviosidade adequada.

¹ A IAEA, uma das financiadoras deste estudo, sugeriu o uso da abordagem integradora Nexus-Água-Clima-Uso da Terra (NECAT) para verificar a sustentabilidade do programa brasileiro de biocombustíveis. Esse trabalho faz parte desta abordagem integradora fornecendo parte das informações relacionadas ao tema água.

Entretanto, a crescente demanda pela incorporação de novas áreas de cultivo de cana tem levado à exploração de regiões com condições hidrológicas menos favoráveis, como o caso da região Centro-Oeste do Brasil.

Informações sobre áreas de expansão da cultura de cana-de-açúcar e projeções de demandas de água para o crescimento da biomassa nestas áreas são de grande contribuição para a avaliação de impactos dos programas de biocombustíveis sobre os recursos hídricos, sobretudo frente à importância da agroindústria canavieira para o desenvolvimento econômico, social e ambiental sustentável do país.

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo principal identificar impactos sobre os recursos hídricos devidos a expansão da cultura de cana-de-açúcar destinada ao processamento de etanol em bacias hidrográficas onde a prática de irrigação se faz necessária em períodos de déficit hídrico, como o caso da bacia hidrográfica do rio Paranaíba localizada na região Centro-Oeste do Brasil. Tais informações irão contribuir para a avaliação de critérios de sustentabilidade ambiental relacionados ao uso da água na produção de biocombustíveis, na avaliação regionalizada da pressão da produção de etanol de cana-de-açúcar sobre os recursos hídricos de determinada bacia hidrográfica e na proposição de medidas para redução de impactos sobre os recursos hídricos.

Os objetivos específicos do trabalho são:

- i) Calcular a pegada hídrica da fase agrícola da produção de etanol de cana-de-açúcar na bacia hidrográfica do rio Paranaíba, considerando as pegadas verde, azul e cinza.
- ii) Calcular as pegadas hídricas de culturas agrícolas que vêm sendo substituídas pela cultura de cana-de-açúcar destinada ao processamento de etanol na bacia do rio Paranaíba.
- iii) Avaliar como a produção de cana-de-açúcar impacta o balanço hídrico da bacia hidrográfica do rio Paranaíba e de suas principais unidades de gestão hídrica produtoras de cana-de-açúcar por meio de indicadores de comprometimento hídrico.
- iv) Avaliar os impactos da produção de cana-de-açúcar sobre os recursos hídricos da bacia do rio Paranaíba em cenários de expansão de demanda de etanol.
- v) Realizar análise de sensibilidade da necessidade hídrica da cultura de cana-de-açúcar na bacia do rio Paranaíba considerando diferentes cenários de mudanças climáticas.

Para entender melhor as relações entre a produção de cana-de-açúcar na bacia do rio Paranaíba e a pressão sobre os recursos hídricos foi utilizada a avaliação da pegada de hídrica como indicador da apropriação de água verde (água via precipitação), água azul (água via irrigação) e cinza (água necessária para assimilação de efluentes) durante a fase de produção de biomassa. Para calcular a demanda hídrica da produção de cana-de-açúcar na bacia do rio Paranaíba foram analisados modelos baseados no balanço hídrico: WEAP (do inglês "Water Evaluation and Planning" system) desenvolvido pelo *Stockholm Environment Institute's U.S. Center* e CROPWAT 8.0 desenvolvido pela Divisão de Terras e Desenvolvimento das Águas da FAO (FAO, 2003). Para este estudo foi selecionado o modelo CROPWAT 8.0 uma vez que este atende os objetivos deste trabalho sem a necessidade, neste momento, de uma análise mais detalhada e com exigência de maiores informações sobre a gestão dos usos da bacia, ou seja, com informações desagregadas por sub-bacias de pontos de captação de água, demanda por usuário e prioridades de alocação.

O trabalho está estruturando da seguinte forma:

O Capítulo 1 consiste desta introdução.

O Capítulo 2 apresenta um breve histórico do Programa Nacional do Alcool (Proálcool), as perspectivas de demanda e oferta nacional e internacional de etanol de cana-de-açúcar e as perspectivas de expansão de áreas para a cultura de cana de açúcar no Brasil.

Já o Capítulo 3 apresenta os biocombustíveis líquidos no contexto do desenvolvimento sustentável e as preocupações que vêm sendo levantadas em discussões ao redor no mundo relacionadas à produção e uso da bioenergia com a perda de biodiversidade, pressão sobre culturas alimentares e com a escassez de recursos hídricos. Também neste capítulo são apresentadas considerações sobre o uso da água e a sustentabilidade da produção de etanol combustível.

No Capítulo 4 é apresentado o estudo de caso da produção de etanol de cana-de-açúcar e os impactos sobre os recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Paranaíba. Neste capítulo são apresentados os cálculos da pegada hídrica - indicador selecionado para mensurar e avaliar a pressão da produção de cana-de-açúcar sobre os recursos hídricos de forma temporal e geograficamente explícita na bacia do rio Paranaíba.

O Capítulo 5 apresenta os Resultados e Discussão do trabalho e interseções da metodologia utilizada no estudo de caso com o planejamento energético.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as considerações finais, ou seja, as principais conclusões do trabalho, limitações e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2: Etanol de Cana-de-Açúcar Brasileiro: Histórico e Perspectivas

2.1 Histórico

O desenvolvimento de combustíveis líquidos à base de biomassa, visando à diminuição da dependência energética nos períodos de instabilidade da oferta de petróleo, é hoje um importante feito tecnológico da humanidade na área de energias renováveis.

O Programa Brasileiro de Biocombustíveis é mundialmente reconhecido como o mais bem sucedido e duradouro esforço de redução do consumo de combustíveis fósseis. Isso foi conseguido em mais de 30 anos a partir da criação do Programa Nacional do Álcool (Proálcool) em meados da década de 1970, o qual tinha como principal finalidade a redução da dependência da importação de petróleo.

Hoje, além de uma estratégia voltada à segurança energética nacional, os biocombustíveis líquidos representam uma estratégia supragovernamental em relação às preocupações ambientais dos países, tais como aquecimento global e a busca por alternativas de redução da dependência aos combustíveis fósseis. A produção de etanol combustível na última década (2000-2010) aponta para esta vertente mundial, com o Brasil como o maior produtor até meados de 2006 e atualmente o segundo colocado no ranking dos maiores produtores (EIA, s/d) (Figura 1).

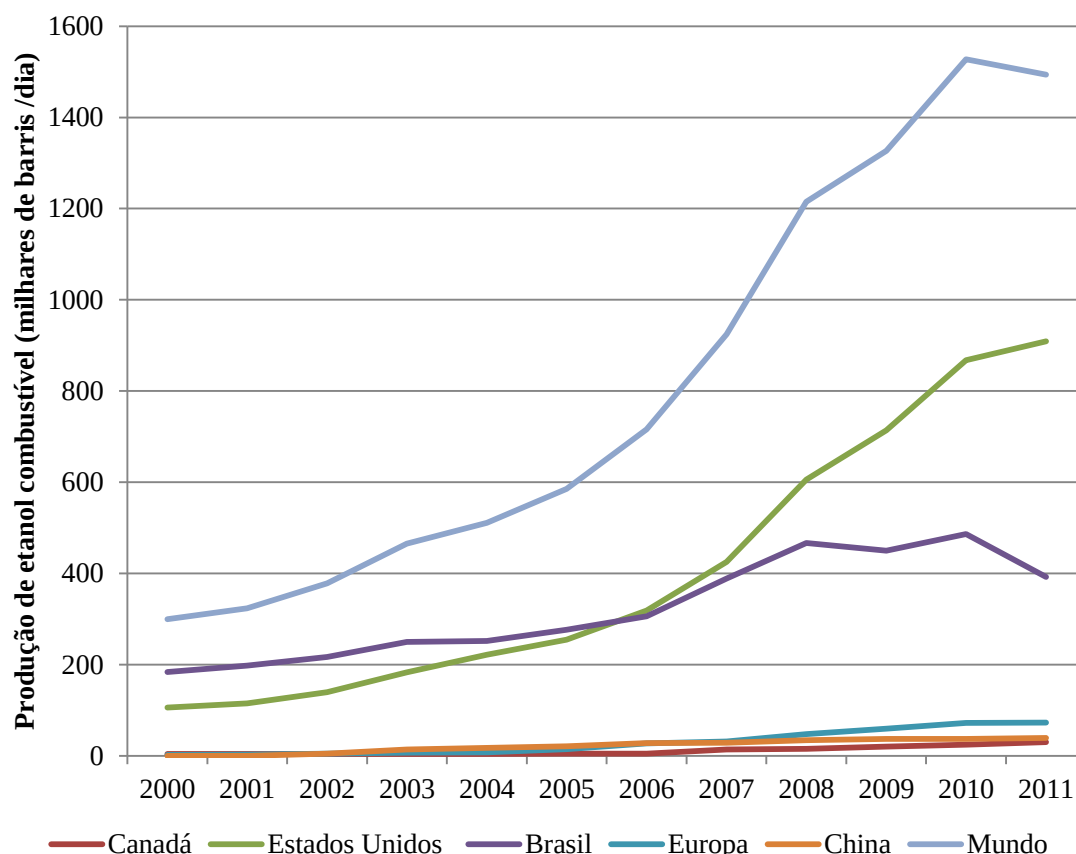


Figura 1: Produção de etanol combustível pelos maiores países produtores entre 2000-2010. Fonte: EIA, s/d.

O etanol combustível produzido no Brasil tem como principal matéria prima a cana-de-açúcar, cultura presente na história do país desde a sua colonização. No entanto, a destinação de parte da lavoura de cana para a produção de etanol carburante se deu no ano de 1931 mediante o decreto nº 19.717 (BRASIL, 1931), com a mistura compulsória de, no mínimo, 5% de etanol anidro² à gasolina.

Um importante passo para a indústria sucroalcooleira ocorreu em 1933 com a criação do Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA), refletindo o crescimento do papel do Estado na regulamentação do setor na tentativa de amenizar as constantes tensões entre usineiros e fornecedores de cana (TÁVORA, 2011).

Com a primeira crise do petróleo em 1973, surge uma nova realidade energética ao país, resultando no surgimento do Programa Nacional do Alcool (Proálcool) em 1975 (BRASIL, 1975). O Programa visava não só garantir o fornecimento de energia para o

² Etanol anidro (ou álcool etílico anidro): apresenta em torno de 0,5% água, em volume, em sua composição.
Etanol hidratado (ou álcool etílico hidratado): apresenta cerca de 5% de água, em volume na sua composição.

mercado interno e externo, mas também apoiar a diversificação da produção da indústria açucareira por meio da modernização e instalação de novas unidades produtoras e de intervenções no mercado objetivando, assim, estimular a produção de álcool.

A partir de 1979, em razão de novo aumento de preços do petróleo, o programa foi expandido com o incentivo do uso de etanol hidratado em motores adaptados ou especificamente produzidos para tal. Como consequência a produção de etanol cresceu de 0,6 bilhão de litros, em 1975, para quase 12 bilhões de litros, em 1985 (CGEE, 2007).

Uma reviravolta neste cenário se dá na segunda metade dos anos 1980 quando subvenções para a produção do etanol tiveram que ser drasticamente reduzidas em razão da situação econômica do país. Quando em 1986 os preços do petróleo caíram o Programa Proálcool não era mais economicamente atrativo. O aumento do preço do açúcar e a liberalização da exportação do produto em 1988 levaram à redução da produção do biocombustível e, por consequência, acabou por desencadear na redução da produção de motores movidos somente a etanol (KOHLHEPP, 2010).

Nos anos de 1990, quando é revisto o papel do Estado na economia nacional, é iniciada a liberalização e o rearranjo institucional do setor sucroalcooleiro. Nesta mesma década preocupações de cunho ambiental vêm à tona na Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento realizada na cidade do Rio de Janeiro, sobretudo, as relacionadas ao aquecimento global. Estas preocupações mais tarde se desdobrariam na assinatura de protocolos como os de Montreal (eliminação dos gases que destroem a camada de ozônio) e de Kyoto (redução das emissões de gases de efeito estufa), iniciando o estabelecimento de metas de redução de emissões e agendas de comprometimento de melhorias sociais e ambientais, como a Agenda 21. Estas novas preocupações globais se tornam um marco importante para o início da consolidação do etanol de cana-de-açúcar brasileiro nas ações de reforma dos setores de energia e transportes dos países com metas de redução ou limitação de emissões de GEEs.

A retomada do Programa Brasileiro de Álcool na década de 2000 se dá em meio ao reconhecimento do etanol combustível como um dos principais mecanismos de combate ao aquecimento global e de garantia de oferta de um combustível alternativo aos fósseis. É neste período que se inicia a reestruturação institucional do setor sucroalcooleiro por meio da criação do Conselho Interministerial do Açúcar e do Álcool (CIMA), em 2000, e pela ampliação do campo de atuação Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) pela Lei 11.097 de 2005 (BRASIL, 2005).

A partir de 2003 com o advento dos carros *flex-fuel* (carros movidos tanto a gasolina C quanto a etanol hidratado) e sua grande aceitação pelos consumidores, a frota nacional de veículos somente a gasolina ou a etanol teve uma significativa redução, enquanto a frota *flex-fuel* crescia aceleradamente (Figura 2). Em 2012 a frota de carros *flex-fuel* já representava mais de 79% da frota de autoveículos produzida no Brasil (ANFAVEA, 2013).

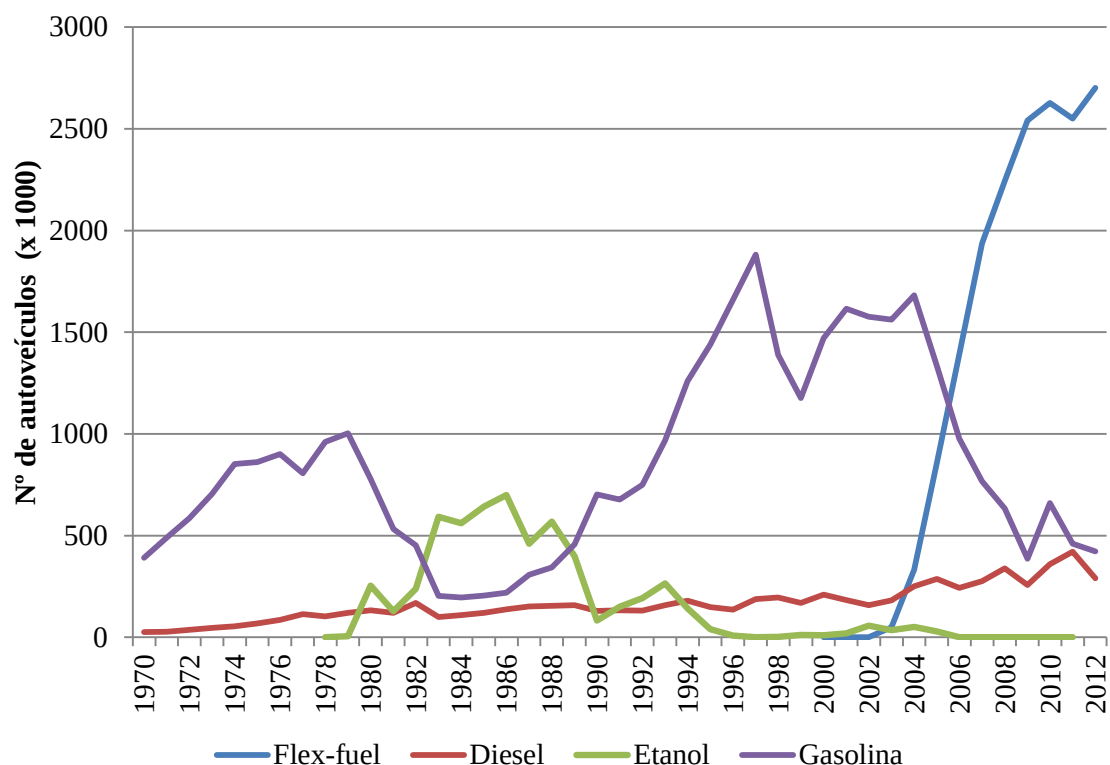


Figura 2: Produção de autoveículos no Brasil por combustível - 1970/2011. Fonte: ANFAVEA, 2013.

Como consequência da reestruturação do setor sucroalcooleiro e da retomada do programa de etanol, a década de 2000 é marcada pela expansão da cultura canavieira e dos seus principais produtos, o açúcar e o etanol, em cerca de 10% ao ano (Figura 3).

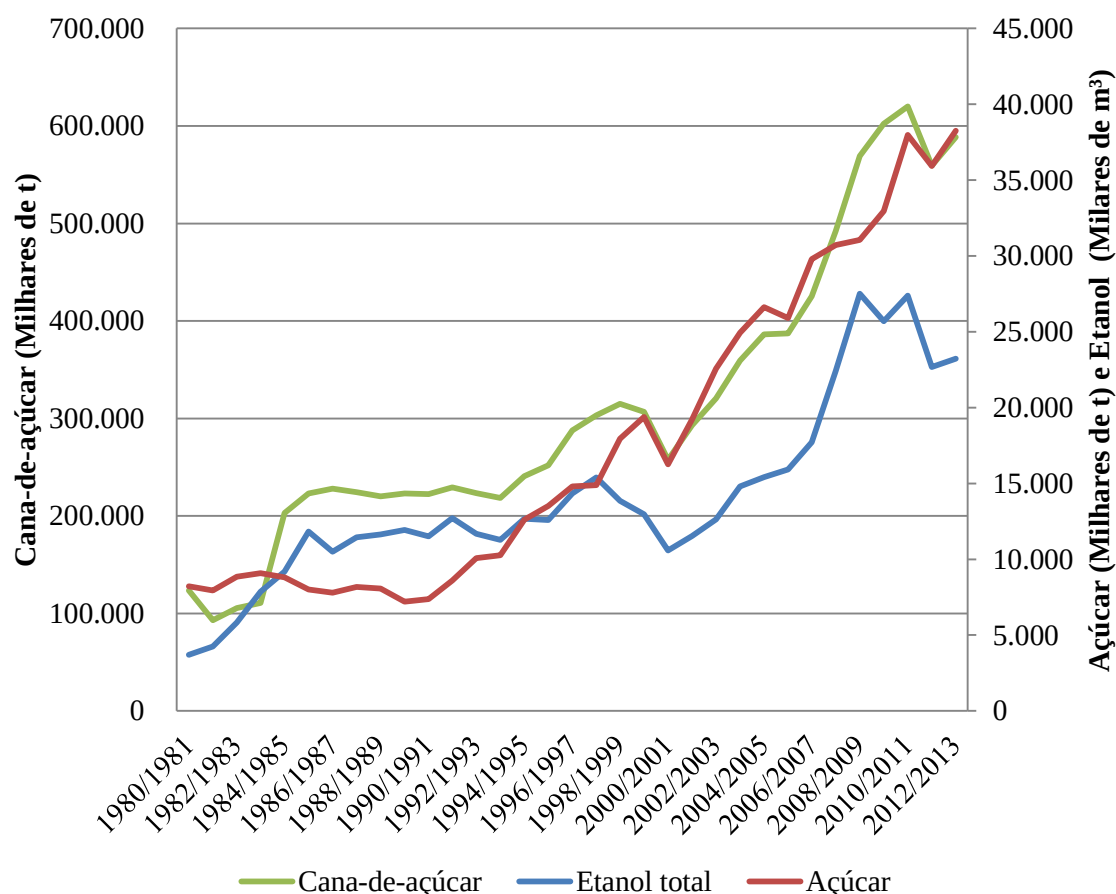


Figura 3: Evolução da produção de cana-de-açúcar, etanol e açúcar no Brasil. Fonte: UNICA, s/d.

Uma desaceleração no crescimento do setor sucroenergético é percebida nos últimos anos como consequência dos reflexos da crise global de crédito em 2008; da ausência de planejamento governamental para este setor e das influências climáticas sobre a lavoura da cana. O etanol foi o produto do setor que sofreu maior queda na produção, apresentando um taxa negativa de cerca 17% no ano de 2011.

Diante deste quadro a Política Energética Nacional sofreu complementação através da Lei Federal nº 12.490/2011 (BRASIL, 2011) de forma a garantir o abastecimento de biocombustíveis em todo o território brasileiro. Considerada um marco importante da política pública, esta lei trata da fiscalização das atividades referentes ao abastecimento e utilização de biocombustíveis considerando, inclusive, os benefícios ambientais destes.

Os benefícios ambientais do uso de biocombustíveis são ressaltados no Plano Nacional de Agroenergia, outro importante marco nacional para as ações públicas e privadas na geração de conhecimento e tecnologias que contribuem para o estímulo da

expansão da produção doméstica de etanol; aumento da eficiência energética; produção sustentável e uso racional da energia renovável (MAPA. 2006).

Iniciativas que agregam ações voltadas à sustentabilidade na estratégia de negócios do setor sucroenergético brasileiro vêm sendo reconhecidas e, muitas vezes, questionadas mundialmente. Mercados mais fechados como o da União Europeia, os quais exigem o cumprimento de critérios de sustentabilidade para os biocombustíveis consumidos em seus estados membros, estimularam o desenvolvimento de sistemas de certificação para o açúcar e o etanol brasileiro. Importante desdobramento destas iniciativas foi o reconhecimento pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, em 2010, do etanol brasileiro como biocombustível avançado capaz de reduzir as emissões de GEEs em pelo menos 50% quando comparado com a gasolina.

Por fim, o programa de biocombustíveis do Brasil que tem como carro-chefe o etanol de cana-de-açúcar, é modelo para o mundo. Nesta nova conjuntura global o Brasil caminha no sentido da incorporação dos critérios de sustentabilidade ao longo de toda cadeia produtiva deste combustível, importante passo garantir uma produção de energia verdadeiramente renovável.

2.2 Perspectivas de demanda e oferta nacional e internacional de etanol de cana-de-açúcar

O consumo mundial de biocombustíveis cresceu rapidamente na última década principalmente a partir da sua segunda metade, chegando a uma taxa de crescimento de cerca de 150% entre os anos de 2000 e 2006. Os EUA e o Brasil são os maiores *players* deste mercado, ambos responsáveis por mais de 70% do consumo mundial de biocombustíveis no ano de 2011, cerca de 900 e 380 mil barris/dia, respectivamente (EIA, s/d).

O etanol combustível representa a maior parte do consumo mundial de biocombustíveis, cerca de 77% do consumo total. Entre os anos de 2000 e 2011 o consumo de etanol aumentou cerca de 390%, atingindo mais de 1,4 milhão de barris/dia (EIA, s/d).

Os principais países consumidores de etanol são EUA, Brasil, Canadá, China e Alemanha. Apesar do mercado de combustíveis renováveis Europeu ser dominado pelo

biodiesel (cerca de 70%), o consumo de etanol tem aumentado nos últimos anos em especial na Alemanha, França, Suécia e Espanha (EIA, s/d) (Figura 4).

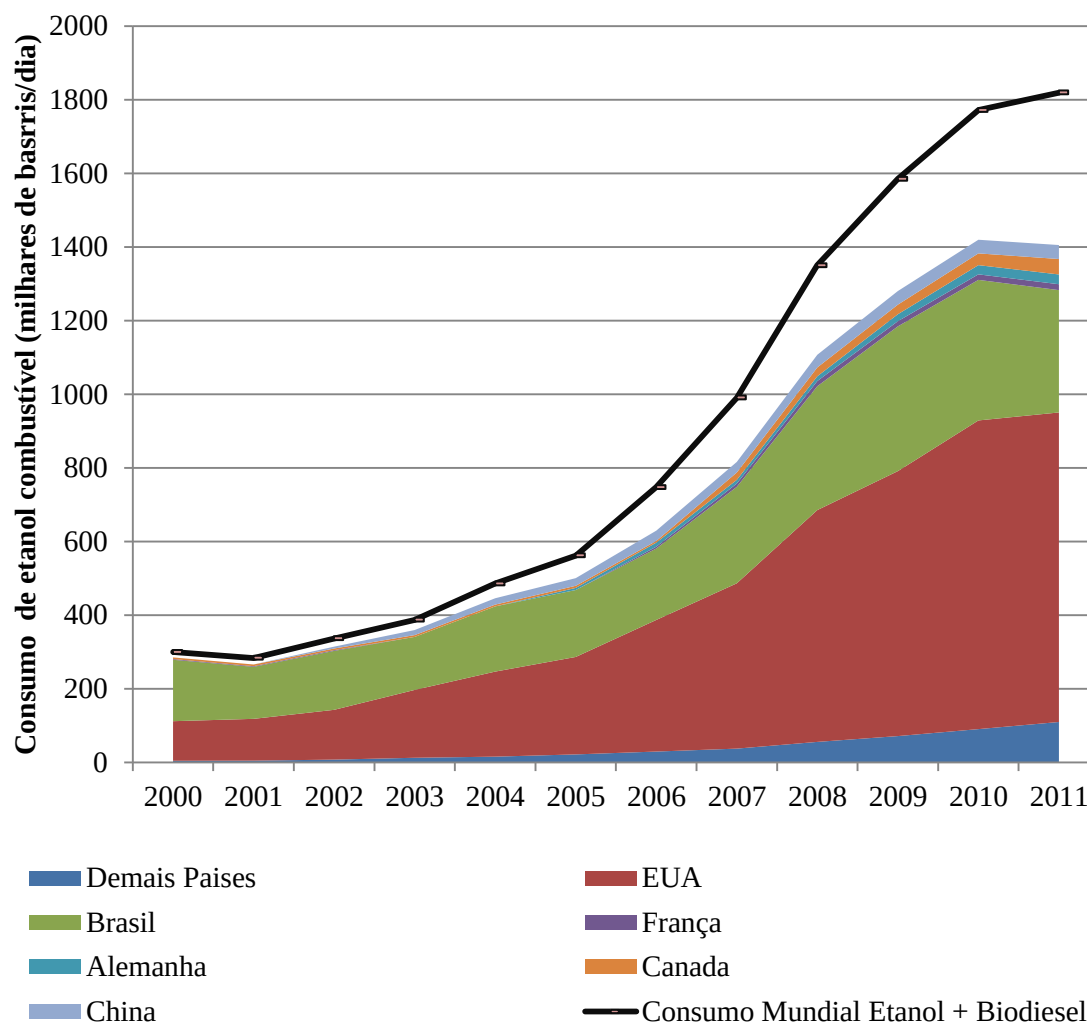


Figura 4: Consumo de biocombustíveis (etanol e biodiesel) no mundo e de etanol pelos principais países consumidores (2000 a 2010). Fonte dados: EIA, s/d.

A participação do etanol brasileiro no mercado internacional e os *players* deste mercado variam ao longo dos anos conforme políticas internas relacionadas a biocombustíveis amadurecem entre os países. Nos últimos três anos o Brasil teve como principais mercados importadores de etanol a América (com destaque para os EUA e Jamaica); a Europa (com destaque para o Reino Unido e Países Baixos) e a Ásia (com destaque para o Japão e Coréia do Sul) (MAPA, 2010) (Figura 5).

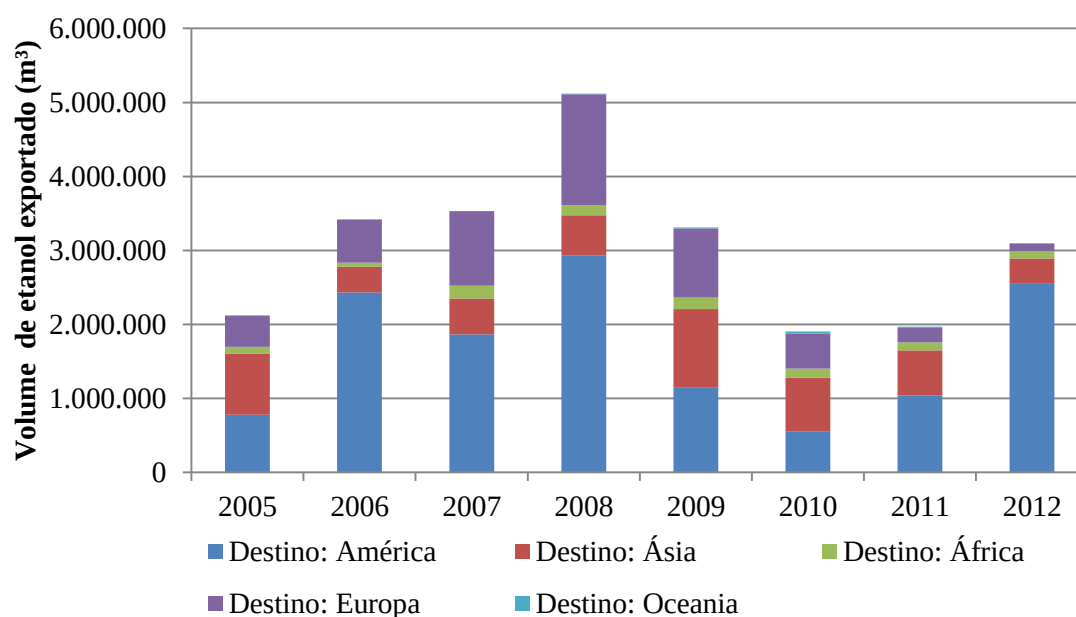


Figura 5: Exportações brasileiras de etanol por continente nos anos de 2005-2012. Fonte dados: UNICA, s/d.

Além do Brasil, esforços são direcionados por outros países para a introdução de biocombustíveis líquidos (etanol e biodiesel) no setor de transporte. Por exemplo, a Índia promove a introdução de biodiesel e tem como objetivo substituir 20% do óleo fóssil por biodiesel; na China, a Comissão de Reforma e Desenvolvimento Nacional promove a produção de biocombustíveis, visando uma participação de 15% de biocombustíveis na energia de transporte em 2020; nos EUA, o Ato de Segurança e Independência Energética de 2007³ estipulou uma medida mandatória para a produção 36 bilhões de galões de biocombustível a partir do milho e celulose em 2022; a União Europeia pretende substituir 10% dos combustíveis para transporte por energias renováveis em 2020 (GERBENS-LEENES e HOEKSTRA, 2011).

Em meio a discussões pró-biocombustíveis como as relacionadas à segurança energética e metas de redução de emissões de GEEs, questões quanto à sustentabilidade e boas práticas na produção destes energéticos são mencionadas nas políticas energéticas destes países, o que acaba por refletir no mercado mundial do etanol.

A instituição em 2005 do *Renewable Fuel Standard* (RSF)⁴ obrigando a mistura de combustíveis renováveis à gasolina e o reconhecimento em 2010, a partir da RFS2, do

³ *Energy Security and Independence Act of 2007*

⁴ RSF é uma das ações do *Energy Independence and Security Act*.

etanol de cana-de-açúcar como biocombustível avançado, estimulou a produção de etanol nos mercados norte-americano e brasileiro.

A União Europeia, terceiro maior mercado de etanol do mundo, adotou a partir de 2008 um conjunto de diretivas no âmbito da mitigação de GEE e do aumento da participação de energia renovável no setor automotivo (EU, 2008; EU, 2008a). Embora seu mercado de biocombustíveis seja dominado por biodiesel (80%), o consumo de etanol tem aumentando rapidamente nos últimos dois anos, com tendência de importação do etanol brasileiro para a próxima década (SUGARCANE.ORG, s/d; USDA, 2013).

Projeções para a próxima década consideram a manutenção do Brasil como líder no mercado internacional de etanol, com taxas de exportação crescentes de forma constante devido à tendência mais protecionista desse mercado ao redor do mundo e ao aumento do uso doméstico do etanol brasileiro (MME/EPE, 2012; USDA, 2013)).

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética - EPE (MME/EPE, 2012) são estimados para os primeiros anos do período de 2012 a 2021 modestos volumes exportados de etanol brasileiro quando comparados com o recorde histórico de 2008 (5,1 bilhões de litros). Nesse período o país se limitará a atender a contratos de exportação, principalmente entre empresas brasileiras e americanas. Somente a partir de 2015 os volumes exportados totais apresentarão crescimento anual alcançando, mesmo assim, não mais que 3,3 bilhões de litros em 2021.

Em estudo a FIESP/ICONE (2012) estimam um volume líquido de exportações maior para 2022/2023, cerca de 10,3 bilhões de litros, o que representa em média 15% do total de etanol produzido no período projetado (2011-2023).

Em relação ao mercado doméstico, a demanda de etanol continuará em franca expansão no país nos próximos anos devido ao aumento expressivo da frota de veículos *flex-fuel*. Os veículos *flex*, que hoje representam 49% da frota nacional de veículos leves circulantes, chegam a representar cerca de 80% da mesma em 2020 (FIESP/ICONE, 2012; MME/EPE, 2012). Esse fenômeno é mais intensivo na primeira metade da década, pois nesse período se concentra o sucateamento da frota atual, majoritariamente de carros a gasolina.

Além da frota *flex* a demanda doméstica de etanol está condicionada aos preços relativos da gasolina C. Este, por sua vez, é formado pelo preço da gasolina A e pelo etanol anidro (em menor proporção). O preço da gasolina A é determinado pelo governo, sendo a taxa dos combustíveis geralmente em privilegio do etanol em detrimento da gasolina.

De acordo com a EPE (MME/EPE, 2012) a demanda doméstica de etanol no horizonte decenal 2011-2021 será plenamente atendida pela expansão da oferta interna, mais retraída no início do período. A demanda doméstica do etanol hidratado passará de 14,6 bilhões de litros para 52 bilhões de litros entre 2011 e 2021. Quanto ao etanol anidro (com a manutenção da obrigatoriedade de adição de 25% à gasolina), espera-se que o consumo interno saia de 7,2 bilhões de litros para 9,6 bilhões de litros no período de 2011 a 2021 (MME/EPE, 2012). Isso representará uma demanda doméstica total de 61,6 bilhões de litros de etanol em 2021.

O estudo da FIESP/ICONE (2012) projeta uma demanda doméstica de etanol total para 2022 de 45,8 bilhões de litros.

Em relatório recente o *United States Department of Agriculture* -USDA (2013) prevê um aumento de 90% na produção de etanol no Brasil, principalmente para atender à crescente demanda doméstica e aumento das exportações para União Europeia e Estados Unidos. Agregando as demandas internas e externas o relatório prevê uma demanda de 67 bilhões de litros em 2022.

A Tabela 1 apresentada uma comparação das demandas totais de etanol para a próxima década de acordo com as diferentes fontes de informação citadas acima.

Tabela 1: Quadro comparativo das projeções de demandas internas e externas de etanol para os anos de 2020/2022.

Referência bibliográfica	Período considerado pelo estudo	Demanda doméstica e externa de etanol em 2021 e 2022 (bilhões de litros)
MME/EPE, 2012	2011-2021	68,5
FIESP/ICONE, 2012	2011-2022	56,1
USDA, 2013	2013-2022	67

No que diz respeito à oferta doméstica de etanol, no ano de 2012 foi de 24,6 bilhões de litros, representando uma queda de 15% em relação a 2010, reflexo da falta de investimentos em toda a cadeia produtiva do setor sucroenergético; dos problemas climáticos em 2009/2010 e da falta de renovação dos canaviais (MME/EPE, 2012).

Ainda segundo a EPE (MME/EPE, 2012) a produção de etanol em 2016 atingirá 45,4 bilhões de litros com necessidade de importações deste produto para atender a demanda esperada. A partir de 2016 estima-se que os investimentos público-privados efetuados no período possibilitem um novo ciclo de expansão, sem mais necessidade de importações. Neste cenário a oferta atingirá 68,3 bilhões de litros em 2021.

Investimentos governamentais para o setor sucroalcooleiro vêm sendo estudados visando o aumento da oferta de matéria-prima para as usinas nesta próxima década. Estas medidas exigirão, necessariamente, a ampliação das áreas de produção de cana-de-açúcar, sobretudo em curto prazo. Uma perspectiva da área necessária para a expansão da cultura de cana-de-açúcar e das regiões do Brasil onde a expansão se direciona são apresentadas a seguir.

2.3 Perspectivas de expansão de áreas para a cultura de cana de açúcar no Brasil

O Brasil tem na agricultura uma das principais bases econômicas do país tendo permanentemente aumentando sua participação no mercado internacional tanto de *commodities* tradicionais quanto de biocombustíveis líquidos, como o etanol a partir da cana-de-açúcar.

Demandas crescentes por biocombustíveis vêm moldando o uso e ocupação do solo dos países produtores de bioenergéticos nas últimas décadas. O Brasil, atualmente o maior produtor de cana-de-açúcar mundial, teve rápida expansão da sua área de cultivo de cana-de-açúcar nas últimas décadas, em grande parte impulsionada pelo seu programa de biocombustíveis iniciado em 1975.

Até meados da década de 1990 as áreas ocupadas para produção de cana concentrava-se nas chamadas regiões tradicionais do Sudeste e Nordeste. É a partir da década de 2000, com a consolidação do setor sucroalcooleiro na região Sudeste; a retomada do Programa Proálcool e o aumento da demanda interna de etanol, que novas fronteiras agrícolas para a expansão canavieira tomam direção ao Centro-Sul (Figura 8).

A área cultivada com cana-de-açúcar no Brasil no ano de 2011 foi de 9,6 milhões de hectares, com a região Centro-Sul sendo responsável por 86,7% da área plantada. Aliando à concentração de áreas de cultivado e elevada produtividade, cerca de 77 t/ha contra 63 t/ha da Região Norte-Nordeste, a região Centro-Sul é a maior produtora de cana-de-açúcar no país (MAPA, 2010). São Paulo se destaca pela produção de cerca 55% da cana-de-açúcar nacional e mais de 60% da produção da Região Centro-Sul no ano de 2011. Minas Gerais, Goiás, Paraná e Mato Grosso do Sul juntos representaram quase 30% da produção nacional no mesmo ano (UNICA, s/d) (Figura 6).

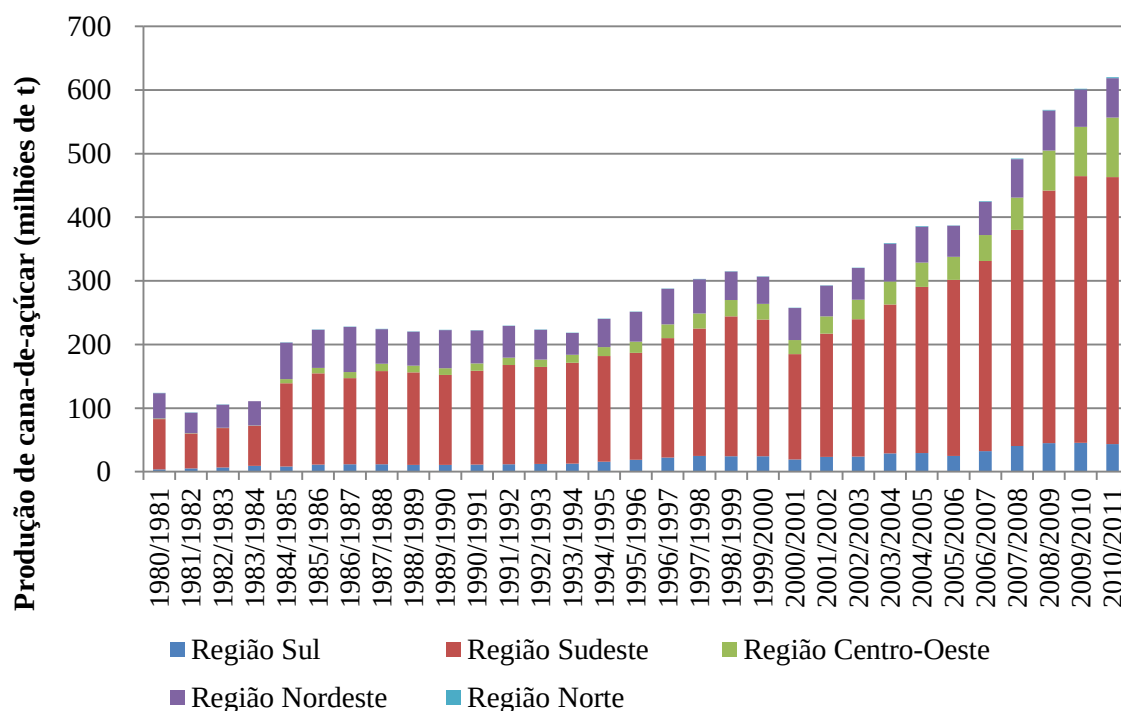


Figura 6: Produção de cana-de-açúcar por região do Brasil entre os anos 1980-2011. Fonte: UNICA, s/d.

O Centro-Oeste do país vem se destacando pelo rápido crescimento da área plantada com cana a partir do ano de 2000. Esta região passou de 373 mil hectares plantados no ano de 2002 para cerca de 1,42 milhão de hectares no ano de 2011 (UNICA, s/d), um aumento de cerca de 280%. Goiás e Mato Grosso do Sul foram os maiores responsáveis por esse aumento, ambos representando cerca de 84% (80 milhões de toneladas) da produção atual dessa região (UNICA, s/d).

Estados da Região Norte, sobretudo Tocantins em conjunto com Maranhão e Piauí, também apresentaram considerável crescimento da área planta com cana, cerca de 200% entre 2000-2011. Apesar do valor base pequeno, cerca de 30 mil ha em 2000 para 90 mil ha em 2011, esta região tem potencial para ser novo eixo de produção (MAPA, 2006).

Uma característica marcante da agroindústria canavieira nacional é a proximidade entre a área cultivada e a unidade industrial⁵. A partir de dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2012) estimam-se que a capacidade total de moagem de cana do Brasil seja de 602,2 milhões de toneladas, ao final de 2013, correspondente as

⁵ A proximidade entre canaviais e usinas baseia-se em aspectos econômicos relacionados à logística e à necessidade de se transportar rapidamente a cana colhida até a usina.

385 usinas em operação registradas no MAPA, das quais 304 estão localizadas na região Centro-Sul. Essa característica impulsiona a implantação de novos projetos de usinas e de logística para o escoamento do etanol para o Centro-Oeste (Figura 7).

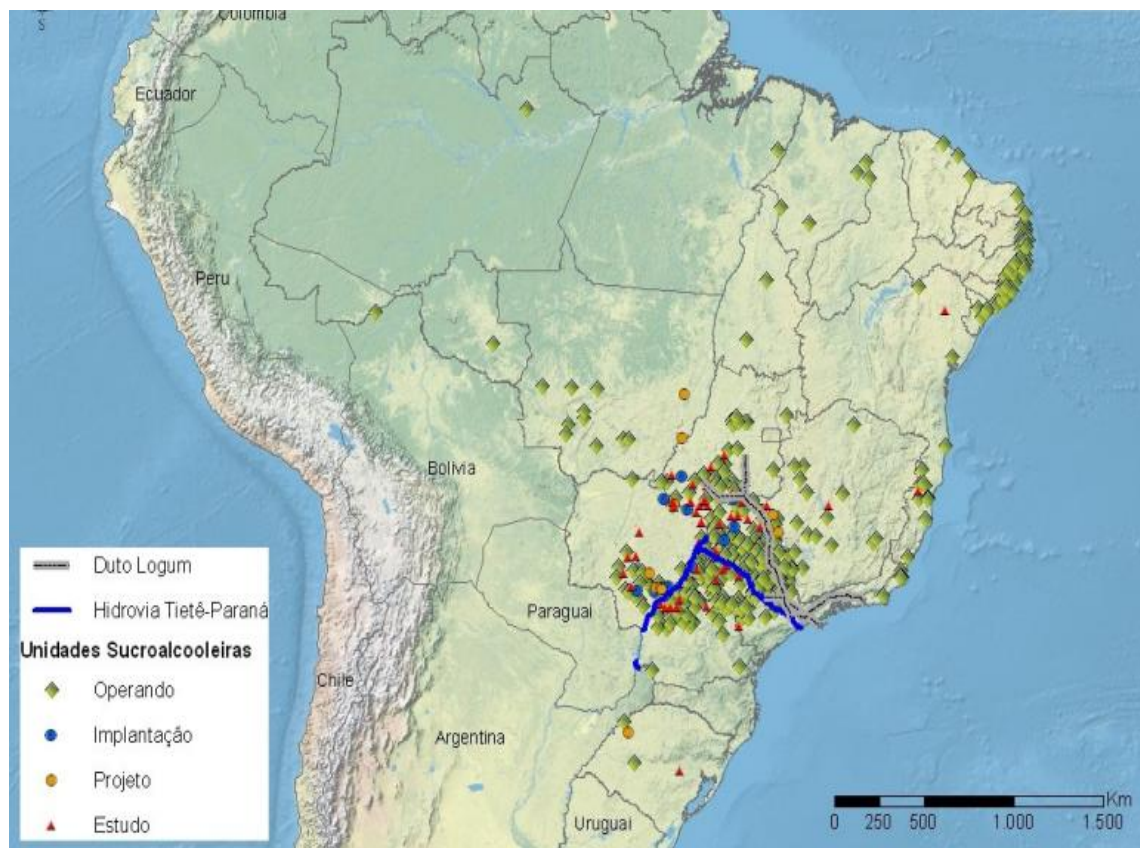


Figura 7: Distribuição espacial das usinas em operação, em implantação e em fase de projeto no Brasil e infraestrutura de escoamento de etanol. Fonte: MME/EPE, 2012.

A tendência de expansão da cultura de cana em direção ao cerrado no Brasil central parece continuar nos próximos anos. O zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar (MANZATTO et.al, 2009) uma das ações previstas pelo Plano Nacional de Agroenergia (MAPA, 2006) para desenvolvimento de plano diretor para a expansão sustentável da indústria sucroalcooleira no Brasil, aponta a região Centro-Oeste como a de maior concentração de áreas aptas à expansão do cultivo da cana-de-açúcar no Brasil⁶. Essa região, com destaque para os estados de Goiás e Mato Grosso do Sul, representa

⁶ No estudo foram excluídos (as): as terras com declividade superior a 12%; as áreas com cobertura vegetal nativa; os biomas Amazônia e Pantanal e a Bacia do Alto Paraguai; as áreas de proteção ambiental; as terras indígenas; remanescentes florestais; dunas; mangues; escarpas e afloramentos de rocha; reflorestamentos e áreas urbanas e de mineração. Nos Estados da Região Centro-Sul (GO, MG, MT MS, PR e SP), foram também excluídas as áreas atualmente cultivadas com cana-de-açúcar no ano safra 2007/2008. Para a região Norte, somente o estado do Tocantins foi considerado.

aproximadamente 47% (cerca de 30 milhões de hectares) das áreas aptas potenciais para a expansão do cultivo da cana-de-açúcar, e a região Sudeste, com destaque para São Paulo e Minas Gerais, representa cerca de 35% (cerca de 23 milhões de hectares).

De acordo com o estudo da FIESP/ICONE (2012) a expansão projetada de aproximadamente 4 milhões de hectares da área de cana-de-açúcar, entre 2010/2011 a 2022/2023, irá se concentrar nas regiões Sudeste e Centro-Oeste Cerrado, com 42% e 38% de todo o crescimento em área plantada, respectivamente.

O estudo “Projeções do Agronegócio Brasil 2011/12 a 2021/22” (MAPA, 2012) projeta uma expansão de 1,9 milhão de hectares de cana-de-açúcar no Brasil até 2022, sendo as maiores expansões de produção em Goiás, 40,5%; São Paulo, 39,7% e Minas Gerais, 32,6%. O estado de Goiás é o que deve apresentar nos próximos anos os maiores aumentos da área de cana-de-açúcar (41,3%).

Segundo a EPE (MME/EPE, 2012) no horizonte decenal 2011-2021 a área colhida aumentará de 8,2 para 13 Mha. Ainda, devido ao aumento da produtividade de 68,3 para 88,5 tc/ha, neste mesmo período, será evitada a utilização de 3,9 Mha adicionais. Outra informação relevante deste estudo é que o percentual de cana destinada à produção de etanol passará de 51% da produção total, em 2012, para 67,6% em 2021, aumento que se deve à maior taxa de crescimento da demanda de etanol.

Existem preocupações em até que ponto o aumento da produção de cana tem causado o desmatamento e/ou o deslocamento de culturas agrícolas no Brasil (RIBEIRO, 2010; WALTER et. al., 2011). A comparação das alterações do uso do solo nas regiões do Brasil com maior concentração de áreas destinadas à plantação de cana-de-açúcar e tendências de expansão dessa cultura revela uma redução nas áreas de pastagens e aumento das áreas de lavouras. Em relação à região Centro-Oeste percebe-se uma redução na área de matas/florestas concomitantemente com o grande aumento da área de lavouras e da cana-de-açúcar (Figura 8).

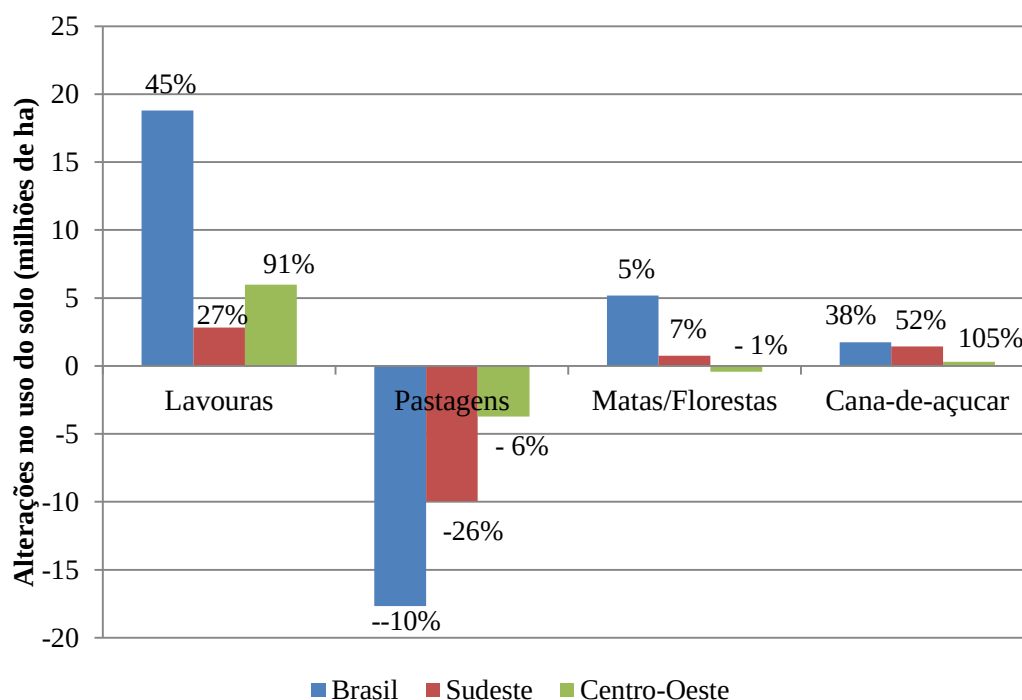


Figura 8: Alterações no uso do solo no Brasil e regiões Sudeste e Centro-Oeste entre 1995-2006. Fonte: IBGE, s/d.

A expansão das áreas de cana-de-açúcar e sua relação com as alterações e ocupação do solo e consequentes impactos sobre os recursos hídricos são um dos principais problemas relacionados à sustentabilidade da produção de etanol. A agricultura, e por tanto, a produção de biomassa energética, é um dos principais *drivers* antropogênicos que resultam em alterações na quantidade dos recursos hídricos (cerca de 70% da água captada no mundo é destinada à irrigação) e na qualidade das águas (excesso de carga de nutrientes e poluentes associadas com o uso de fertilizantes e agrotóxicos pela agricultura) (MEA, 2005).

De acordo com o relatório *Millennium Ecosystem Assessment* (2005) um dos principais *trade-offs* envolvendo decisões políticas para os próximos 50-100 anos envolverá o uso de recursos naturais, sobretudo, os relacionados à produção agrícola e a qualidade da água, uso da terra e biodiversidade, uso da água e a biodiversidade aquática e o uso de água para irrigação e a futura produção agrícola.

A avaliação das alterações nos usos do solo devidas à expansão de áreas produtoras de cana-de-açúcar e os potenciais impactos sobre os recursos hídricos, considerando a bacia hidrográfica como unidade de estudo, proporciona uma análise integrada dos fatores ambientais relacionados à sustentabilidade de programas nacionais de produção de biocombustíveis. Além disso, questões referentes à alocação justa e

eficiente dos recursos hídricos são mais relevantes na escala de bacias hidrográficas (HOEKSTRA, et al, 2011).

Dessa forma, visando fornecer dados para uma análise integradora da sustentabilidade da produção de etanol no Brasil, o presente trabalho definiu como unidade de estudo a bacia hidrográfica do rio Paranaíba para melhor analisar os potenciais impactos da expansão de áreas destinadas à produção de cana-de-açúcar sobre os recursos hídricos. Esta análise será mais bem detalhada no Capítulo 4, sendo o Capítulo 3 uma revisão sobre a sustentabilidade da produção de biocombustíveis sob um viés ambiental considerando critérios relacionados ao tema água.

Capítulo 3: Biocombustíveis e Desenvolvimento Sustentável: o Uso da Água para Produção de Etanol de Cana-de-açúcar no Brasil

3.1 Biocombustíveis líquidos e desenvolvimento sustentável

Os biocombustíveis líquidos são produzidos a partir de biomassa que, de acordo com a *International Energy Agency* (IEA), é definida como “qualquer matéria orgânica derivada de plantas ou animais disponíveis numa base renovável, incluindo madeira e culturas agrícolas, herbáceas e culturas energéticas lenhosas, resíduos orgânicos municipais, bem como esterco”. Este tipo de energia renovável surgiu como uma alternativa às fontes energéticas fósseis, à dependência energética, à mitigação dos efeitos das mudanças climáticas e ao desenvolvimento rural (FRAITURE, 2008; GOLDEMBERG, 2008; SIMS, 2003). Diante disso, os biocombustíveis líquidos vêm ao encontro do tão almejado desenvolvimento sustentável, sobre tudo em países em desenvolvimento como o Brasil. O termo desenvolvimento sustentável retoma os conceitos do ecodesenvolvimento, introduzindo a preocupação com as gerações futuras e a dimensão ecológica, além de incorporar as dimensões econômica, social, tecnológica, cultural e política. O conceito clássico de desenvolvimento sustentável é aquele desenvolvido pela Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD) da Organização das Nações Unidas (ONU) e publicado no relatório *Nosso Futuro Comum*, em 1987, que é: Desenvolvimento Sustentável é aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade das gerações futuras atenderem as suas próprias necessidadesl.

Aproveitando-se de suas condições climáticas, disponibilidade de terras e da experiência acumulada ao longo do tempo como pioneiro no ressurgimento de sistemas de energia a partir de biomassa, o governo brasileiro vem investindo em programas para produção de biocombustíveis. Exemplo disso é Programa Proálcool que retomou a produção de etanol na década de 2000 com vistas a atender uma demanda doméstica e internacional crescente por fontes renováveis. Hoje o Brasil como o segundo maior produtor de etanol do mundo continua sendo considerado um *case* de sucesso dada às baixas emissões de gases de efeito estufa, a disponibilidade de terras para culturas

energéticas, o baixo desmatamento induzido e as metas de inclusão social da agricultura familiar (GOLDEMBERG; ET.AL., 2008; NASSAR et al., 2011; SCHAFFEL e LA ROVERE, 2010). Segundo PEREIRA JR. et. al (2008) o requerimento de terras para produção de cana-de-açúcar para atender a demanda de etanol projetada pela matriz energética nacional de 2030 (14 milhões de hectares), representa 15% do total de terras disponíveis para agricultura e 3,8% do total da área de agricultura (Tabela 2). Dessa forma, devido a grande disponibilidade de terras a expansão da atividade agrícola não necessariamente implica em desmatamento.

Tabela 2: Uso do solo no Brasil

Uso do solo	10 ⁶ ha	%
Floresta amazônica e áreas de proteção ambiental	405	47,6
Áreas urbanas, rodovias, rios e outros	20	2,4
Áreas para agricultura	366	43
-Pastagem	210	24,7
-Culturas permanentes e temporárias	61	7,2
-Silvicultura	5	0,6
-Fronteira agrícola	90	10,6
▪ Cana-de-açúcar (projeção para 2030)	14	15,5
Outros usos	60	7,1
Total	851	100

Fonte: adaptado de PEREIRA JR et al., 2008.

No entanto preocupações quanto aos impactos econômicos, sociais e ambientais da produção de biocombustíveis resultam em questionamentos sobre a sustentabilidade da produção desse tipo de energia (SMEETS et al., 2008). Discussões e estudos que relacionam a produção dos biocombustíveis com a perda da biodiversidade, com escassez de recursos hídricos, com a insegurança alimentar e, ao contrário de estudos anteriores, com aumentos nas emissões de GEEs devidos ao desmatamento indireto e adubação nitrogenada (FARGIONE; ET.AL, 2008; FRAITURE, 2008; GIBBS et al., 2008; LAPOLA et al., 2010) vem sendo realizados, sobretudo, por países consumidores e produtores dos biocombustíveis. Mudanças diretas e indiretas no uso e ocupação do solo para a produção de culturas bioenergéticas, segundo (MIYAKE et al., 2012), continuarão a ocorrer e provavelmente a demandar elevados recursos terrestres em todo o mundo ainda que rendimentos mais elevados das espécies vegetais sejam introduzidos no médio e longo prazo. A incorporação de novas áreas para a produção de culturas energéticas

demandará água para o crescimento de biomassa resultando em pressões sob os recursos hídricos caso essa expansão ocorra em áreas com déficit hídrico. Ainda, a adoção de práticas para a intensificação da produção ou a utilização de áreas subutilizadas para a produção agrícola poderão requerer entradas significativas de água e nutrientes para manter a produtividade, acabando, também, por impactar os recursos hídricos (FRITSCHÉ et al., 2010).

Frente a estas preocupações em torno dos impactos socioambientais percebidos durante a produção da bioenergia e ainda ao aumento da participação desta forma de energia na matriz energética de diversos países (IEA, s/d), esforços transnacionais de governança são direcionados para um modelo regulatório híbrido que combina elementos do poder público e privado na adoção de instrumentos e medidas que resultem em práticas sustentáveis para produção de biocombustíveis (LIN, 2011).

Dentro dos instrumentos internacionais com compromissos obrigatórios que devem ser tomados em conta pelos países que visam promover o setor de bioenergia, destacam-se a Convenção sobre Diversidade Biológica, Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação, a Diretiva de Energia Renovável da União Européia (RED⁷) e o Padrão dos Combustíveis Renováveis Norte-Americano (RFS) da Agência de Proteção Ambiental Norte-Americana.

Instrumentos voluntários como a Agenda 21 formulada pela CNUMAD⁸, a Declaração do Rio sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, Princípios sobre Florestas e Painel Intergovernamental sobre Florestas/Foro Intergovernamental sobre Florestas enfatizam e orientam a importância de políticas para a preservação ambiental e do desenvolvimento social em países produtores de bioenergia.

Iniciativas como o *Global Bioenergy Partnership* (GBEP), da qual o governo brasileiro participa, promovem globalmente diálogos sobre bioenergia além de fornecer mecanismos para organizar, coordenar e executar atividades internacionais relacionadas à produção, distribuição, conversão e utilização da biomassa para energia, com foco em países em desenvolvimento.

Normas internacionais como a ISO/PC 248 - Critérios de sustentabilidade para bioenergia (em desenvolvimento) visam tratar de questões ligadas à sustentabilidade da

⁷*Renewable Energy Directive* 2009/28/CE do parlamento europeu e do conselho de 23 de Abril de 2009 relativa à promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis que altera e subsequentemente revoga as Diretivas 2001/77/CE e 2003/30/CE.

⁸Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (CNUMAD), conhecida também como ECO-92, ocorrida em 1992 na cidade do Rio de Janeiro.

bioenergia por meio de critérios sociais, econômicos e ambientais da produção, cadeia de fornecimento e utilização de bioenergia.

Outras iniciativas que surgem do modelo regulatório de biocombustíveis são os sistemas de certificação como o *Better Sugar Cane Initiative* Ltda (Bonsucro), Rede de Agricultura Sustentável (RAS), *Roundtable on Sustainable Biomaterials* (RSB), *Renewable Transport Fuel Obligation* (RTFO), *International Sustainability and Carbon Certification* (ISCC), Comissão Cramer e a SEBAK Iniciativa para o Etanol Sustentável Verificado. Todos estes sistemas exigem o cumprimento de critérios sociais e ambientais para que a produção alcance a certificação.

No âmbito nacional algumas medidas visando à sustentabilidade da produção do etanol de cana-de-açúcar brasileiro se destacam, tais como, a Lei Estadual nº 11.241/2002 (SÃO PAULO, 2002), que estabelece prazos para redução da prática das queimadas de canaviais; o Protocolo Agroambiental do Estado de São Paulo firmado em 2007, que define diretrizes técnicas ambientais a serem implementadas pelas unidades agroindustriais e pelas associações de fornecedores de cana aderentes ao protocolo (UNICA, s/d); o Relatório de Sustentabilidade do setor sucroenergético brasileiro da UNICA, com base nas diretrizes da *Global Reporting Initiative* (GRI) (UNICA, 2010); o Programa Brasileiro para Certificação de Biocombustíveis (INMETRO⁹) baseado em critérios técnicos preestabelecidos contemplando a qualidade intrínseca do produto e o impacto socioambiental do processo produtivo e; o zoneamento agroambiental do Estado de São Paulo e o Zoneamento Agroecológico da Cana-de-Açúcar (MANZATTO, 2009) que visam o planejamento sustentável da expansão da cana-de-açúcar no território nacional.

Estas diversas iniciativas governamentais e privadas apresentam princípios e critérios econômicos, sociais e ambientais no intuito de alcançar a produção sustentável dos biocombustíveis. Como princípio geral orientador, considera-se como desenvolvimento sustentável da produção de biocombustíveis o processo de progresso tecnológico e organização social que atenda às necessidades da sociedade (e, particularmente, aqueles menos favorecidos) de uma maneira que não danifique o meio ambiente de forma que as futuras gerações não possam satisfazer suas próprias necessidades.

⁹ Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia.

No entanto, o consenso sobre a sustentabilidade da produção é um tanto complicado de alcançar dada a ausência de uma metodologia única, objetiva e comum (MARKEVIČIUS et al., 2010) que contemple as diferenças regionais, tecnológicas e as características próprias de cada cultura energética. De acordo com ELBEHRI *et. al.* (2013) a sustentabilidade ou a ausência dela, mesmo em um contexto localizado tem um impacto global, sendo um desafio estabelecer claramente os limites sobre a sustentabilidade da produção de bicomcombustíveis ao redor do mundo. Uma vez que o consenso é quase impossível de alcançar, muitos debates e questionamentos sobre os critérios e indicadores utilizados para a mensuração da sustentabilidade e sobre as metodologias de análise dos impactos da produção de bicomcombustíveis vêm ocorrendo (ELBEHRI et al, 2013; MARKEVIČIUS et al., 2010).

No intuito de contribuir com a análise da sustentabilidade ambiental da produção de etanol no Brasil este estudo apresentará a seguir discussões relacionadas ao uso da água e a produção de biocomcombustíveis líquidos, mais especificamente o etanol de cana-de-açúcar.

3.2 Considerações sobre o uso da água e a sustentabilidade da produção de etanol combustível

A água é um recurso natural indispensável ao crescimento de qualquer tipo de biomassa, além de essencial a todos os serviços ecossistêmicos e seres vivos. No que diz respeito à produção de biocomcombustíveis líquidos baseados em culturas agrícolas, a água desempenha um papel central, uma vez que é um elemento vital para a etapa de crescimento da biomassa.

Muito se têm discutido sobre critérios de sustentabilidade relacionados ao elemento água por diversos meios, como mesas redondas, grupos de trabalho e publicações que evidenciam este tema. A

Tabela 3 apresenta alguns dos princípios e critérios relacionados ao tema água aos quais a produção de biocomcombustíveis deve atender para que seja sustentável sob o viés ambiental, de acordo com a iniciativa adotada.

Tabela 3: Seleção de alguns princípios e critérios de sustentabilidade relacionados ao tema água de acordo com a iniciativa considerada.

Iniciativa	Princípios	Critérios
Comissão Cramer	1. Na produção e processamento da biomassa a água subterrânea e superficial não pode ser empobrecida, e a qualidade da água deve ser preservada ou melhorada.	1.1 Não deve haver violação das leis e regulamentações nacionais aplicáveis para o manejo de água. 1.2 Na produção e processamento da biomassa, as melhores práticas devem ser aplicadas para preservar e aumentar a qualidade da água subterrânea e superficial. 1.3 Na produção e processamento da biomassa não deve ser feito o uso de água oriunda de fontes não renováveis.
<i>Better Sugarcane Initiative</i>	1 Melhorar continuamente as áreas-chaves do negócio 2. Gerenciar ativamente a biodiversidade e serviços do ecossistema	1.1 Melhorar continuamente o status dos recursos do solo e da água (Indicador: Água líquido de água por unidade-peso de produto) 2.1 Avaliar o impacto de empresas de cana-de-açúcar na biodiversidade e nos serviços do ecossistema (Avaliar o impacto de empresas de cana-de-açúcar na biodiversidade e nos serviços do ecossistema)
Norma para Agricultura Sustentável	1. Conservação de recursos hídricos	1.1 A propriedade agrícola deve executar um programa de conservação de água para fomentar o uso racional do recurso hídrico. 1.2 Toda fonte de água superficial ou subterrânea explorada pela propriedade agrícola deve contar com as respectivas concessões e as autorizações outorgadas pela autoridade legal ou ambiental correspondente. 1.3 As propriedades agrícolas que usam irrigação devem utilizar mecanismos precisos para determinar e demonstrar que o volume de água utilizado e a duração da aplicação não produzem desperdícios ou aplicações excessivas. 1.4 Todas as águas residuárias da propriedade agrícola devem contar com um sistema de tratamento
<i>Roundtable on Sustainable Biofuels</i>	1. A produção dos biocombustíveis deve manter ou otimizar a qualidade e quantidade da água superficiais e subterrâneas e respeitar os direitos formais ou habituais dos recursos hídricos	1.1 A produção de biocombustíveis deve respeitar os direitos de água existentes em locais de comunidades locais e indígenas 1.2 A produção de biocombustíveis deve incluir um plano de manejo de água com objetivos de usar a água eficientemente e manter ou aumentar a qualidade da água utilizadas nas operações 1.3 A produção de biocombustíveis não deve contribuir para o esgotamento das águas superficiais ou subterrâneas além da capacidade de reabastecimento 1.4 A produção de biocombustíveis deverá contribuir para a melhoria ou manutenção da qualidade dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos.
SEBAK	1. Respeito ao meio-ambiente	1.1 Proteção dos recursos hídricos 1.2 Programas para a reutilização de água em procedimentos industriais e para a conservação da qualidade da água

Os princípios e critérios relacionados ao tema água têm como preocupação o comprometimento quantitativo e qualitativo dos recursos hídricos ao longo de toda a cadeia produtiva dos biocombustíveis. Em parte porque a crescente demanda por biocombustíveis leva a uma expansão de áreas para o cultivo das culturas energéticas e, conseqüentemente, ao uso de grandes quantidades de água para o desenvolvimento da biomassa, sobretudo em regiões onde o déficit hídrico é determinante na redução da produtividade e desenvolvimento das culturas. Para exemplificar, o estudo realizado pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC, 2005 *apud* CGEE, 2009) considerando um cenário de expansão da produção de bioetanol no país que examina a hipótese de substituir por bioetanol o volume equivalente a 10% do consumo mundial de gasolina em 2025, apresenta que o potencial de produção máximo de cana no país sem irrigação seria de 18,6 bilhões de toneladas anuais enquanto que com irrigação de salvação seria de 21,1 bilhões de toneladas, considerando uma área de 361,6 Mha.

Segundo a *International Energy Agency* (IEA, 2012), os biocombustíveis serão os grandes responsáveis pelo aumento relativo do consumo de água para a produção de energia em 2035, o que exercerá grande importância como critério de viabilidade de projetos energéticos sustentáveis. Críticas quanto à pressão sobre os recursos hídricos são preconizadas quando da utilização da água em grande escala para a produção de biocombustíveis (BERNDES, 2008; FRAITURE; GIORDANO; LIAO, 2008; GERBENS-LEENES; et.al., 2009), ressaltando a importância do planejamento governamental para a inserção ou expansão de culturas energéticas em diferentes regiões do globo, dada as especificidades territoriais e suas relações com as necessidades hídricas das culturas.

O uso da água ocorre ao longo de toda a cadeia produtiva dos biocombustíveis (FINGERMAN et al., 2010). A Figura 9 apresenta os principais usos da água durante a etapa de produção da biomassa (fase agrícola) e sua conversão (fase industrial) para o etanol de cana-de-açúcar.

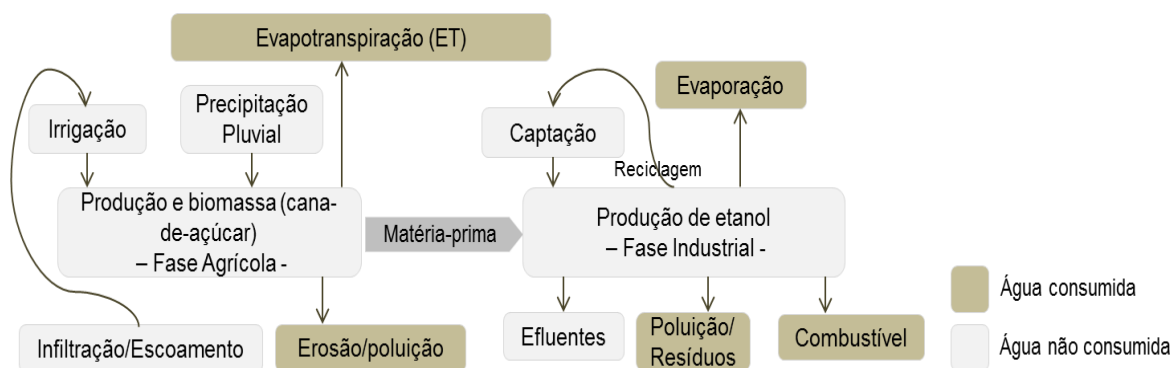


Figura 9: Esquema dos usos da água no ciclo de vida do etanol de cana-de-açúcar. Adaptado de FINGERMAN et al., 2010.

Na fase industrial, o consumo de água e a disposição de efluentes têm diminuído substancialmente nos últimos anos a partir da adoção de práticas sustentáveis pela indústria sucroalcooleira. O uso médio de água, principalmente para a região Centro-Sul do Brasil, é de 21 m³/tc nas usinas e de 15 m³/tc nas destilarias (MACEDO, 2005). Com a racionalização do consumo da água pela indústria sucroalcooleira brasileira (reutilizações; fechamentos de circuitos; mudanças de processo, como a redução da lavagem da cana) a captação tem sido reduzida, chegando próxima a 2 m³/tc. A taxa de descarga de efluentes pode chegar a zero, otimizando tanto a reutilização e o uso de águas servidas na ferti-irrigação (MACEDO, 2005).

Quanto aos impactos na qualidade hídrica estes estão relacionados a descargas de efluentes e ao uso de fertilizantes e químicos pela indústria sucroalcooleira, os quais lixiviam e chegam aos corpos hídricos. A alteração da qualidade das águas é de difícil quantificação e monitoramento uma vez que depende das taxas de aplicação de fertilizantes e de outros químicos (DE LA TORRE UGARTE et al., 2010), das condições geográficas regionais e de práticas agrícolas e industriais que interferem nos processos de poluição dos recursos hídricos. No Brasil uma série de estudos no que diz respeito à lixiviação e possibilidades de contaminação de águas subterrâneas com a vinhaça (composto de nutrientes gerado durante a fase industrial e reciclado como fertilizante) indicam que geralmente não existem impactos danosos para aplicações inferiores a 300 m³/ha (MACEDO, 2005).

Quanto à fase agrícola, esta é a responsável pela maior demanda hídrica da cadeia produtiva dos biocombustíveis, devido a grande quantidade de água evapotranspirada pelas culturas (BERNDES, 2008). Essa perda de água pela evapotranspiração é atendida pela precipitação ou irrigação da cultura. Segundo DOORENBOS e KASSAM (1979) a

necessidade hídrica da cana-de-açúcar é de 1500 a 2500 mm por ciclo vegetativo, variando em função do ciclo da cultura (cana planta, soca ou ressoça), do estágio de desenvolvimento da cultura (ciclo fenológico), das condições climáticas e de outros fatores, como água disponível do solo e variedades utilizadas. Ainda, uma precipitação de 1200 mm anuais bem distribuídos é suficiente para o bom desenvolvimento da cana.

De acordo com GOLDEMBERG; et.al. (2008) o uso da irrigação de cana-de-açúcar é muito pequena no Brasil, sendo realizada principalmente na região Nordeste devido às condições climáticas. A produção de cana é prioritariamente de sequeiro no resto do Brasil.

Segundo (FRAITURE, 2008) o total de água evapotranspirada no planeta por ano para a produção de biocombustíveis está em torno de 100 km³, cerca de 1% do total evapotranspirado por culturas agrícolas (7130 km³) (FRAITURE, 2008). Ainda de acordo com Fraiture (2007), cerca 44 km³ de água por ano é captada para a irrigação de culturas destinadas a produção de biocombustíveis, ou seja, cerca de 2% do total captado para a irrigação (2.630 km³). Isso se traduz em uma média global de 820 litros de água captada para irrigação para produzir 1 litro de biocombustível. Esse valor elevado é devido a grande participação de cana-de-açúcar irrigada no *mix* de matérias-primas.

Em estudo sobre intensidade de água para o transporte de passageiros utilizando diferentes combustíveis, (KING; WEBBER, 2008) concluem que, em geral, combustíveis diretamente derivados de combustíveis fósseis são menos intensivos em água que os derivados diretamente da biomassa, como os biocombustíveis. A intensidade de água (gal H₂O/milha) dos veículos que utilizam biocombustíveis baseados em culturas irrigadas é cerca de 3 vezes maior que os baseado em culturas de sequeiro.

YANG *et al.*(2009) demonstraram que as metas do governo chinês para o aumento dos biocombustíveis em 2020, considerando diferentes culturas energéticas, ocasionará *trade-offs* relacionados aos recursos terra e água, devido à grande quantidade necessária de ambos recursos naturais.

DOMINGUEZ-FAUS *et al.* (2009) demonstraram a grande necessidades hídrica para a produção de biocombustíveis nos EUA e o impacto sobre os aquíferos, como o de Ogallala.

GERBENS-LEENES *et al.* (2009) em estudo sobre a pegada hídrica (m³/GJ) da bioenergia, apresentam a cana-de-açúcar como a terceira cultura com menor pegada hídrica média global de um conjunto de 12 culturas energéticas. Quando comparado os dois principais países produtores de etanol, o Brasil apresentou maior eficiência no uso de

água para a produção de etanol a base de cana-de-açúcar, com um valor de 99 m³/GJ contra 140 m³/GJ para o etanol de milho. No entanto, nos EUA o etanol de cana-de-açúcar apresentou menor eficiência quando comparado com o etanol à base de milho (104 m³/GJ e 78 m³/GJ, respectivamente). Os autores ressaltam que a pegada hídrica da bioenergia mostra uma grande variação, dependendo de 3 fatores: (i) cultura utilizada, (ii) clima no local de produção e (iii) práticas agrícolas.

A cana-de-açúcar é uma cultura muito exigente agronomicamente, demandando grandes quantidades de água para seu consumo. Isso pode tornar sua produção insustentável em regiões que exijam irrigação, sobretudo em regiões onde possa ocorrer competição dos recursos hídricos com culturas alimentares, problemas de escassez e conflitos pelo uso da água (ELBEHRI *et al*, 2013).

Apesar dos estudos mencionados acima associarem a produção de cana-de-açúcar no Brasil à reduzida captação de água para irrigação, isso não necessariamente reflete o que ocorre em áreas de expansão da cultura. A expansão da cana para áreas como Centro-Oeste do país que apresentam além de períodos com déficit hídrico bacias hidrográficas com conflitos relacionados aos usos da água pode desencadear um aumento na pressão hídrica da produção de etanol brasileiro e o não atendimento de critérios de sustentabilidade da produção de biocombustíveis.

Grande parte da área para o cultivo futuro da cana-de-açúcar ocorrerá em áreas de pastagens degradadas, principalmente na região Centro-Oeste onde é necessária a utilização da irrigação da cana-de-açúcar tanto de salvamento¹⁰ como complementar¹¹ (MANZATTO, 2009) o que pode representar uma ameaça (CGEE, 2009) a sustentabilidade da produção de etanol combustível. O uso de irrigação e pesquisas por variedades com maior resposta a este manejo agrícola visam, além de permitir o cultivo da cana em terras marginais devido a condições de déficit hídrico, também alcançar alto rendimento e aumentar longevidade de plantas (SILVA *et al.*, 2013).

Atualmente a cultura com mais área irrigada no país é a da cana-de-açúcar, cerca de 1,7 milhão de hectares (MIN, 2013) e a tendência é de aumento dessa área. A Política Nacional de Irrigação sancionada em janeiro de 2013 (BRASIL, 2013) reforça esta tendência uma vez que incentiva a ampliação da área irrigada e o aumento da

¹⁰ Irrigação de salvamento: Neste tipo de manejo planeja-se irrigar somente num período relativamente curto ou em um estágio do cultivo. Exemplo típico ocorre quando se aplica a vinhaça.

¹¹ Irrigação suplementar: Neste tipo de manejo parte da água vem da irrigação e parte vem da precipitação efetiva, ou seja, a irrigação suplementará a precipitação efetiva no atendimento da demanda evapotranspirométrica da cultura.

produtividade das culturas agrícolas de forma a contribuir para o abastecimento do mercado interno de alimentos, de fibras e de energia renovável, o que inclui os biocombustíveis líquidos. O setor sucroalcooleiro já lidera a demanda pelos incentivos fiscais concedidos pelo governo federal às empresas nos investimentos em irrigação do Ministério da Integração Nacional por meio da adesão ao Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura (REIDI). Dos 11 projetos analisados até a presente data 9 são do setor sucroenergético, sendo destes, 2 projetos localizados em SP, 2 em GO e 5 em MG, totalizando cerca de 30.000 ha de área irrigada (BRASIL, s/d). Dados mostrando a evolução histórica de áreas de cana-de-açúcar irrigada por região não são fáceis de obter, sendo verificado o IBGE como principal provedor de dados e informações. O censo agropecuário de 2006 (IBGE, 2006) apresenta informações para este ano civil discriminando o método de irrigação utilizado, conforme apresentado na Tabela 4. Observa-se que as regiões com maiores extensões de áreas com cana irrigada são as regiões Sudeste, Nordeste e Centro-Oeste, respectivamente, sendo o método mais utilizado o por aspersão. Importante ressaltar que a região Centro-Oeste a partir do ano de 2011 ultrapassa a região Nordeste em área cultivada com cana - cerca de 1,4 milhão de hectares contra cerca de 1,2 milhão de hectares, respectivamente - (IBGE, s/d), o que pode incorrer na alteração do *ranking* das regiões com maiores áreas de cana irrigada no Brasil, com o segundo lugar sendo ocupado pela região Centro-Oeste.

Tabela 4: Área de cana-de-açúcar (ha) com uso de irrigação e método utilizado no Brasil e grandes regiões no ano de 2006.

Brasil e Grandes Regiões	Área irrigada (ha) de acordo com o método de irrigação			
	Total	Aspersão (pivô central)	Aspersão (outros métodos)	Outros métodos
Brasil	1.071.349	266.063	705.780	99.506
Sudeste	487.846	93.235	357.323	37.289
Nordeste	341.932	112.448	191.481	38.003
Centro-Oeste	202.987	54.058	125.337	23.591
Sul	32.116	3.522	28.133	458
Norte	6.469	0	3.505	156

Todos esses indicativos levam a questionamentos sobre a sustentabilidade da produção de cana-de-açúcar destinada à produção de etanol em bacias hidrográficas onde a expansão da cultura ocorre, como as bacias do Centro-Oeste brasileiro: a produção de

cana nestas regiões exercerá pressão sobre os recursos hídricos podendo acarretar no não atendimento de critérios de sustentabilidade?

Importante destacar que uma questão chave para o planejamento e gestão sustentável da produção de biocombustíveis é que o elemento água não está dissociado dos elementos terra e clima. Assim, uma análise que integre estas variáveis é a mais indicada para se obter uma visão holística de um sistema de produção sustentável de biocombustíveis. De acordo com (BAZILIAN et al., 2011) a não integração de temas como energia, uso do solo, água e alimentos das áreas de produção de bioenergia resulta em políticas e regulamentos que, muitas vezes, inadvertidamente criam sinais sub-ótimos para a segurança nacional, para economia e meio ambiente.

Assim, a adoção de abordagens que resultem num melhor entendimento das interligações do tema água como os temas terra, clima com as políticas de incentivo de produção de biocombustíveis é necessária para identificar padrões insustentáveis de produção. Estas abordagens que contemplam uma análise integrada vêm sendo mais intensamente discutidas e implementadas nas avaliações dos impactos da produção de bioenergia (Abordagem Nexus¹²). Metodologias que contemplem este tipo de abordagem, como a metodologia Nexus Energia-Água-Clima-Uso da Terra (NECAT)¹³ são apropriadas para a análise dos impactos ambientais de estratégias governamentais relacionadas à produção de biocombustíveis uma vez que as ações definidas por estas estratégias interferem no uso e ocupação do solo (substituição de culturas alimentares), nos usos da água (necessidade de irrigação de culturas energéticas) e ainda, podem sofrer interferências das alterações climáticas globais (alterações de temperatura e precipitação nas áreas de cultivo).

O estudo de caso apresentado no Capítulo 4 analisará a produção de cana-de-açúcar e potenciais impactos sobre os recursos hídricos na bacia do rio Paranaíba, importante bacia do ponto de vista energético (diversas hidroelétricas e usinas produtoras de etanol) e do ponto de vista agrícola (produção de culturas alimentares).

Localizada na região Centro-Oeste do Brasil, a bacia hidrográfica do rio Paranaíba vem sofrendo alterações no uso do solo devidas a franca expansão da agricultura, sobretudo associada à indústria sucroalcooleira (Figura 10), com a cultura da cana substituindo principalmente áreas de pastagens e lavouras de soja e milho (ANA, 2013).

¹² *Water, Energy and Food Security Nexus* (Stockholm Environment Institute)

¹³ NECAT, do inglês *Climate- Land Use-Energy- Water* (CLEW)

De grande relevância para a gestão dos recursos hídricos desta bacia é a agricultura irrigada, não só pela extensa área ocupada por esse uso, mas também pela importância econômica e estratégica da produção. Vale destacar que somente a partir da década de 60, com a adoção das técnicas de modernização agrícola é que se inicia um processo de aproveitamento intensivo do cerrado, até então considerado impróprio para o uso agrícola. Num primeiro momento esse aproveitamento se dá no período úmido, entretanto, em pouco tempo se introduz a irrigação, tornando a área de estudo um dos maiores polos de agricultura irrigada do país (ANA, 2013).

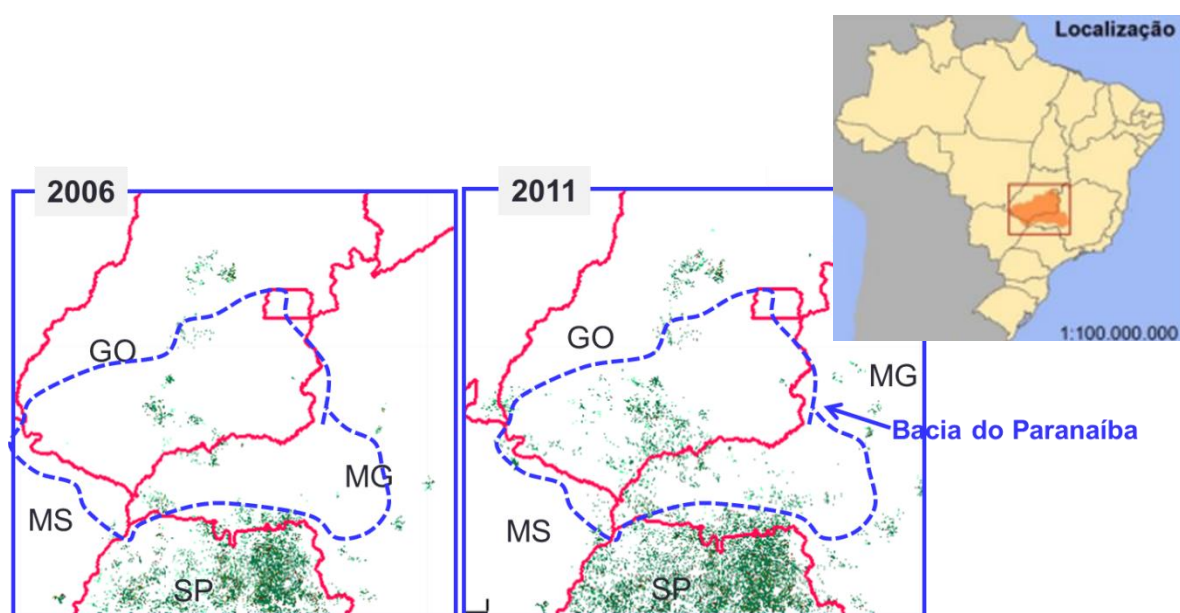


Figura 10: Comparativo de áreas cultivadas com cana-de-açúcar, com destaque para a bacia do rio Paranaíba, nos anos de 2006 e 2011. Fonte: CANASAT, s/d.

Capítulo 4: Estudo de Caso: Produção de Etanol de Cana-de-açúcar e Impactos sobre os Recursos Hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba

4.1 Caracterização da Área de Estudo

A escolha da bacia hidrográfica do rio Paranaíba como unidade de análise valeu-se de um contexto propício: a crescente demanda interna e externa por etanol de cana-de-açúcar brasileiro; a expansão da cultura de cana para o Centro-Oeste do país, região onde se localiza a bacia do rio Paranaíba; adoção do manejo de irrigação da cultura de cana na bacia do rio Paranaíba¹⁴; a importância da bacia do rio Paranaíba para os setores agrícola e energético; a conclusão e aprovação do Plano de Recursos Hídricos da bacia do rio Paranaíba (PRH Paranaíba)¹⁵ no ano de 2013, o que possibilitou a coleta de dados e informações para a construção deste capítulo.

A bacia do rio Paranaíba é a segunda maior unidade da região hidrográfica do Paraná, sendo que esta região apresenta cerca de 30% das demandas nacionais por água de usos consuntivos, mas possui menos que 7% da disponibilidade hídrica do Brasil evidenciando potenciais situações de escassez ou conflitos entre usos múltiplos da água.

Localizada na região central do Brasil, a bacia do rio Paranaíba correspondendo a uma área de drenagem de 222.767 km², abrangendo parte dos estados de Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e do Distrito Federal. (Figura 11).

¹⁴ Em contato por correio eletrônico com funcionário da Agência Nacional das Águas, no início do ano de 2012, foi informada a prática de irrigação da cultura de cana na bacia do rio Paranaíba com aplicação de lâminas de irrigação bastante variáveis, sendo a proporção de cana irrigada *versus* cana de sequeiro incerta.

¹⁵ O Plano de Recursos Hídricos (PRH) é um instrumento que estabelece as ações de proteção e recuperação de uma bacia hidrográfica e o controle sobre os usos da água. Os PRHs são concebidos para o país, para os estados e para as bacias hidrográficas. Para uma bacia hidrográfica, o Plano estabelece a política de água na bacia, orientando os usos da água e definindo as prioridades de ação do Comitê de Bacia.

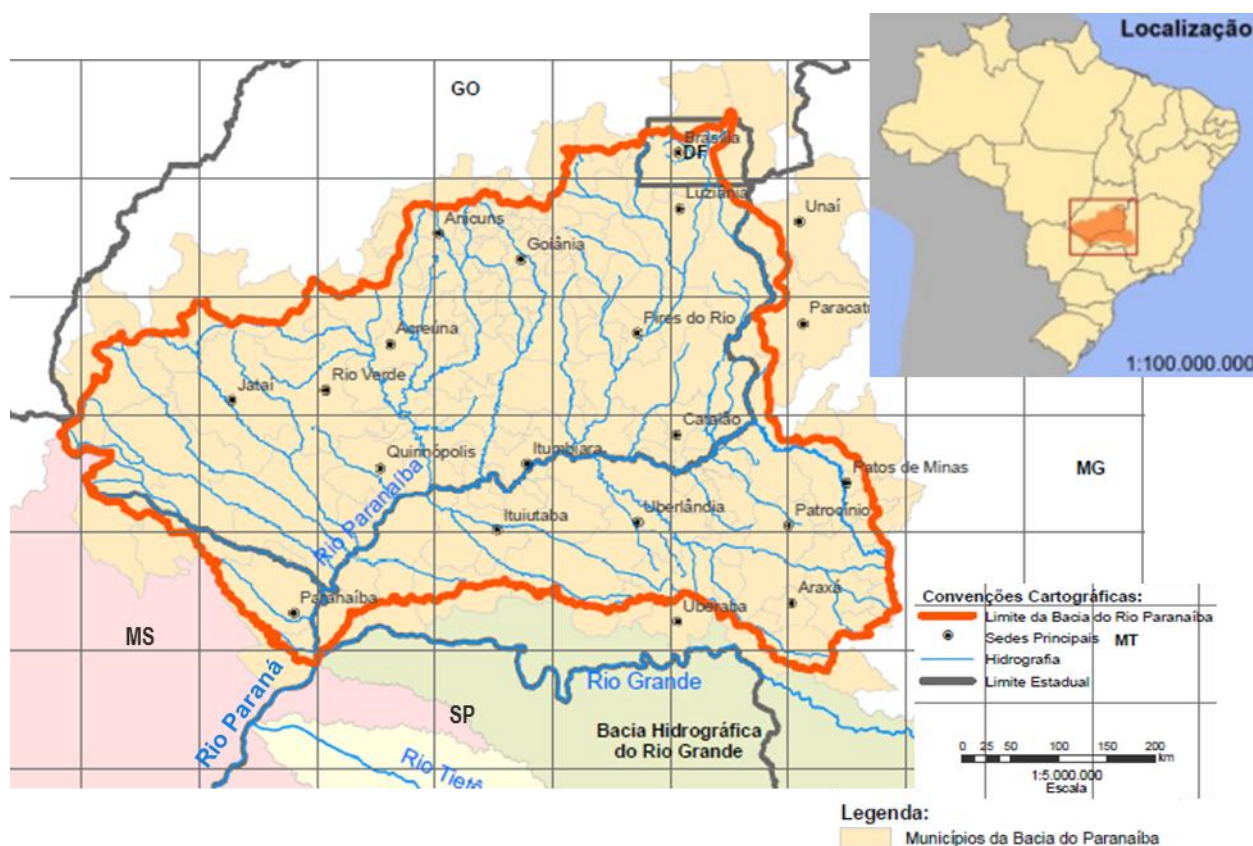


Figura 11: Figura: Região Hidrográfica do Paraná (foto menor) e Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba. Fonte: ANA, 2013.

A bacia possui 197 municípios, além do Distrito Federal. Destes, 28 sedes municipais se encontram fora dos limites da bacia (Tabela 5).

Tabela 5: Área e número de municípios por Unidade da Federação (UF) pertencentes à bacia do rio Paranaíba.

UF	Área total da UF na Bacia		Área da Bacia na UF	Nº de municípios constituintes da Bacia
	km ²	%	%	
GO	140.832,294	41,41	63,27	137
MG	70.502,860	12,02	31,67	56
Distrito Federal	3.665,426	63,18	1,65	1
MS	7.591,929	2,13	3,41	4

Fonte: ANA, 2013.

O clima na região é tropical quente em todas as estações do ano com inverno seco (classificação climática de Köppen tipo Aw). O valor médio anual das precipitações está em torno de 1.500 mm, apresentando pouca variação. As variações dos totais das precipitações médias mensais ficam entre 0 e 400 mm, sendo que há uma marcante sazonalidade que separa os meses secos (maio a setembro), onde os valores estão

próximos de zero, e os meses úmidos (outubro a abril), onde as precipitações variam de 100 a 400 mm. A distribuição pluviométrica anual caracteriza a existência de uma estação seca de três meses (maio/junho a agosto). A evapotranspiração anual também apresenta pouca variação, com valores médios para bacia de 915 mm.

Na bacia observa-se a predominância de latossolos. Embora apresentem baixa fertilidade natural, estes solos possuem boas propriedades físicas que, somada a relevos planos e suaves ondulados, favorecem a mecanização agrícola, sendo aptos para a irrigação por aspersão. São profundos, porosos, bem drenados e bem permeáveis.

Com relação à hidrologia, a bacia hidrográfica do rio Paranaíba abrange quatro rios de esfera federal em sua área: o rio Paranaíba, o rio São Marcos, o rio Corumbá e o rio Aporé. O rio Paranaíba, juntamente com o rio Grande, é um dos formadores do rio Paraná. A partir dos municípios de Coromandel/MG e Guarda-Mor/MG, o rio Paranaíba forma a divisa natural de Minas Gerais com Goiás e, já próximo de sua foz, de Minas Gerais com Mato Grosso do Sul.

O rio Paranaíba é de domínio da União, o que significa que a gestão dos recursos hídricos na bacia é compartilhada entre o Governo Federal e os estados de Goiás, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e o Distrito Federal, trazendo com isso uma complexidade particular para os sistemas e instituições envolvidos. Com intuito de contribuir com a organização espacial, a bacia do rio Paranaíba foi dividida em unidades territoriais denominadas Unidades de Planejamento Hídrico (UPH), além das Unidades de Gestão Hídrica (UGH), pré-existentes ao PRH Paranaíba. As UPHs correspondem a bacias e sub-bacias importantes no contexto da bacia definidas segundo fatores hidrográficos (principais rios e afluentes), hidrológicos (presença de estações fluviométricas ou de barramentos que alteram a dinâmica fluvial) e de usos da água (presença de grandes centros urbanos ou de intensa irrigação). As UGHs são representadas pelas divisões hidrográficas estaduais, ou seja, aquelas adotadas pelos estados para a realização da gestão de seus recursos hídricos (Figura 12).

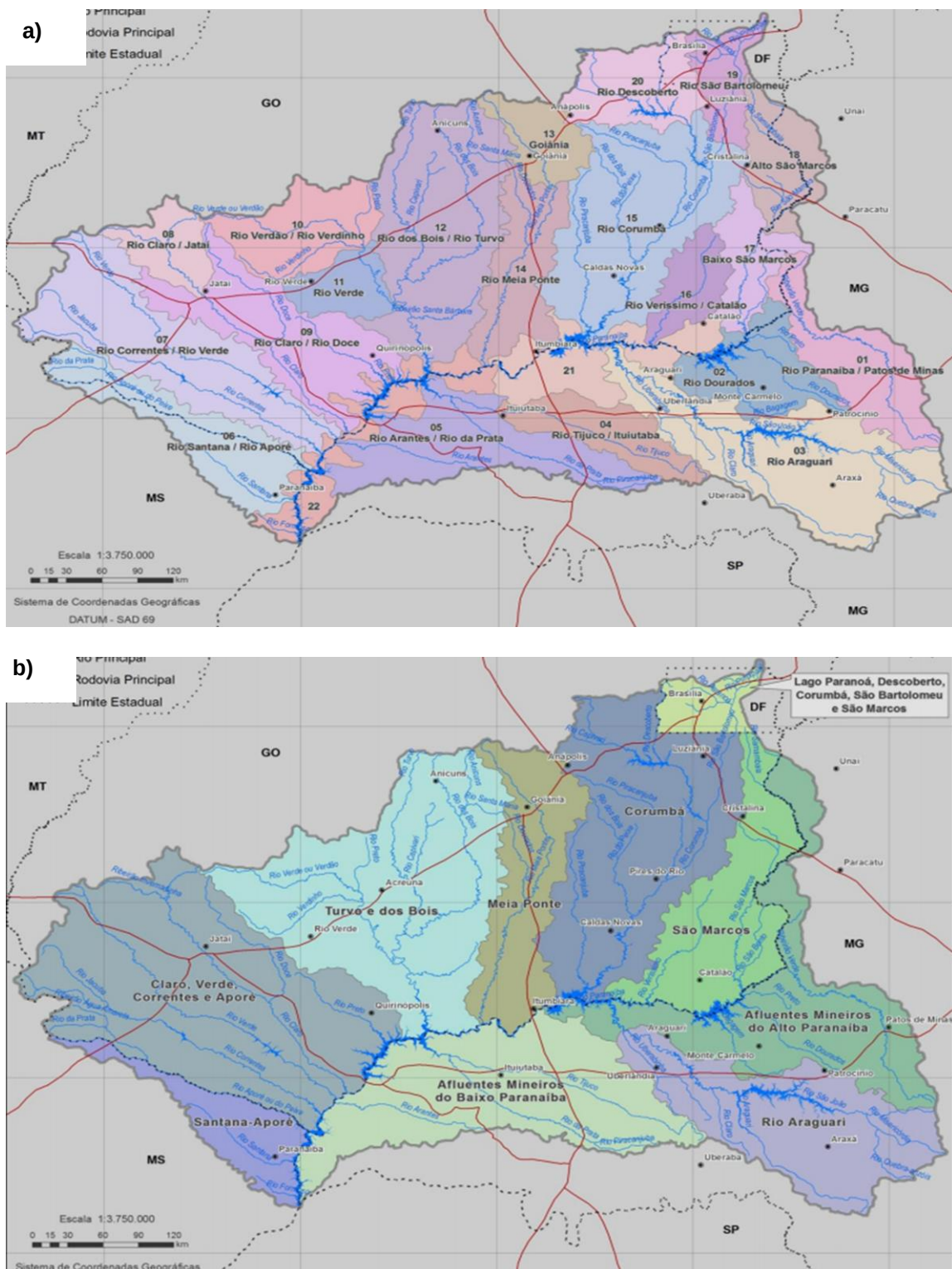


Figura 12: Divisão das (a) Unidades de Planejamento Hídrico (20 unidades) e das (b) Unidades de Gestão Hídrica (10 unidades) da bacia do rio Paranaíba. Fonte: ANA, 2013.

O rio Paranaíba caracterizou-se desde meados do século passado como fundamental para o desenvolvimento do setor elétrico do país. Nele foram construídas grandes hidrelétricas que impactaram de forma definitiva as características físicas e

biológicas do rio, com a regularização das vazões proporcionada pelos reservatórios criados. Atualmente a bioenergia vem crescendo de participação na bacia, associada principalmente à produção de soja e cana-de-açúcar.

A bacia tem no agronegócio e na agroindústria o mais vigoroso vetor de crescimento, com destaque para a pecuária, café e setor sucroalcooleiro. Além disso, grandes áreas com pastagem e cerrado integram os usos e ocupação do solo da bacia (Figura 13).

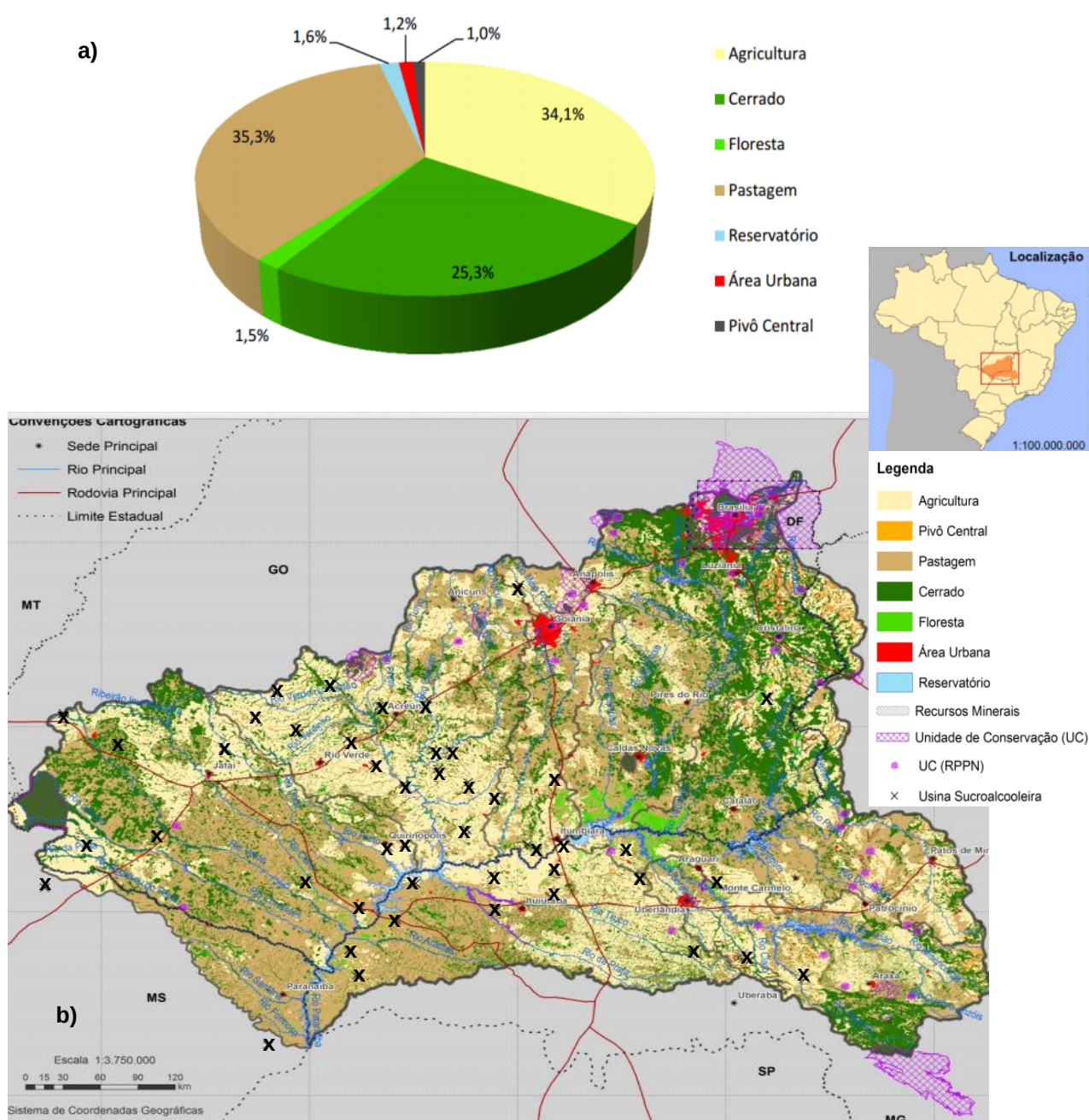


Figura 13: Uso e ocupação do solo (a) relativizado por setor e (b) plotado no mapa para a Bacia do rio Paranaíba. Fonte: ANA, 2013.

As atividades desenvolvidas na bacia resultam em uma demanda crescente por água, sendo atualmente a vazão de retirada para atendimentos dos diversos usos presentes na bacia do rio Paranaíba de 315,9 m³/s, enquanto a vazão de consumo totaliza 211,2 m³/s (66,8% da vazão de retirada). As demandas hídricas da bacia por usuária são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6: Demandas hídricas por usuário na bacia do rio Paranaíba (ano base 2010).

Demandas por usuário	Demanda Captada^a (L/s)	Demanda Consumida^a (L/s)
Abastecimento Humano	29.200,00	6.100,00
Indústria	36.566,2	7.313,2
Pecuária (dessedentação animal)	10.631,6	8.505,3
Mineração	3.252,64	325,3
Agricultura ^b	236.174,50	188.939,6
Total	315.824,94	211.183,40

Fonte: ANA. 2013

Nota: a) A demanda captada corresponde a vazões de retirada dos corpos hídricos, enquanto as vazões de consumo correspondem à água efetivamente consumida, considerando o coeficiente médio de retorno dos diferentes usos.

b) A demanda total captada teve como base a demanda de irrigação das culturas para um período crítico de dois meses (agosto e setembro).

Setorialmente, a atividade agrícola da bacia (irrigação) representa 89,4% da demanda total de consumo, sendo a irrigação por pivô central responsável por metade da demanda de irrigação. A segunda maior demanda de consumo é a dessedentação animal, com participação de 4%, seguida pela indústria (3,5%) e pelo abastecimento humano (2,9%). Grande parte da demanda industrial está relacionada com a agroindústria, e mais especificamente com o setor sucroalcooleiro.

A Figura 14 apresenta a distribuição das demandas de água por UGH, o que permite uma análise comparativa dos setores usuários e, consequentemente, das relações do uso do solo com o uso dos recursos hídricos na bacia.

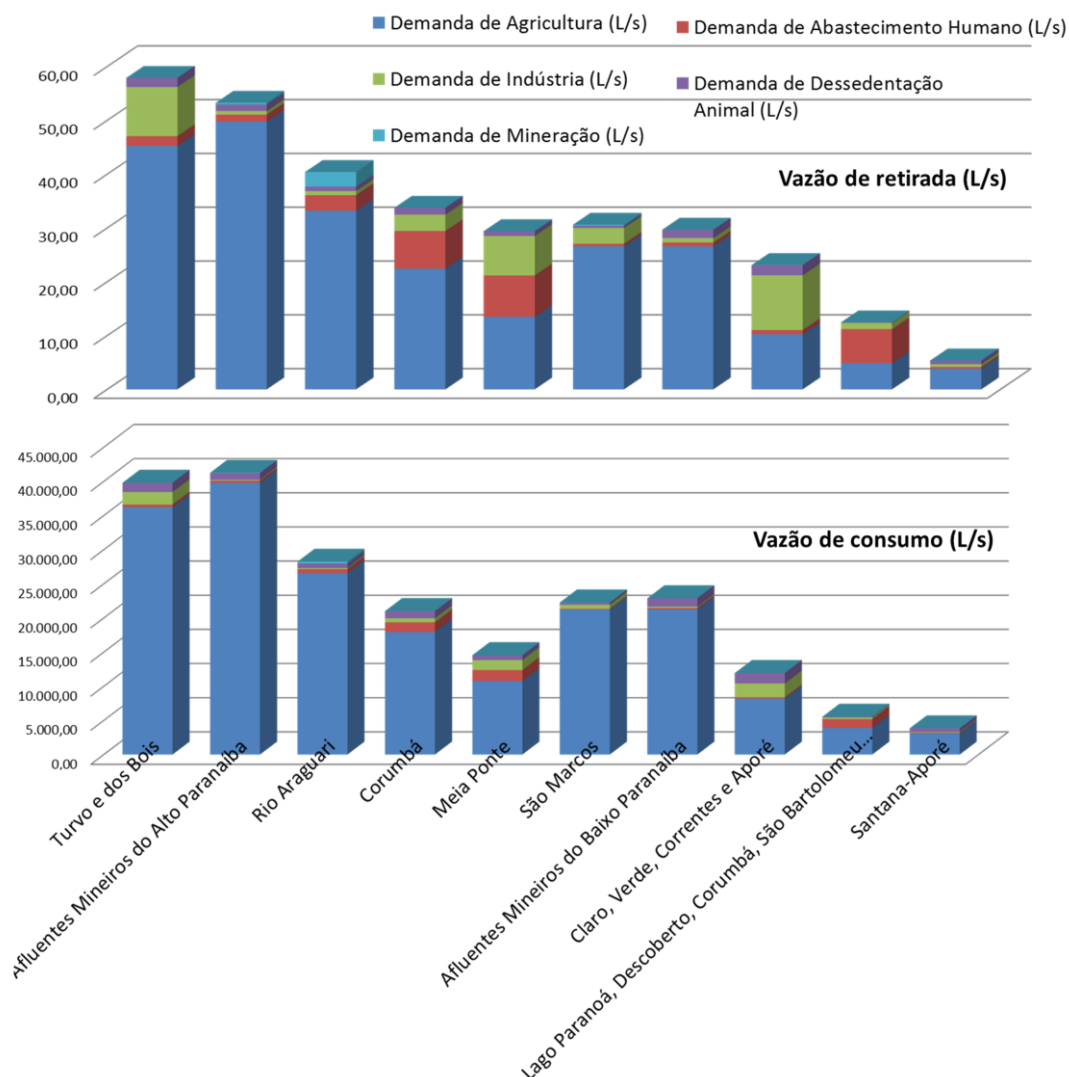


Figura 14: Demandas de retirada e consumo por UGH. Fonte: ANA, 2013.

Dentre as maiores demandas da bacia destacam-se as UGHs Afluentes Mineiros do Alto Paranaíba, Rio Araguari e Turvo e dos Bois. Nestas UGHs as demandas com maiores volumes de captação são as do setor agrícola (irrigação), as quais representam cerca de 40% da demanda total da bacia. Juntamente com a UGH São Marcos, é nestas UGHs que estão localizadas a maior concentração de irrigação por pivô central da Bacia. Além disso, a UGH Turvo e dos Bois é caracterizada pelo intenso cultivo de cana-de-açúcar.

As UGHs Meia Ponte e Lago Paranoá/Descoberto/Corumbá/São Bartolomeu/São Marcos abrigam 53% da população total da bacia, resultando em uma concentração das demandas para abastecimento humano que totalizam 14,1 m³/s (vazão de retirada), equivalente a 48,1% da demanda total da bacia para este fim.

As UGHs Claro, Verde, Correntes e Aporé, Turvo e dos Bois e Meia Ponte são responsáveis por 72,8% das demandas de retirada do setor industrial.

No aspecto agroindustrial, nas UGHs Turvo e dos Bois e Afluentes Mineiros do Baixo Paranaíba estão concentradas a maior parte das 49 usinas sucroalcooleiras em operação da bacia do rio Paranaíba. Há ainda cerca de 30 novas unidades em projeto na bacia (UDOP, 2011), a maior parte localizada nas proximidades das usinas já instaladas. Além do uso da água em áreas irrigadas adjacentes, as usinas utilizam o recurso nos seus processos industriais, muitas vezes não sendo possível distinguir nas outorgas de direito de uso dos recursos hídricos para qual finalidade (irrigação ou industrial) a concessão foi feita.

A área plantada com a cultura de cana-de-açúcar na bacia do rio Paranaíba vem crescendo ao longo da última década. Nos Estados de MG e GO entre os anos de 2000 e 2010 a taxa de crescimento da cultura de cana foi de cerca de 207%, mostrando a forte expansão da cultura na bacia. O uso agrícola na bacia está relacionado principalmente aos cultivos de soja, café, milho, feijão e cana-de-açúcar. Além da cana, a cultura de soja também apresenta taxa crescente de expansão de área plantada na bacia. Para as outras culturas é observada a redução da área plantada ou a estabilização (Figura 15).

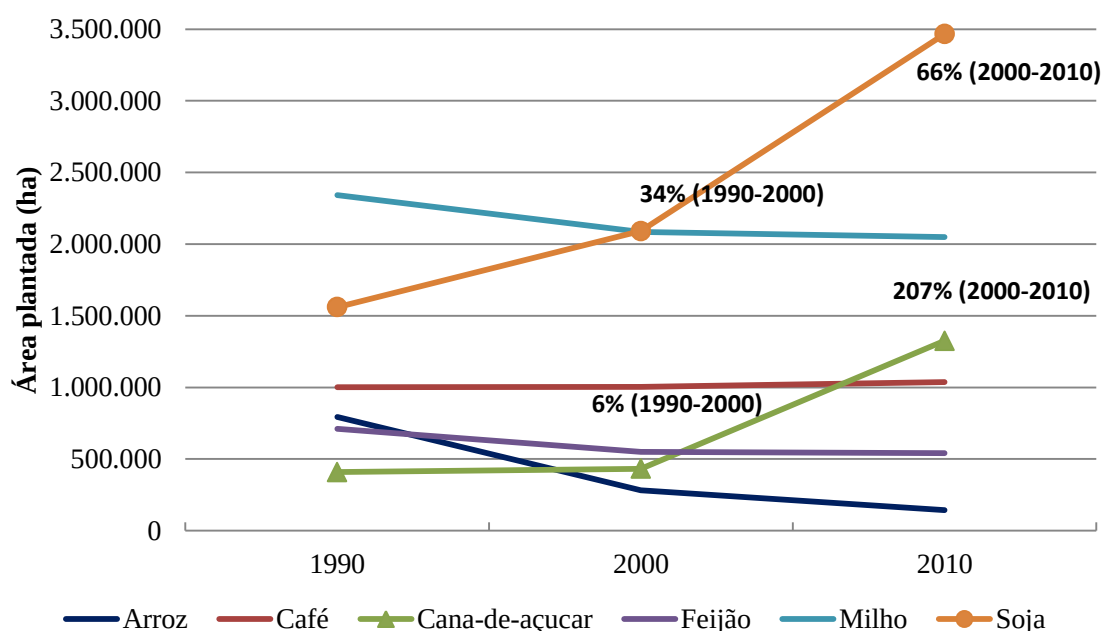


Figura 15: Área plantada (ha) das principais culturas agrícolas em GO e MG e taxas decenais de crescimento da área plantada de soja e cana-de-açúcar. Fonte: IBGE, s/d.

De acordo com o PRH Paranaíba (ANA, 2013) observa-se uma tendência de avanço da cana sobre áreas de pastagens e de outras lavouras, como soja e milho. As maiores áreas de expansão da cana estão localizadas principalmente no sul goiano (afluentes goianos do baixo Paranaíba e nas bacias dos rios Turvo e dos Bois) e no Triângulo Mineiro (bacias dos afluentes Mineiros do baixo e alto Paranaíba e do rio Aráguari).

Ainda, o PRH *apud* EPE (2006) descreve como consequência do crescimento da agricultura moderna na bacia o aumento do já existente processo de degradação do cerrado, além deste acrescentar outros fatores de pressão aos meios naturais: uso intensivo da água para irrigação e o risco de contaminação dos solos, águas superficiais e lenço freático por agrotóxicos.

4.2 Metodologia utilizada para a avaliação de impactos sobre os recursos hídricos pela produção de cana-de-açúcar destinada ao processamento de etanol na bacia do rio Paranaíba

A produção de culturas para processamento de biocombustíveis líquidos requer o uso de água. A expansão de culturas agrícolas, como a cana-de-açúcar, em regiões com déficit hídrico exigirá irrigação da cultura para garantir uma produção rentável o que poderá implicar em pressões sobre os recursos hídricos existentes.

Considerando a abordagem NECAT como norteadora deste estudo, foi selecionado o indicador pegada hídrica (HOEKSTRA, A.Y., et al, 2011) para analisar a apropriação de água da produção de etanol de cana-de-açúcar na bacia do rio Paranaíba e os potenciais impactos da produção de cana-de-açúcar sobre recursos hídricos.

A pegada hídrica é utilizada como uma medida volumétrica de consumo e poluição da água ao longo da cadeia produtiva de um produto, ou para um processo ou para consumidores específicos. Considerando uma bacia hidrográfica tanto o fluxo evaporativo como o escoamento podem ser apropriados pelo homem. A pegada hídrica verde se refere ao uso humano do fluxo que se evapora da superfície terrestre resultado, em sua maior parte, do cultivo agrícola ou da produção florestal. A pegada hídrica azul se refere ao uso consuntivo do fluxo de escoamento, isto é, a captação do escoamento da bacia na medida em que este fluxo não retorna à bacia na forma de vazão de retorno. Já a pegada hídrica cinza mostra a apropriação da capacidade de assimilação de efluentes. É

definida como o volume de água necessário para assimilar os efluentes, quantificado como o volume de água necessário para diluir os poluentes de tal forma que a qualidade da água permaneça dentro dos padrões de qualidade baseados nas concentrações em condições naturais e nos padrões ambientais existentes (HOEKSTRA, A.Y., et al, 2011).

Este indicador permite medir a quantidade de água utilizada e sua fonte (água verde, azul ou cinza) durante a etapa de produção de bioenergia que exige mais deste recurso - a fase agrícola - e informa sobre a eficiência do uso da água na produção de biocombustíveis na região alvo estudo, neste caso, na bacia do rio Paranaíba.

Importante destacar que por ser considerado um indicador geográfica e temporalmente explícito, a pegada hídrica pode gerar informações relacionadas à abordagem Nexus Água -Energia-Clima-Uso da Terra. Por exemplo, é possível relacionar este indicador a outros (GBEP, 2011) como: i) emissões de GEE, uma vez que o uso da água para irrigação esta relacionado com emissões da utilização de energia pelos equipamentos de irrigação; ii) capacidade produtiva da terra e dos ecossistemas, uma vez que o excesso de retirada de água pode afetar a qualidade da terra e do solo; iii) diversidade biológica, uma vez que a produção de biocombustíveis pode competir por água com a vegetação natural em uma bacia hidrográfica; iv) preço e fornecimento de uma cesta básica nacional, pois a bioenergia pode competir com a produção de alimentos pelo uso da água; iv) disponibilidade e eficiências no uso de recursos na produção, conversão, distribuição e uso final de bioenergia, uma vez que a água é um recurso natural importante, cuja disponibilidade e eficiência do uso devem ser considerados em conjunto com outros recursos, como terra; v) viabilidade econômica e competitividade da bioenergia, uma vez que a produção de bioenergia não será viável se as suas necessidades de água não podem ser satisfeitas economicamente; e vi) segurança energética/diversificação de fontes e oferta, uma vez que a escassez de água pode atrapalhar o fornecimento de energia se houver uma forte dependência da matérias-primas de bioenergia e elevados requisitos de água.

Para a estimativa das evapotranspirações azul e verde durante o crescimento da cultura de cana foram analisados modelos baseados no balanço hídrico do sistema a partir de informações de entrada (precipitação e irrigação) e saída de volumes de água (evapotranspiração). Primeiramente foi analisada a ferramenta Sistema de Avaliação e Planejamento Hídrico, conhecido como WEAP (do inglês "Water Evaluation And Planning" system). Esse modelo, desenvolvido pelo *Stockholm Environment Institute's U.S. Center*, é capaz de integrar o planejamento e a gestão de recursos hídricos tanto

municipal quanto rural em uma ampla escala espacial e temporal. Por meio do WEAP é possível simular, a partir de cenários de oferta e demanda de água, políticas de governo, prioridades e preferências para alocação dos recursos hídricos. O modelo exige a entrada de informações. Este modelo exige dados de entrada como demanda de água por usuário, variações mensais de demanda e disponibilidade hídrica, informações de pontos de captação de água e retorno de efluentes.

Também foi analisado o modelo CROPWAT 8.0 desenvolvido pela Divisão de Terras e Desenvolvimento das Águas da FAO (FAO, 2003), o qual é utilizado para o planejamento e o manejo de irrigação. Suas funções básicas inclui o cálculo da evapotranspiração de referência (ET_o), das necessidades hídricas das culturas, da precipitação efetiva e o planejamento e manejo de irrigação. A grande finalidade do uso do CROPWAT 8.0 é calcular a demanda e a necessidade de água requerida para diversas culturas, permitindo distinguir entre a entrada de água via precipitação (água verde) e via irrigação (água azul). Para isso os cálculos são baseados nas variáveis solo, clima e características da cultura. Todos os cálculos realizados pelo Cropwat 8.0 são baseados em duas publicações da própria FAO: "*Crop Evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements*"¹⁶ e "*Yield response to water*"¹⁷. Esse modelo permite acessar bancos de dados com informações climáticas, pedológicas e de culturas agrícolas, possibilitando a determinação das necessidades de água da cultura de forma rápida.

Para este estudo, foi selecionado o modelo CROPWAT 8.0. Isto porque para atingir o objetivo deste trabalho não é necessário, neste momento, uma análise mais detalhada e com exigência de maiores informações sobre a gestão dos usos da bacia, ou seja, com informações desagregadas por sub-bacias relacionadas a pontos de captação de água, demanda por usuário e prioridades de alocação. Por permitir distinguir entre a entrada de água via precipitação (água verde) e via irrigação (água azul), informações necessárias para a construção do indicador pegada hídrica, o CROPWAT 8.0 se mostrou mais eficiente.

A necessidade hídrica de qualquer cultura está relacionada com a evapotranspiração, que corresponde à quantidade de água que passa para a atmosfera em forma de vapor pela evaporação do solo e pela transpiração das plantas. Embora os

¹⁶ Allen R.G., Pereira L.S., Raes D. & Smith m. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56.

¹⁷ Doorenbos, J. & Kassam, A.H. 1979. Yield response to Water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33. Rome, FAO.

valores para evapotranspiração e necessidade hídrica da cultura sejam idênticos, o primeiro refere-se à quantidade de água que é perdida através da evapotranspiração, enquanto o segundo se refere à necessidade de água que deve ser fornecida à cultura.

Parâmetros meteorológicos; características da planta; estádios fenológicos; tipos de manejo e aspectos ambientais são fatores que afetam a evapotranspiração de uma cultura, logo sua necessidade hídrica (ALLEN *et. al.*, 1998).

A influência do clima nas necessidades hídricas das culturas é dada pela evapotranspiração de referência (ET_o) - taxa de evapotranspiração de uma superfície de referência, sendo esta uma cultura de referência hipotética com características específicas em condições ótimas de cultivo. O cálculo da evapotranspiração de referência é baseado no método de Penman-Monteith e necessita de dados climáticos tais como temperatura, umidade, radiação e velocidade vento. Este método é atualmente o recomendado pela Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) para o cálculo da evapotranspiração de referência (ALLEN *et. al.*, 1998).

Para o cálculo da evapotranspiração da cultura (ET_c) características específicas da planta são adicionadas ao cálculo através do coeficiente de cultura (K_c). O coeficiente de cultura varia ao longo do período de desenvolvimento da cultura.

Em condições de estresse hídrico, obtém-se a evapotranspiração ajustada da cultura (ET_a), que pode ser menor do que a ET_c devido a condições não ótimas de cultivo. A ET_a é calculada como a evapotranspiração de cultura sob condições ideais (ET_c), multiplicada pelo coeficiente de estresse hídrico (K_s). O coeficiente de estresse K_s descreve o efeito do estresse hídrico na transpiração da cultura.

Os itens a seguir detalham a metodologia e considerações utilizadas para o cálculo da pegada hídrica e sua análise.

4.2.1 Contabilização da pegada hídrica do crescimento de culturas na bacia do Rio Paranaíba

Segundo a ANA (2013) na bacia do rio Paranaíba observa-se que a agricultura está em franca expansão associada, principalmente, à indústria sucroalcooleira que vem substituindo áreas hoje ocupadas por pastagem e cerrado, além das lavouras de milho e soja.

Estas diferentes coberturas do solo podem representar alterações na hidrologia local, resultantes dos diferentes fluxos de água associados à evapotranspiração de cada tipo de cobertura.

Os volumes de água necessários para repor as perdas por evapotranspiração, tanto oriundos pela precipitação (água verde) quanto pela irrigação (água azul), durante o ciclo completo de crescimento das culturas na bacia do rio Paranaíba, foram estimados com o auxílio do modelo CROPWAT 8.0. O cálculo da evapotranspiração de referência no CROPWAT é baseado no método de Penman-Monteith.

Informações sobre solo, clima, características da cultura e informações do manejo de irrigação adotado são necessárias como entrada no modelo CROPWAT 8.0. Neste estudo os dados e variáveis considerados para a corrida no CROPWAT e cálculo da pegada hídrica das culturas agrícolas são apresentados na Tabela 7. A Figura 16 apresenta um esquema da metodologia utilizada.

Tabela 7: Dados e variáveis considerados para o cálculo da pegada hídrica do crescimento de culturas na Bacia do Rio Paranaíba.

Dados	Variáveis consideradas	Referência
Parâmetros da cultura e manejo	Coeficiente da cultura (Kc) Cana-de-açúcar: (0,4 – 1,25 – 0,75)* (0,4 – 1,20 – 0,60) Milho: (0,30 – 1,20 – 0,35) Soja: (0,40 – 1,15 – 0,50)	(Allen <i>et. al.</i> ,1998) * Valores adotados para a bacia do Paranaíba (SEMARH, 2012)
	Calendário de plantio e colheita para a região Centro-Sul	CONAB, 2012
	Fração média da produção de cana destinada à produção de etanol no Brasil (55%)	CONAB, 2012
	Produtividade média para a bacia do rio Paranaíba: - cana-de-açúcar: 77 t/ha - milho: 4,3 t/ha - soja: 3 t/ha Produtividade média para São Paulo: - cana-de-açúcar: 84 t/ha	IBGE (Média safras 2005/2006 à 2011/2012 para Região Centro-Sul do Brasil e para estado de São Paulo)
	Manejo irrigação: ‘irrigar quando o índice de depleção for crítico’ e ‘recompor o solo até a capacidade de campo’. Método e eficiência da irrigação: 75%	Considerado o método de aspersão - mais utilizado na bacia em análise (ANA, 2004)
	Aplicação de fertilizantes	Banco de dados Fertilizer Use Statistics (FertiStat) da FAO.
Dados de Solo	Capacidade de Água Disponível (CAD)	Base de dados do modelo Cropwat (padrão)
Dados Climáticos	Temperatura máxima e mínima (°C), umidade relativa, velocidade do vento	Banco de dados CLIMWAT 2.0 para CROPWAT (FAO, 2006) e

(km/h), insolação (horas), radiação solar média (MJ/m²/dia), precipitação (mm). Médias mensais de longo prazo.

Para o cálculo da pegada hídrica são utilizados os seguintes dados de saída do modelo CROPWAT:

- Evapotranspiração azul (ET_{azul}) = min (irrigação líquida total, demandas reais de irrigação);
- Evapotranspiração ajustada da cultura (ET_a) = ET_{azul} + Evapotranspiração Verde (ET_{verde}).

Importante ressaltar que para o cálculo da pegada hídrica das culturas analisadas neste estudo foram consideradas condições de irrigação de forma a evitar qualquer estresse hídrico durante todo o período de desenvolvimento da cultura.

Após o cálculo das ET_{azul} e ET_{verde} das culturas (mm/período de crescimento), estes valores são convertidos para m³/ha multiplicando pelo fator 10. A componente verde da pegada hídrica da cultura (PH_{verde}, m³/ton) é calculada como a Demanda Hídrica da Cultura (DHC_{verde}, m³/ha) dividida pela produtividade da cultura (P_{rtv}, ton/ha). A componente azul (PH_{azul}, m³/ton) é calculada de maneira semelhante:

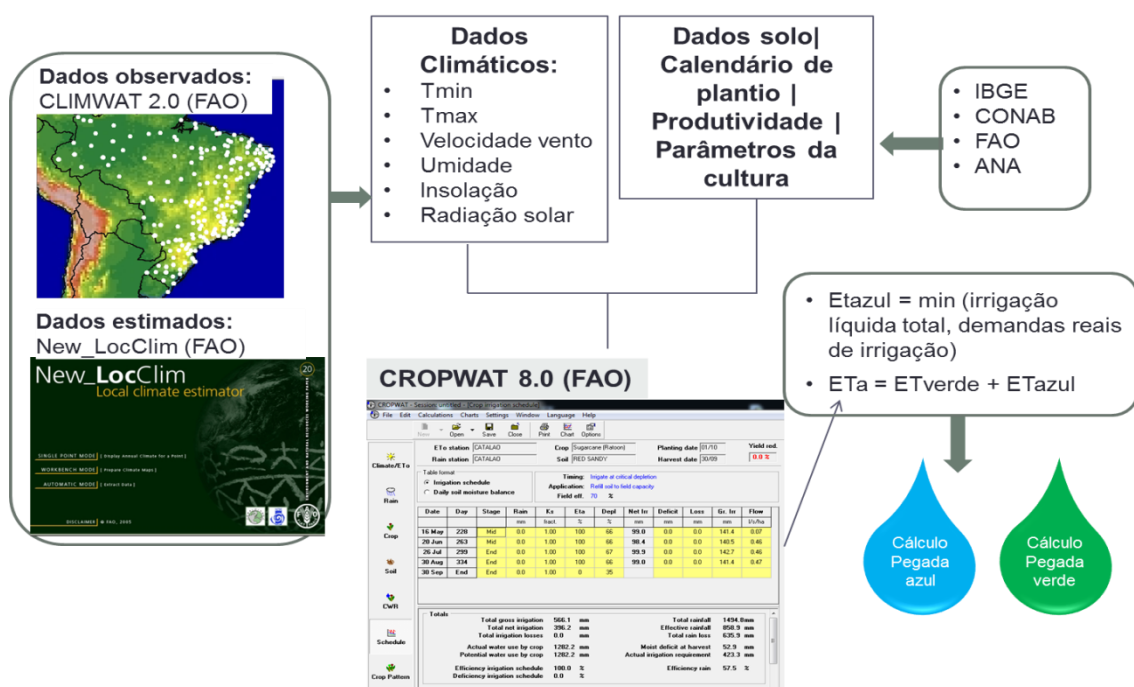


Figura 16: Esquema da metodologia utilizada.

Além das pegadas verde e azul, também foi estimada a pegada cinza da produção de cana-de-açúcar. O setor sucroenergético é reconhecido pelo potencial poluidor das águas na bacia, sendo a prática da aplicação de vinhaça (fertirrigação) largamente utilizada na bacia do rio Paranaíba (ANA, 2013).

A componente cinza da pegada hídrica do processo de uma cultura primária (m^3/ton) é calculada com base na carga de poluentes que é lançada no sistema hídrico (kg/ano), dividida pela diferença entre o padrão de qualidade da água em seu estado natural definido para aquele poluente (a concentração máxima aceitável - c_{max}) e sua concentração natural no corpo de água receptor (c_{nat}). Para o cálculo da pegada cinza foi considerado apenas o uso de nitrogênio, o que levará a uma estimativa conservadora do componente cinza, uma vez que o efeito da aplicação de outros nutrientes, pesticidas e herbicidas no ambiente não foi analisado. Assumiu-se que a quantidade de nitrogênio que atinge os corpos de água correntes seja equivalente a 10% da taxa de fertilizantes aplicada (em $\text{kg}/\text{ha}/\text{ano}$) (Hoekstra e Chapagain, 2008). O volume total necessário de água por tonelada de nitrogênio (N) é calculado com base no volume que é lixiviado ou escoado (t/t) e na concentração máxima permitida nos corpos de água superficiais. Como padrão de qualidade da água em seu estado natural para o nitrogênio, adotou-se o equivalente a 10 mg/litro (medido como N) (WHO, 2006). Esse limite foi utilizado para calcular o volume de água doce necessário para assimilar a carga de poluentes. Por falta de dados adequados, a concentração natural no corpo de água receptor foi considerada igual a zero.

De forma a contemplar a pegada hídrica do processo industrial do processamento do etanol, adotou-se para a produção de 1 litro de etanol uma média de 85 l/tc produzida, (BNDES, 2008) e um valor padrão de $9,1\text{m}^3$ de água captada por tonelada de cana processada¹⁸. Esse valor foi agregado a componente azul da pegada hídrica da fase agrícola.

De forma a gerar informações para uma análise comparativa da pegada hídrica da produção de cana-de-açúcar na bacia do rio Paranaíba com outras regiões do Brasil foi calculada a pegada hídrica da produção de cana-de-açúcar para o estado de São Paulo (maior produtor de cana-de-açúcar do país), considerando as mesmas premissas de manejo de irrigação adotadas para o cálculo da pegada na bacia do rio Paranaíba.

¹⁸ Valor proposto para solicitações de outorga para uso industrial pelo manual técnico de outorga da Superintendência de Recursos Hídricos do governo de GO.

4.2.2 Avaliação da sustentabilidade da pegada hídrica da produção de cana-de-açúcar destinada ao processamento de etanol na bacia do rio Paranaíba

De forma a gerar maiores informações sobre a sustentabilidade da produção de etanol de cana-de-açúcar na bacia do rio Paranaíba, considerando critérios relacionados ao recurso água, foram comparados dados da pegada hídrica da cana-de-açúcar destinada ao processamento de etanol e dados de disponibilidade hídrica superficial na bacia e em UGHs nas quais a expansão da cultura está ocorrendo de forma mais intensa (Turvo e dos Bois; Meia Ponte; Afluentes Mineiros do Baixo Paranaíba e Claro; Verde, Correntes e Aporé). Para o cálculo da pegada hídrica regionalizada, dados de quantidade produzida de cana-de-açúcar por município foram extraídos do IBGE para o ano civil de 2011 e corrigidos por um fator de correção de acordo com a área de cada município inserida na bacia. A parcela da produção de cana-de-açúcar destinada ao processamento de etanol considerada para a bacia e UGHs foi a média brasileira de 55% da produção. As demandas hídricas de retirada e consumo (ANA, 2013), agregando valores estimados no cálculo demanda hídrica para cana-de-açúcar, e as vazões de referência com base no ano de 2010 (ANA, 2013) foram avaliados por meio do balanço hídrico superficial e, posteriormente, relacionados a indicadores de comprometimento dos recursos hídricos. Os indicadores de comprometimento dos recursos hídricos adotados foram (SEMARH, 2012):

- a) Normal: $I < 50\%$

As demandas representam menos do que 50% da disponibilidade hídrica (vazão outorgável) da bacia.

- b) Alerta: $50\% < I < 80\%$

As demandas representam mais que 50% e menos do que 80% da disponibilidade hídrica (vazão outorgável) da bacia.

- c) Moderadamente Crítico: $80\% < I < 100\%$

As demandas representam mais que 80% e menos que 100% da disponibilidade hídrica (vazão outorgável) da bacia.

- d) Altamente Crítico: $I > 100\%$

As demandas hídricas representam mais do que 100% da disponibilidade hídrica (vazão outorgável) da bacia.

O balanço hídrico superficial é uma ferramenta bastante significativa para a verificação de regiões críticas quanto aos seus recursos hídricos. Ele auxilia no conhecimento das condições de oferta e demandas hídricas de diferentes regiões dentro de uma bacia hidrográfica, comparando as demandas hídricas com a disponibilidade hídrica da mesma região de análise. O resultado do balanço hídrico vem de uma relação direta entre demanda e disponibilidade, ou seja, quando o resultado for maior que um significa que naquela região específica a demanda consumida está maior que sua disponibilidade hídrica, identificando a região como um trecho crítico dentro da bacia.

As demandas utilizadas para o balanço hídrico são compostas pelo somatório de todas demandas que captam e consomem recursos hídricos, neste último caso, já descontados os respectivos retornos aos mananciais. As demandas consideradas são: (i) agrícola; (ii) dessedentação animal; (iii) mineração; (iv) industrial e (v) abastecimento público. Para as demandas hídricas de agricultura foi adotada a utilização do valor referente aos dois meses mais críticos (agosto e setembro) (ANA, 2013). Já no caso da disponibilidade hídrica superficial, o valor utilizado refere-se à média anual da vazão de referência.

4.2.3 Avaliação dos impactos da produção de cana-de-açúcar sobre os recursos hídricos da bacia do rio Paranaíba em cenários de expansão de demanda de etanol

Para a avaliação dos impactos da produção de cana-de-açúcar sobre os recursos hídricos da bacia do Paranaíba, considerando cenários de expansão da área plantada para atender as demandas crescentes por etanol combustível considerando o ano de 2022, foram consideradas as taxas de expansão da cultura de acordo com os estudos apresentados na

Tabela 8. Essas taxas foram aplicadas sobre a área plantada de cana-de-açúcar na bacia do Paranaíba em 2011 (IBGE, s/d) considerando a área inserida na bacia dos municípios que a integram. Para o cenário 3 foram consideradas apenas as áreas dos municípios goianos integrantes da bacia do Paranaíba. Além disso, foi considerado o percentual de 67,6% da produção total de cana destinada à produção de etanol em 2022, conforme estudo da Empresa de Pesquisa Energética (MME/EPE, 2012).

Tabela 8: Cenários de expansão da área plantada de cana-de-açúcar em 2022.

Cenários	Unidade referência	Taxa de aumento da área plantada (%)	Período de projeção	Referência	Área de expansão na bacia do Paranaíba (ha)	Área plantada em 2022 na bacia do Paranaíba(ha)
Cenário 1	Brasil	20,4	2011/2012-2021/2022	MAPA, 2012	158.400,64	934.874
Cenário 2	Centro-Oeste Cerrado	138,06	2010/2011-2022/2023	FIESP/ICONE, 2012	883.673,72	1.848.473,41
Cenário 3	GO	41,3	2011/2012-2021/2022	MAPA, 2012	197.813,55	676.780,97

De forma a gerar maiores informações sobre os impactos da produção de etanol de cana-de-açúcar na bacia do rio Paranaíba sobre os recursos hídricos em 2022, foram comparados dados da demanda hídrica para a produção de cana-de-açúcar destinada ao processamento de etanol em 2022 e dados de disponibilidade hídrica superficial (vazão de referência) da bacia no ano civil de 2010 (ANA, 2013). O volume de água demandado para a produção de cana em 2022 foi estimado com base na pegada hídrica da cana-de-açúcar da bacia do Paranaíba (calculada no item 4.2.1) e agregado às demais demandas da bacia do Paranaíba considerando o ano civil de 2010 (ANA, 2013).

As demandas hídricas e as vazões de referência foram avaliadas por meio do balanço hídrico superficial e, posteriormente, relacionados a indicadores de comprometimento dos recursos hídricos, conforme apresentados no item 4.2.2.

4.2.4. Análise de sensibilidade da necessidade hídrica da cultura de cana-de-açúcar na bacia do rio Paranaíba considerando diferentes cenários de mudanças climáticas para o período de 2010-2040

O objetivo desta análise foi verificar o efeito das mudanças climáticas sobre a agricultura, no que diz respeito à necessidade hídrica da cultura de cana-de-açúcar, e os potenciais impactos sobre os recursos hídricos da bacia do rio Paranaíba para o período centrado em 2020. A análise de sensibilidade considerou anomalias nas variáveis climáticas temperatura e precipitação, as quais integram a equação de Penman-Monteith para o cálculo da evapotranspiração de referência. As anomalias nas variáveis climáticas temperatura e precipitação se basearam no estudo de (MARENGO, 2007). Deste estudo,

considerou-se as anomalias resultantes do modelo de circulação geral atmosfera-oceano HadCM3¹⁹, a partir de cenários de emissões de gases de efeito estufa do IPCC-TAR e AR4²⁰: i) cenário de mudança climática resultado de alta emissão de gases de efeito estufa, A2 ou “pessimista”, e ii) cenário de mudança climática resultado de baixa emissão de gases de efeito estufa, B2 ou “otimista”. A variabilidade sazonal das anomalias contemplou dezembro-janeiro-fevereiro (DJF); março-abril-maio (MAM); junho-julho-agosto (JJA); e setembro-outubro-novembro (SON) para o *time slice* de 2010-2040 centrados no ano de 2020.

As anomalias de temperatura para a região de estudo, em ambos os cenários A2 e B2, foram aumentos de 1 °C nos períodos MAM, JJA e SON. Já as anomalias de precipitação foram aumentos de 0,5 mm/dia no período SON e de 1mm/dia no período DJF para o cenário B2 e, para o cenário A2, aumento de 1mm/dia durante o período SON (Figura 17 e Figura 18).

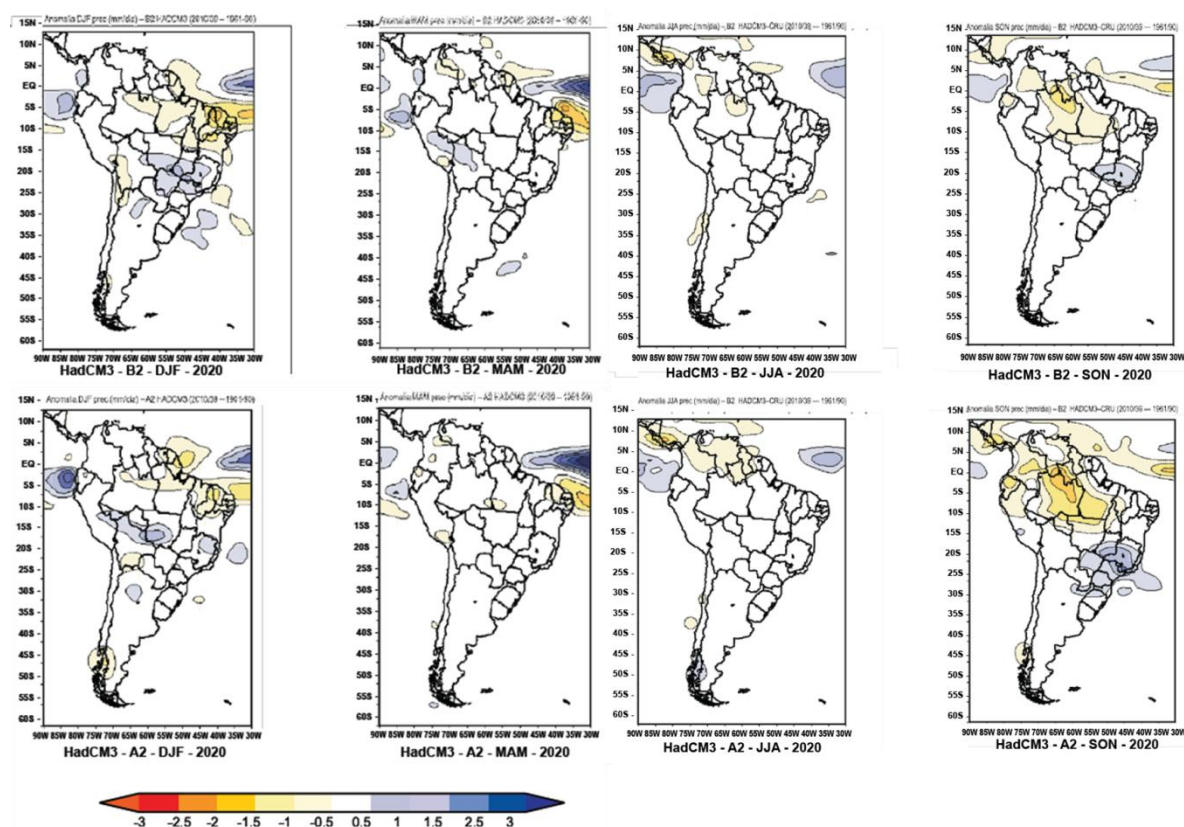


Figura 17: Projeções de anomalias de chuva para DJF, MAM, JJA e SON com referência ao período base 1961-1990 para a América do Sul, nos cenários A2 e B2 pelo modelo HadCM3. O *time-slice* é centrado em 2020. Fonte: MARENGO, 2007.

¹⁹ Hadley Centre Coupled Model, version 3

²⁰ Third Assessment Report (TAR) e Fourth Assessment Report (AR4) do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

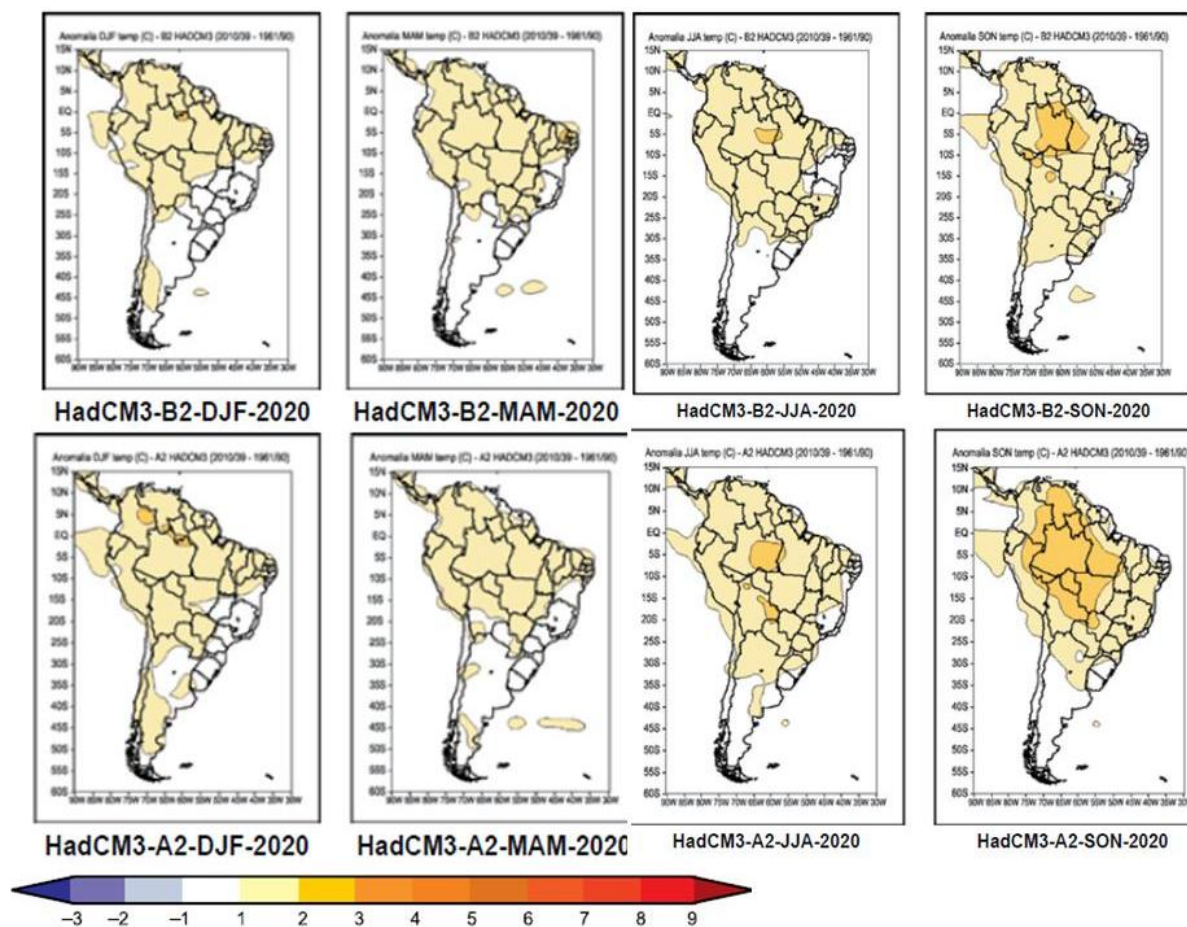


Figura 18: Projeções de anomalias de temperatura para DJF, MAM, JJA e SON em relação ao período base 1961-1990 para a América do Sul, nos cenários A2 e B2 pelo modelo HadCM3. O *time-slice* é centrado em 2020. Fonte: MARENGO, 2007.

Considerando as anomalias de temperatura e precipitação, estas foram agregadas aos dados climáticos observados do período base (1961-1990) adquiridos pela base de dados CLIMWAT para a área de estudo. Após o tratamento dos dados climáticos, estes serviram de *input* para a corrida do modelo CROPWAT, mantendo as demais informações climáticas, dados de produtividade da cultura, dados de solo e características fenológicas da cultura constantes, além do mesmo manejo de irrigação adotado para o cenário base - cenário considerando dados do período base.

Os dados de saída do modelo serviram para o cálculo da pegada hídrica da cana no período centrado em 2020 para os cenários de mudanças climáticas resultantes de diferentes cenários de emissões de GEE – cenários A2 e B2.

4.3 Resultados e discussão do estudo de caso

4.3.1 Contabilização da pegada hídrica do crescimento de culturas na Bacia do Rio Paranaíba

Para o cálculo da pegada hídrica da produção de cana-de-açúcar na Bacia do Rio Paranaíba, o estudo considerou o ciclo completo de crescimento da planta. A pegada hídrica total foi estimada em 251m³ de água por tonelada de cana produzida. Deste montante, 169m³/tc representa a pegada hídrica verde e 82m³/tc representa a pegada hídrica azul, ou seja, o montante de água necessária via irrigação. A pegada hídrica cinza foi contabilizada juntamente com a pegada azul (7m³/tc), já que expressa a poluição da água em termos de volume poluído, podendo ser comparada com o consumo de água (Figura 19).

Uma análise comparativa dos dados estimados para a pegada hídrica azul da produção total de cana-de-açúcar na bacia do rio Paranaíba (5.780 m³/ha) com dados observados de outorgas de direito de uso de água²¹ com finalidade de irrigação da cultura da cana (5.498 m³/ha) nesta bacia, permite inferir que os valores estimados pelo modelo apresentaram forte semelhança com os dados reais, implicando um erro absoluto médio de 282 m³/ha. Importante ressaltar que a outorga representa uma autorização de uso potencial e não de uso efetivamente realizado.

A análise comparativa da pegada hídrica da produção de cana-de-açúcar entre regiões produtoras considerou a pegada hídrica da produção de cana-de-açúcar para o estado de São Paulo, maior produtor de cana-de-açúcar do Brasil. A pegada hídrica foi estimada em 200m³ de água por tonelada de cana produzida. Deste montante, 153m³/tc representa a pegada hídrica verde e 47m³/tc representa a pegada hídrica azul, ou seja, o montante de água necessária via irrigação. A pegada hídrica cinza foi contabilizada juntamente com a pegada azul (7m³/tc), já que expressa a poluição da água em termos de volume poluído, podendo ser comparada com o consumo de água (Figura 19). Vale destacar que para este cálculo foi considerado o manejo de irrigação no modelo CROPWAT “irrigar quando o índice de depleção for crítico” e “recompôr o solo até a capacidade de campo”, o que pode levar a um valor sobrestimado da pegada azul. De toda forma, verifica-se que a pegada azul para a produção de cana-de-açúcar na bacia do rio Paranaíba é quase 2 vezes maior que a pegada azul para produção de cana-de-açúcar

²¹ Dados levantados em outorgas de direito de uso de recursos hídricos da ANA nos anos de 2012 e 2013 para os rios Paranaíba e Grande, com finalidade de irrigação da cultura de cana-de-açúcar, considerando apenas municípios integrantes da Bacia do Rio Paranaíba.

no estado de São Paulo, evidenciando as diferenças regionais dos impactos potenciais sobre os recursos hídricos.

A fim de ilustrar melhor onexo água – energia também foi calculada a eficiência do uso da água na produção de etanol de cana-de-açúcar para a região de estudo. Para a produção de 1 litro de etanol, considerando uma média de 85 l/tc produzida e 9,1m³ de água consumida por tonelada de cana processada nas destilarias (valor adicionado ao cálculo da pegada azul da fase agrícola), pode-se inferir uma pegada hídrica de 139m³/GJ de etanol, sendo 90m³/GJ relativo à água verde (crescimento da biomassa) e 49m³/GJ relativo à água azul (irrigação e consumo industrial) e a água cinza da etapa agrícola. Não foi considerada a pegada cinza da fase industrial (Figura 19). A pegada hídrica para a produção de etanol na bacia do rio Paranaíba está acima da média brasileira apresentado no estudo de (GERBENS-LEENES et al., 2009), de 99 m³/GJ. Possivelmente, isso se deve ao fato da maior parte da produção de cana-de-açúcar no Brasil ocorrer em regime de sequeiro.

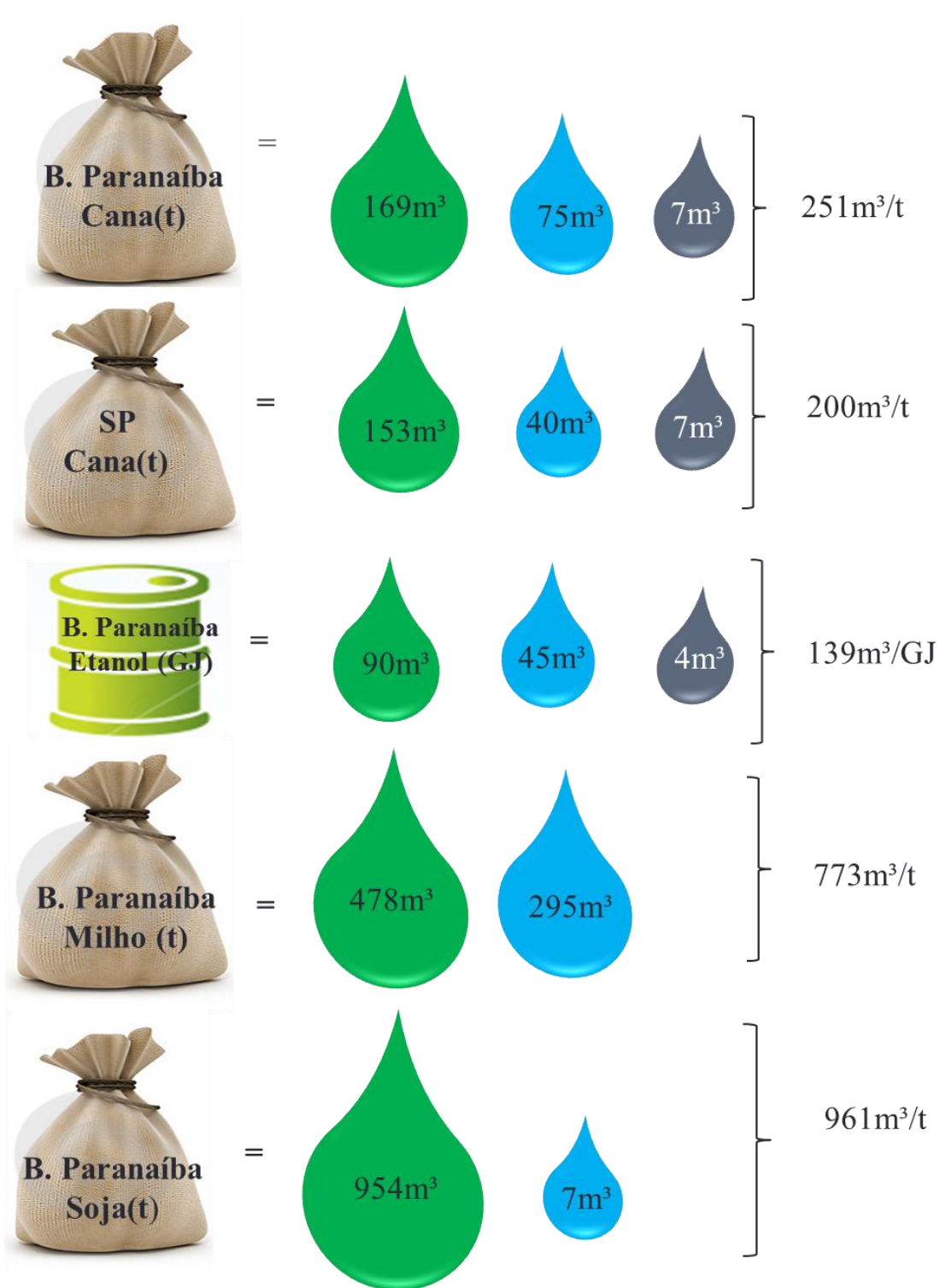


Figura 19: Pegada hídrica (verde, azul e cinza) da produção de cana-de-açúcar (m³/t) na bacia do Paranaíba e São Paulo e da produção de etanol de cana-de-açúcar (m³/GJ). Pegada hídrica (verde e azul) da produção de culturas agrícolas na bacia do Paranaíba.

Os cálculos das pegadas hídricas para as demais culturas agrícolas encontradas na bacia e que apresentam competição por terra com a cultura de cana-de-açúcar estão apresentados na Tabela 9 e na Figura 19.

Tabela 9: Pegada hídrica para diferentes coberturas do solo na bacia do rio Paranaíba.

Cultura	Pegada Hídrica verde + azul (média bacia do Paranaíba) ^a	Pegada Hídrica verde (média para o estado do MT) ^b	Pegada Hídrica verde + azul (média para o Brasil) ^c	Produtividade ^d
	m ³ /t			t/ha
Cana-de-açúcar	243 (168 + 75)	160	127 (122 + 5)	77
Milho	773 (478 + 295)	670	1622 (1621 + 1)	4,3
Soja	961 (954 + 7)	1530	2182 (2181 + 1)	3

^a Resultados do estudo em tela

^b LATHUILLIÈRE et al., 2012

^c MEKONNEN, M.M. e HOEKSTRA, A.Y. (2010)

^d Produtividade média dos anos de 2006 a 2011 para o Centro-Oeste (IBGE) adotada no cálculo da pegada hídrica para o estudo em tela.

Nota: não foi considerada a pegada hídrica para a pastagem, uma vez que sua produtividade é estimada considerando número de cabeça de gado.

De acordo com os dados da Tabela 9 pode-se inferir que o cálculo das pegadas hídricas realizadas por este estudo para a bacia do rio Paranaíba melhor se assemelham ao estudo de Lathuillière *et. al*, 2012, no que se refere à pegada hídrica verde. Para todos os resultados, no entanto, pode-se afirmar que a cultura da soja apresenta a menor produtividade da água, ou seja, produz menos unidades de biomassa por volume total de água consumida (t/m³). Já a cana-de-açúcar apresenta a maior produtividade da água, ou menor pegada hídrica entre as culturas analisadas. Esse resultado se explica, em parte, pela elevada produtividade da cultura de cana-de-açúcar em relação às demais culturas consideradas. Entretanto, a pegada hídrica azul da cultura de soja, ou seja, a demanda via irrigação, é menor quando comparada com a cultura de cana (estudo em tela e MEKONNEN, M.M. e HOEKSTRA, A.Y., 2010) e do milho (estudo em tela), o que indica menor necessidade de captação de recursos hídricos para irrigação da soja.

Considerando o nexos uso do solo – água, a demanda hídrica da cultura de cana por unidade de área (hectare) é superior às demais culturas analisadas para a bacia do rio Paranaíba, devido ao seu valor de produtividade maior em relação às demais culturas. Assim, a pressão sobre os recursos hídricos por hectare produzido de cana-de-açúcar (5.780 m³/ha), considerando apenas a componente azul da demanda hídrica, é superior a

pressão exercida pela cultura de milho ($1.270 \text{ m}^3/\text{ha}$) e soja ($20 \text{ m}^3/\text{ha}$), respectivamente. Ou seja, cada hectare de expansão da cultura de cana-de-açúcar que venha a substituir as culturas analisadas neste estudo (milho e soja), acarretará maior pressão quantitativa sobre os recursos hídricos da bacia do rio Paranaíba para fins de irrigação.

Não menos relevante é a pegada hídrica verde, que é o volume de água da chuva evapotranspirado pela cultura ao longo do período de crescimento que fica temporariamente indisponível para escoamento e infiltração nos aquíferos. Neste caso, também, a cultura de cana-de-açúcar apresenta maior apropriação de água por área produzida ($12.935 \text{ m}^3/\text{ha}$) do que as culturas de milho ($2.057 \text{ m}^3/\text{ha}$) e soja ($2.863 \text{ m}^3/\text{ha}$) (Figura 20).

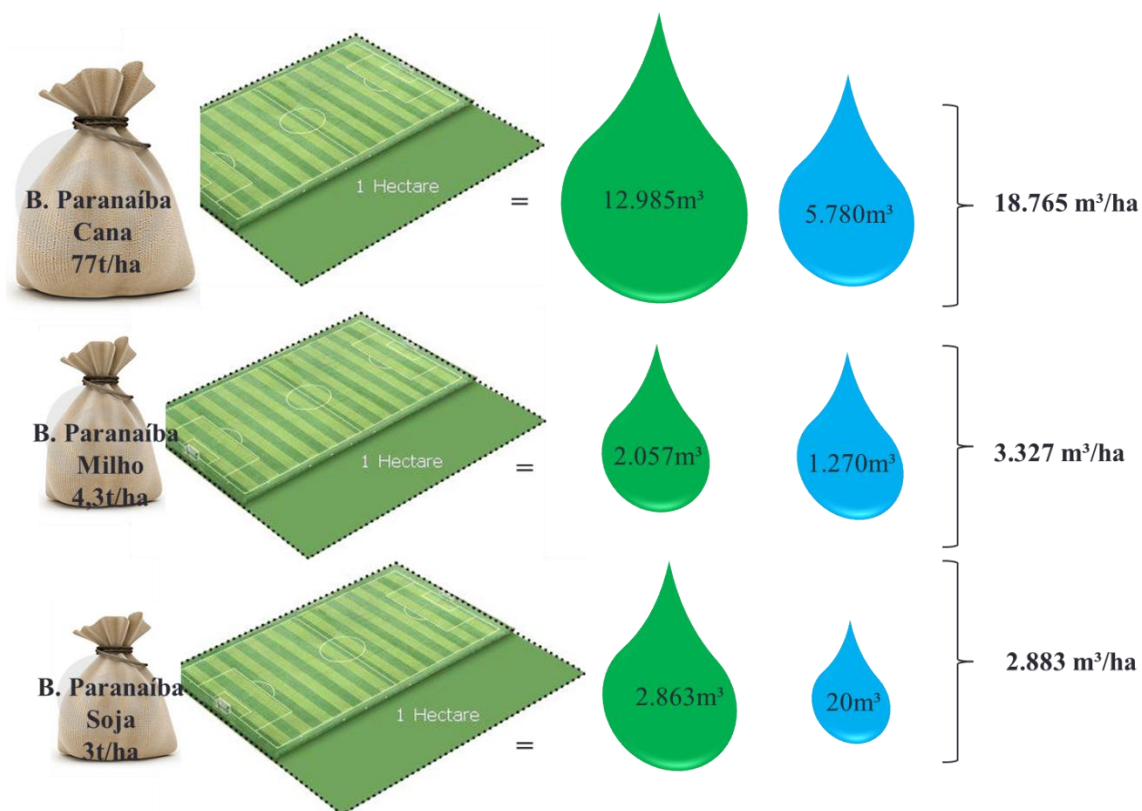


Figura 20: Demanda hídrica (componentes verde e azul) por hectare (m^3/ha) de culturas cultivadas na bacia do rio Paranaíba.

Esse resultado não necessariamente implica em um padrão de produção insustentável. Segundo (HOEKSTRA, A.Y., et al, 2011) quando as pegadas hídricas verde e azul são desnecessariamente grandes em áreas onde há abundância de água isto geralmente indica que a produtividade da água é baixa, ou seja, baixa produção por volume de água consumido. Isso é insustentável já que a produtividade da água deve

aumentar em áreas com abundância de recursos hídricos objetivando diminuir a necessidade da produção de bens com uso intensivo de água em áreas de escassez hídrica.

Dessa forma, para um melhor entendimento do significado do valor da pegada hídrica, uma análise da sustentabilidade da produção de biomassa na bacia do rio Paranaíba considerando dados de disponibilidade hídrica é indispensável.

4.3.2 Avaliação da sustentabilidade da pegada hídrica da produção de cana-de-açúcar destinada ao processamento de etanol na bacia do rio Paranaíba

Foi realizada uma comparação da pegada hídrica da produção de cana-de-açúcar destinada ao processamento de etanol e a disponibilidade de água em UGHs nas quais a expansão da cultura está ocorrendo de forma mais intensa. As demandas hídricas de retirada e consumo e as vazões de referência, com base no ano de 2010, para a bacia e para as UGHs foram avaliados e relacionados a indicadores de comprometimento dos recursos hídricos.

Os indicadores representam as relações entre as demandas de água e a disponibilidade hídrica, dada pela vazão de referência (Q95%) e vazão outorgável²².

A Tabela 10 apresenta os indicadores de comprometimento baseadas nas vazões de retirada superficiais, enquanto a

²² O Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERH-GO) por meio da Resolução nº 09, de 04 de maio de 2005 institui o sistema de outorga das águas do Estado de Goiás e estabelece a vazão com garantia de permanência em 95% do tempo (Q95%) como a vazão de referência para a outorga. A Resolução nº 11, de 20 de março de 2007, modifica a Resolução nº 09/2005, e limita as vazões outorgadas na bacia, em seção transversal específica, de forma que não sejam superiores a 50% da vazão de referência.

Tabela **11** apresenta os indicadores de comprometimento baseadas nas vazões de consumo.

Tabela 10: Demandas de retirada, disponibilidades hídricas e balanços hídricos (ano base 2010).

Bacia do Rio Paranaíba e UGHs	Demanda de retirada (m³/s)	Disponibilidade Hídrica superficial: vazão de referência Q95% (m³/s)	Disponibilidade Hídrica superficial: vazão outorgável ^a (m³/s)	Balanço hídrico (vazão de retirada/ vazão de referência)	Balanço hídrico (vazão de retirada/ vazão outorgável)	Demanda de retirada + demanda de retirada para cultura de cana ^b (m³/s)	Balanço hídrico (demanda de retirada + demanda cana /vazão de referência)	Balanço hídrico (demanda de retirada + demanda cana / vazão outorgável)
Bacia do rio Paranaíba	334,00	1.225,64	612,82	0,27	0,55	406	0,33	0,66
Turvo e dos Bois	58,86	157,48	78,74	0,37	0,75	82,7	0,53	1,05
Meia Ponte	33,13	63,26	31,63	0,52	1,05	37,5	0,59	1,18
Afluentes Mineiros do Baixo Paranaíba	30,24	88,18	44,09	0,34	0,69	32,8	0,37	0,74
Claro, Verde, Correntes e Aporé	23,53	361,88	180,94	0,07	0,13	34,3	0,09	0,19

Legenda: Indicadores de comprometimento hídrico

Normal	Alerta	Moderadamente Crítico	Altamente Crítico
--------	--------	-----------------------	-------------------

Notas: ^a A soma das vazões outorgadas na bacia, limitada pela seção transversal em estudo, não poderá exceder a 50% (cinquenta) da vazão de referência, vazão com garantia de permanência em 95% do tempo (Q95) (Resolução n° 09, de 04 de maio de 2005.).

^b Soma da demanda total de retirada superficial da Bacia ou da UGH com a demanda de retirada superficial para a cultura da cana-de-açúcar destinada ao processamento de etanol. A demanda de retirada para atender a cultura de cana teve base no cálculo da pegada hídrica azul e cinza da fase agrícola (m³/t) e nas informações do IBGE para produção de cana-de-açúcar (toneladas), no ano de 2011, por área inserida do município na Bacia ou UGH contemplada.

Tabela 11: Demandas de consumo, disponibilidades hídricas e balanços hídricos (ano base 2010).

Bacia do Paranaíba e UGHs	Demanda de consumo (m³/s)	Disponibilidade Hídrica superficial: vazão de referência Q95% (m³/s)	Disponibilidade Hídrica superficial: vazão outorgável ^a (m³/s)	Balanço hídrico (vazão de consumo / vazão de referência)	Balanço hídrico (vazão de consumo / vazão outorgável)	Demanda consumida + demanda de consumo para cultura de cana ^b (m³/s)	Balanço hídrico (vazão de consumo + vazão consumo cana/ vazão de referência)	Balanço hídrico (vazão de consumo + vazão consumo cana / vazão outorgável)
Bacia do rio Paranaíba	211,00	1.225,64	612,82	0,17	0,34	268,6	0,22	0,44
Turvo e dos Bois	39,70	157,48	78,74	0,25	0,49	58,8	0,37	0,75
Meia Ponte	14,50	63,26	31,63	0,23	0,46	18,0	0,28	0,57
Afluentes Mineiros do Baixo Paranaíba	22,88	88,18	44,09	0,26	0,52	24,9	0,28	0,57
Claro, Verde, Correntes e Aporé	12,00	361,88	180,94	0,03	0,07	20,6	0,06	0,11

Legenda: Indicadores de comprometimento hídrico

Normal

Alerta

Moderadamente Crítico

Altamente Crítico

Notas: ^a A soma das vazões outorgadas na bacia, limitada pela seção transversal em estudo, não poderá exceder a 50% (cinquenta) da vazão de referência, vazão com garantia de permanência em 95% do tempo (Q95) (Resolução n° 09, de 04 de maio de 2005.).

^b Soma da demanda total de consumo da Bacia ou UGH com a demanda de consumo para a cultura da cana-de-açúcar destinada ao processamento de etanol (a demanda de consumo para cana foi considerada como 80% da vazão de retirada para a cultura de cana). A demanda de retirada para atender a cultura de cana teve base no cálculo da pegada hídrica azul e cinza da fase agrícola (m³/t) e nas informações do IBGE para produção de cana-de-açúcar (toneladas), no ano de 2011, por área inserida do município na Bacia ou UGH contemplada.

Através dos indicadores é possível identificar quais UGH's apresentam comprometimento quantitativo e o grau deste comprometimento de seus recursos hídricos com o apontamento do setor sucroenergético neste contexto.

Quando analisado o balanço hídrico considerando a vazão de retirada (Tabela 10) o comprometimento dos recursos hídricos ocorre de forma mais intensa e em mais localidades quando considerando a vazão de consumo (

Tabela 11).

Sem agregar a informação da demanda hídrica da cultura de cana calculada neste estudo o balanço hídrico, considerando a disponibilidade hídrica como a vazão outorgável, revela diferentes graus de comprometimento na bacia e em UGHs tanto quando consideradas as demandas de retirada quanto às de consumo. Considerando a demanda de retirada, a UGH Meia Ponte apresenta um comprometimento dos seus recursos hídricos altamente crítico. No entanto, quando considerada a demanda de consumo, é a UGH Afluentes Mineiros do Baixo Paranaíba que apresenta situação de alerta. Isso demonstra a relação entre as diferentes finalidades de usos dos recursos hídricos nas UGHs e as diferentes taxas de retorno consideradas para os setores consumidores de água²³. Vale ressaltar que nem toda a água que retorna aos corpos hídricos retorna com padrões aceitáveis de qualidade para utilização, ou retorna na mesma quantidade e local em que foi captada.

Quando agregada a demanda hídrica relacionada ao cultivo da cultura de cana-de-açúcar destinada à produção de etanol às demandas de retirada e de consumo, observa-se uma alteração no balanço hídrico de forma a aumentar o comprometimento dos recursos hídricos na Bacia e nas UGHs, com destaque para a UGH Turvo e dos Bois. Isso se deve pela elevada produção de cana nesta UGH, chegando a cerca de 33% da produção total de cana da bacia.

Importante ressaltar que as demandas de retirada e consumo quando agregadas às demandas da cultura de cana apresentam valores sobrestimados. Isso porque as demandas de retirada e consumo da Bacia e das UGHs já contemplam vazões de demanda para a irrigação da cultura de cana considerando os meses mais críticos. Além disso, a demanda estimada neste estudo (componente azul da pegada hídrica) considera que toda a área plantada com cana de açúcar na bacia (cerca de 776 mil ha) recebe o mesmo sistema de manejo de irrigação. No entanto, o resultado desta análise não apresentaria uma grande discrepância relativa se fosse utilizado o valor médio observado de outorgas de direito de uso de água²⁴ com finalidade de irrigação da cultura da cana (5.498 m³/ha) na bacia uma vez este valor está muito próximo do valor

²³ Taxas de retorno adotadas por setor usuário na bacia do rio Paranaíba: agricultura, 20% da vazão de retirada; abastecimento público, 80% da vazão de retirada; indústria, 80% da vazão de retirada; dessedentação animal, 20% da vazão de retirada; mineração, 90% da vazão de retirada.

²⁴ Dados levantados em outorgas de direito de uso de recursos hídricos da ANA nos anos de 2012 e 2013 para os rios Paranaíba e Grande, com finalidade de irrigação da cultura de cana-de-açúcar, considerando apenas municípios integrantes da bacia do rio Paranaíba.

estimado da pegada hídrica azul da produção total de cana-de-açúcar na bacia (5.780 m³/ha).

Este é um importante exercício para a análise de cenários considerando a expansão das áreas de cultivo de cana-de-açúcar por UGHs. Considerando as UGHs, especial atenção na gestão integrada dos recursos hídricos deve ser dada às UGHs Turvo e dos Bois, Meia Ponte e Afluentes Mineiros do Baixo Paranaíba. Nestas UGHs o comprometimento dos recursos hídricos relacionado ao setor energético (foi considerada apenas a parcela de cana-de-açúcar destinada ao processamento de etanol) se apresenta mais intenso. A UGH Claro, Verde, Correntes e Aporé apesar de produzir maior quantidade de cana-de-açúcar (15% da produção de cana-de-açúcar da bacia do rio Paranaíba) que as UGHs Meia Ponte (6% da produção de cana-de-açúcar da bacia do rio Paranaíba) e Afluentes Mineiros do Baixo Paranaíba (3% da produção de cana-de-açúcar da bacia do rio Paranaíba) apresenta uma situação normal em relação ao comprometimento de seus recursos. Isso se explica pela sua maior disponibilidade hídrica e menores demandas de retirada e consumo.

A UGH Meia Ponte apresenta uma parcela importante de seus recursos hídricos (cerca de 26% de sua vazão de retirada) destinada ao abastecimento humano, colocando esta UGH em alerta para maiores avaliações dos impactos da expansão da cana-de-açúcar sobre os recursos hídricos, uma vez que esta finalidade de uso, além da dessedentação animal, é prioridade sobre todos os demais usos múltiplos de uma bacia hidrográfica.

4.3.3 Avaliação dos impactos da produção de cana-de-açúcar sobre os recursos hídricos da bacia do rio Paranaíba em cenários de expansão de demanda de etanol

Para a análise dos potenciais impactos sobre os recursos hídricos da bacia do Paranaíba frente a diferentes cenários de expansão da área plantada de cana em 2022, foi realizado o balanço hídrico considerando a demanda hídrica estimada para o crescimento da cultura de cana-de-açúcar destinada ao processamento de etanol em 2022 de acordo com a área plantada. As demandas hídricas de retirada e consumo para 2022 e as vazões de referência de 2010 foram avaliadas e relacionadas a indicadores de comprometimento dos recursos hídricos.

Os indicadores representam as relações entre as demandas de água e a disponibilidade hídrica, dada pela vazão de referência (Q95%) e vazão outorgável²⁵. A Tabela 12 apresenta os indicadores de comprometimento baseadas nas vazões de retirada superficiais, enquanto a Tabela 13 apresenta os indicadores de comprometimento baseadas nas vazões de consumo.

²⁵ O Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERH-GO) por meio da Resolução nº 09, de 04 de maio de 2005 institui o sistema de outorga das águas do Estado de Goiás e estabelece a vazão com garantia de permanência em 95% do tempo (Q95%) como a vazão de referência para a outorga. A Resolução nº 11, de 20 de março de 2007, modifica a Resolução nº 09/2005, e limita as vazões outorgadas na bacia, em seção transversal específica, de forma que não sejam superiores a 50% da vazão de referência.

Tabela 12: Demandas de retirada, disponibilidades hídricas e balanços hídricos.

Cenários	Demanda de retirada (m³/s)	Disponibilidade Hídrica superficial: vazão de referência Q95% (m³/s)	Disponibilidade Hídrica superficial: vazão outorgável ^a (m³/s)	Balanço hídrico (vazão de retirada/ vazão de referência)	Balanço hídrico (vazão de retirada/ vazão outorgável)	Demanda de retirada + demanda de retirada para cultura de cana em 2022 ^b (m³/s)	Balanço hídrico (demanda de retirada + demanda cana em 2022 /vazão de referência)	Balanço hídrico (demanda de retirada + demanda cana em 2022 / vazão outorgável)
Cenário 1	334	1.225,64	612,82	0,27	0,55	462,43	0,38	0,75
Cenário 2	334	1.225,64	612,82	0,27	0,55	587,88	0,48	0,96
Cenário 3	334	1.225,64	612,82	0,27	0,55	426,98	0,35	0,70

Normal

Alerta

Moderadamente Crítico

Altamente Crítico

Legenda: Indicadores de comprometimento hídrico

Notas: ^a A soma das vazões outorgadas na bacia, limitada pela seção transversal em estudo, não poderá exceder a 50% (cinquenta) da vazão de referência, vazão com garantia de permanência em 95% do tempo (Q95) (Resolução n° 09, de 04 de maio de 2005.).

^b Soma da demanda total de retirada superficial da Bacia (ano de 2010) com a demanda de retirada superficial para a cultura da cana-de-açúcar destinada ao processamento de etanol em 2022. A demanda de retirada para atender a cultura de cana teve base no cálculo da demanda hídrica azul e cinza da fase agrícola (m³/ha), apresentado no item 4.2.1, e nas informações do IBGE para área plantada de cana-de-açúcar (ha) na parcela do município inserida na Bacia, para o ano de 2001, agregada da área plantada conforme taxas de crescimentos dos cenários considerados para 2022.

Tabela 13: Demandas de consumo, disponibilidades hídricas e balanços hídricos.

Cenários	Demanda de consumo (m³/s)	Disponibilidade Hídrica superficial: vazão de referência Q95% (m³/s)	Disponibilidade Hídrica superficial: vazão outorgável ^a	Balanço hídrico (vazão de consumo / vazão de referência)	Balanço hídrico (vazão de consumo / vazão outorgável)	Demanda consumida + demanda de consumo para cultura de cana ^b (m³/s)	Balanço hídrico (vazão de consumo + vazão consumo cana em 2022/ vazão de referência)	Balanço hídrico (vazão de consumo + vazão consumo cana em 2022 / vazão outorgável)
Cenário 1	211	1.225,64	612,82	0,17	0,34	102,75	0,26	0,51
Cenário 2	211	1.225,64	612,82	0,17	0,34	203,10	0,34	0,68
Cenário 3	211	1.225,64	612,82	0,17	0,34	74,38	0,23	0,47

Legenda: Indicadores de comprometimento hídrico

Normal	Alerta	Moderadamente Crítico	Altamente Crítico
--------	--------	-----------------------	-------------------

Notas: ^a A soma das vazões outorgadas na bacia, limitada pela seção transversal em estudo, não poderá exceder a 50% (cinquenta) da vazão de referência, vazão com garantia de permanência em 95% do tempo (Q95) (Resolução nº 09, de 04 de maio de 2005.).

^b Soma da demanda total de consumo da Bacia (em 2010) com a demanda de consumo para a cultura da cana-de-açúcar destinada ao processamento de etanol (a demanda de consumo para cana foi considerada como 80% da vazão de retirada para a cultura de cana) em 2022. A demanda de retirada para atender a cultura de cana teve base no cálculo da demanda hídrica azul e cinza da fase agrícola (m³/ha), apresentado no item 4.2.1, e nas informações do IBGE para área plantada de cana-de-açúcar (ha) na parcela do município inserida na Bacia, para o ano de 2001, agregada da área plantada conforme taxas de crescimentos dos cenários considerados para 2022.

Através dos indicadores é possível identificar os cenários de expansão da área da cultura de cana em 2022 na bacia do Paranaíba que apresentam comprometimento quantitativo e o grau deste comprometimento nos recursos hídricos, com o apontamento do setor sucroenergético neste contexto.

Quando analisado o balanço hídrico considerando a vazão de retirada (Tabela 12) o comprometimento dos recursos hídricos ocorre de forma mais intensa do que quando considerada a vazão de consumo (Tabela 13). Sem agregar a informação da demanda hídrica estimada da cultura de cana destinada ao processamento de etanol para 2022, o balanço hídrico (considerando a disponibilidade hídrica como a vazão outorgável) para o ano de 2010 já apresenta uma situação de alerta quanto ao comprometimento hídrico na bacia, assim como quando agregada a demanda para irrigação da cultura de cana considerando o ano civil de 2011 (Tabela 10). O pior cenário de expansão de cana para o comprometimento dos recursos hídricos da bacia do Paranaíba é o cenário 2, apresentando uma situação moderadamente crítica de comprometimento.

Considerando a demanda de consumo e a disponibilidade outorgável, os cenários 1,2 e 3 de expansão de cana para 2022 apresentam aumento do comprometimento dos recursos hídricos da bacia quando comparados com o balanço hídrico considerando a demanda para irrigação da cana no ano civil de 2011 (Tabela 10).

Quando considerada a vazão de referência, todos os cenários apresentaram situação normal quanto ao comprometimento hídrico, tanto para demanda de retirada quanto de consumo.

Importante ressaltar que as demandas de retirada e consumo quando agregadas às demandas da cultura de cana apresentam valores sobrestimados. Isso porque as demandas de retirada e consumo da Bacia já contemplam vazões de demanda para a irrigação da cultura de cana considerando os meses mais críticos. Além disso, a demanda estimada neste estudo (componente azul da pegada hídrica) considera que toda a área plantada com cana de açúcar na bacia (cerca de 776 mil ha) recebe o mesmo sistema de manejo de irrigação.

Este é um importante exercício para a análise de cenários considerando a expansão das áreas de cultivo de cana-de-açúcar. Importante destacar que a taxa de expansão de culturas não se dá de forma homogenia na unidade de análise, sobre tudo quando esta unidade é de grande dimensão, como as apresentadas nos cenários 1 e 2 (Brasil e Centro-Oeste Cerrado, respectivamente). Diante disso, o cenário que melhor

pode retratar os possíveis impactos sobre os recursos hídricos na bacia do Paranaíba é o cenário 3 por ter uma unidade de análise de menor proporção (Goiás), resultando em uma taxa de crescimento da área de expansão da cultura de cana mais próxima para a realidade da bacia alvo deste estudo.

Considerando o estudo do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2012) o qual projeta para 2022 uma área de 10,9 milhões de hectares de cana plantada no Brasil e, considerando uma produtividade média de 88,5tc/ha (MME/EPE, 2012), pode-se inferir que os municípios goianos inseridos na bacia do Paranaíba serão responsáveis por cerca de 6% da produção brasileira de cana-de-açúcar irrigada em 2022.

4.3.4 Análise de sensibilidade da necessidade hídrica da cultura de cana-de-açúcar na bacia do rio Paranaíba considerando diferentes cenários de mudanças climáticas para o período de 2010-2040

O impacto das anomalias de temperatura e precipitação foi expresso em termos de perda de água na forma de evapotranspiração pela cultura de cana-de-açúcar. Considerando a necessidade hídrica da cultura, foi calculada a pegada hídrica verde e azul para os cenários A2 e B2 (Tabela 14) para o período de análise 2010-2040.

Tabela 14: Dados de evapotranspiração ajustada e pegada hídrica da cana-de-açúcar irrigada destinada ao processamento de etanol na bacia do rio Paranaíba em diferentes cenários.

Cenários	ETa da cultura de cana-de-açúcar	PHverde	PHazul	PHtot
	(mm)			
Cenário base (1961-1990)	1877	169	75	244
Cenário A2 (2010-2040)	1941	179	73	252
Cenário B2 (2010-2040)	1941	178	74	252

Para os dois cenários de mudanças climáticas, A2 e B2, a evapotranspiração ajustada da cultura de cana na bacia é maior em relação ao cenário base. Esse resultado pode ser explicado pelo aumento da temperatura em ambos cenários (1 °C nos períodos MAM, JJA e SON), o que reflete no aumento da evapotranspiração de referência (ETo). As pegadas hídricas totais dos cenários A2 e B2 também são maiores em relação ao cenário base. Comparando os dois cenários de emissões de GEEs, a pegada hídrica verde do cenário B2 é menor, provavelmente devido a um aumento do volume de chuva diário menor neste cenário (0,5 mm/dia) que para o cenário A2 (1mm /dia) durante o

período SON, período esse com meses apresentando déficit hídrico na região. Verifica-se, então, que a pegada hídrica azul no cenário B2 é maior que no cenário A2, uma vez que este último tem sua necessidade hídrica atendida pela precipitação.

É importante observar neste exercício a influência da sazonalidade das anomalias meteorológicas na demanda hídrica das culturas. Ou seja, mesmo o cenário B2 tendo dois períodos anuais com aumento na precipitação (1 mm/dia no período DJF e 0,5 mm/dia no período SON) contra um período anual do cenário A2 (1 mm/dia no período SON), a taxa de aumento na precipitação menor para um período de reconhecido déficit hídrico na região (período SON) induz em um aumento da pegada hídrica azul. Apesar da diferença pequena neste caso, deve-se ter atenção com as variações sazonais nas variáveis climáticas para a corrida de modelos baseados em balanço hídrico do solo.

Capítulo 5: Resultados e Discussão

As demandas crescentes por biocombustíveis vêm moldando o uso e ocupação do solo no Brasil nas últimas décadas.

Considerando a manutenção do Brasil como líder no mercado internacional de etanol, devido a taxas de exportação crescentes e ao aumento do uso doméstico do etanol brasileiro (MME/EPE, 2012; USDA, 2013), a demanda por uma maior produção de cana-de-açúcar a curto e médio prazo exigirá a expansão das áreas de cultivo. Dessa forma, investimentos governamentais para o setor sucroalcooleiro vêm sendo estudados visando o aumento da oferta de matéria-prima para as usinas nesta próxima década. Estas medidas exigirão, necessariamente, a ampliação das áreas de produção de cana-de-açúcar, sobretudo em curto prazo.

A incorporação de novas áreas para a produção de culturas energéticas demandará água para o crescimento de biomassa resultando em pressões sobre os recursos hídricos, caso essa expansão ocorra em áreas com déficit hídrico como é o caso da bacia do rio Paranaíba localizada no Centro-Oeste do país. Segundo a EPE (MME/EPE, 2012) no horizonte decenal 2011-2021 a área colhida aumentará 59%, sendo evitados 3,9 milhões de hectares adicionais devido ao aumento da produtividade (de 68,3 para 88,5 tc/ha). Isso revela que ainda que áreas não sejam incorporadas para produção de cana-de-açúcar o aumento da produtividade será necessário para atender a demanda, e para isso, práticas como a irrigação podem ser adotadas ou intensificadas.

O sistema energético brasileiro está muito suscetível às pressões sobre os recursos hídricos devido a sua forte concentração e dependência dessa fonte renovável. No caso da bioenergia, o recurso terra também é outro importante fator a ser considerado. No Brasil os programas para produção de biocombustíveis são considerados um sucesso mundial justamente pela disponibilidade de terras, além da adequada condição climática para a produção de biomassa energética.

No entanto, o estudo de caso apresentado no capítulo 4 aponta a necessidade de avaliação de forma regionalizada de impactos potenciais sobre os recursos hídricos devidos à expansão da cultura de cana-de-açúcar pelo planejamento energético do país. Uma análise que integre os recursos hídricos aos temas energia, uso do solo e clima (como a metodologia NECAT) é a mais indicada para se obter uma visão holística de

um sistema de produção sustentável de biocombustíveis. Também, a integração destes temas serve como um mecanismo para o planejamento energético de forma a evitar políticas e regulamentos que, muitas vezes, inadvertidamente criam sinais sub-ótimos para a segurança nacional, para economia e meio ambiente.

Neste trabalho foi selecionado o indicador pegada hídrica como ferramenta de análise da apropriação de água durante a produção de biomassa energética em uma bacia do Centro-Oeste do país aonde a expansão da cana-de-açúcar vem ocorrendo em taxas crescentes nos últimos anos. Por fornecer informações do volume de água utilizada e sua fonte (água verde, azul ou cinza), este indicador fornece dados para uma análise dos potenciais impactos sobre os recursos hídricos de uma bacia durante a etapa de produção de bioenergia que exige mais deste recurso - a fase agrícola -, além de informar sobre a eficiência do uso da água na produção de biocombustíveis em diferentes bacias hidrográficas. Isso subsidia uma base de dados regionalizada para um planejamento integrado energético e ambiental de programas de produção de biocombustíveis.

Em relação à política energética dos países, a adoção deste indicador auxilia no atendimento de critérios de sustentabilidade da produção de bioenergia relacionados aos recursos hídricos. A pegada hídrica também pode ser relacionada com outros critérios de sustentabilidade, tais como i) emissões de GEE; ii) capacidade produtiva da terra e dos ecossistemas; iii) diversidade biológica; iv) preço e fornecimento de uma cesta básica nacional; v) disponibilidade e eficiências no uso de recursos na produção, conversão, distribuição e uso final de bioenergia; vi) viabilidade econômica e competitividade da bioenergia e vii) segurança energética/diversificação de fontes e oferta.

É importante salientar que a pegada hídrica é uma medida volumétrica do uso da água e poluição, mas não mede a gravidade do impacto ambiental local destes aspectos. Além disso, é uma ferramenta uni-dimensional pois só considera a água como fator de entrada, sem levar em conta outros fatores que afetam a produtividade, como manejo do solo; uso de fertilizantes e melhoramento genético. Ainda, a pegada cinza não leva em conta questões como ecotoxicidade, biodegradabilidade ou tratamento de efluentes (Hastings e Pegram, 2012), além de ser muitas vezes conservadora por não considerar todos os poluentes. No caso deste trabalho, só foi considerada a poluição por nitrogênio desconsiderando o fósforo e a poluição por agrotóxicos.

Diante destas limitações da pegada hídrica, vem à tona a importância de sua complementação com análises regionalizadas de áreas de cultivo de biomassa energética. Dados de demandas e disponibilidade hídrica de uma bacia hidrográfica são essenciais para a análise dos potenciais impactos da pegada hídrica de determinada cultura. O valor da pegada hídrica ($\text{m}^3/\text{saída (toneladas)}$) por si só não fornece informações suficientes sobre os impactos potenciais da produção de biomassa energética em determinada região. Dessa forma, a comparação da pegada hídrica de diferentes regiões sem levar em conta a relação deste indicador às características hidrológicas e de gestão dos múltiplos usos da água das regiões analisadas, não fornece, muitas vezes, informação consistente da situação local.

Os resultados apresentados no estudo de caso alertam para importância da avaliação da sustentabilidade da pegada hídrica da produção de cana-de-açúcar destinada ao processamento de etanol em bacias hidrográficas por meio de indicadores de comprometimento hídricos baseados na relação vazões de retirada e disponibilidade hídrica local. Outra importante contribuição do estudo de caso é a avaliação dos potenciais impactos da produção de cana-de-açúcar sobre os recursos hídricos de bacias hidrográficas em cenários de expansão da demanda por etanol. O estudo indicou que os municípios goianos inseridos na bacia do rio Paranaíba serão responsáveis por cerca de 6% da produção brasileira de cana-de-açúcar irrigada em 2022, importante resultado para o planejamento sustentável do setor sucroalcooleiro. No que se refere à integração dos temas água e clima, também se revelou importante a consideração de cenários de mudanças climáticas e seus efeitos sobre a necessidade hídrica das culturas energéticas.

A integração da pegada hídrica da bioenergia no planejamento energético de um país se revela importante tanto pela questão ambiental relacionada aos impactos sobre os recursos hídricos (poluição, pressão sobre serviços ambientais), quanto pela social e econômica (segurança energética, viabilidade econômica e competitividade da bioenergia).

Um dos mecanismos governamental que visa a expansão sustentável da indústria sucroalcooleira no Brasil, o zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar (MANZATTO et.al, 2009) previsto pelo Plano Nacional de Agroenergia (MAPA, 2006), além de considerar as questões agrícolas poderia integrar avaliações da pegada hídrica da produção de cana-de-açúcar em bacias hidrográficas com os respectivos indicadores de comprometimento hídrico. A integração da avaliação da situação dos recursos frente à expansão da cultura da cana em regiões com déficit hídrico e/ou

conflitos no uso da água, como é o caso da região Centro-Oeste, complementaria o zoneamento quanto à aptidão de áreas apontadas para receber a expansão da cultura, sendo hoje a própria região Centro-Oeste apontada pelo zoneamento como a de maior concentração de áreas aptas à expansão do cultivo da cana-de-açúcar no Brasil. Dessa forma, as linhas de financiamento de bancos federais e estaduais que seguem as recomendações do zoneamento evitariam possíveis equívocos ambientais de políticas públicas de incentivo de instalação de usinas sucroalcooleiras em áreas com potenciais conflitos pelo uso da água.

Por fim, o entendimento das sinergias e tensões entre as áreas energia, uso do solo, água e clima resultarão em ferramentas de apoio ao planejamento e decisão para uma melhor alocação e sustentabilidade de recursos naturais essenciais para a segurança energética, desenvolvimento econômico e manutenção da integridade ambiental dos sistemas.

Capítulo 6: Conclusão

6.1 Principais conclusões e limitações

A bioenergia é uma oportunidade para o desenvolvimento sustentável e mitigação das mudanças do clima, sobretudo em países em desenvolvimento como o Brasil. No entanto traz desafios tanto para a mensuração dos impactos ao meio ambiente ocasionados por padrões insustentáveis de produção quanto para a proposição de soluções abordando metodologias integradoras, como a NECAT.

Uma análise da produção eficaz de biocombustíveis é incompleta sem considerar os efeitos da produção de biocombustíveis e as necessidades de recursos hídricos para o crescimento de biomassa energética nas áreas de produção e de expansão.

Apesar de não se ter um consenso sobre sustentabilidade da produção de biocombustíveis, dada a ausência de uma metodologia única, objetiva e comum e que contemple as diferenças regionais, tecnológicas e as características próprias de cada cultura energética, critérios e indicadores relacionados ao tema água propostos por diversas iniciativas globais auxiliam no direcionamento de uma produção sustentável.

A avaliação da pegada hídrica é uma ferramenta analítica que pode auxiliar na compreensão sobre como a produção de biocombustíveis interage com a escassez e a poluição da água, e com o que pode ser feito para assegurar que programas nacionais de biocombustíveis não contribuam para o uso não sustentável dos recursos hídricos.

A avaliação da pegada hídrica de uma bacia hidrográfica permite a comparação da pegada hídrica verde e azul e disponibilidade de água, bem como a alocação dos recursos hídricos e os potenciais conflitos com os múltiplos usos da água na bacia.

No estudo de caso apresentado neste trabalho, percebe-se que só é possível analisar o real valor da pegada hídrica calculado para a produção de cana-de-açúcar destinada ao processamento de etanol na bacia do rio Paranaíba quando este é analisado integralmente às informações de demandas e disponibilidade hídrica, disponíveis no plano de recursos hídricos da bacia do rio Paranaíba. Ou seja, o valor calculado para a pegada hídrica da cana-de-açúcar produzida na bacia do rio Paranaíba (251m³/tc, sendo 169m³/tc referente à pegada verde e 82m³/tc referente à pegada azul) só revela ser insustentável ou não quando essa informação é agregada ao balanço hídrico da bacia.

O cálculo da pegada hídrica do etanol de cana-de-açúcar produzido na bacia do rio Paranaíba, de 139m³/GJ (sendo 90m³/GJ relativo à água verde – água da chuva para crescimento da biomassa - e 49m³/GJ relativo à água azul- irrigação e consumo industrial – e à água cinza da etapa agrícola), chama a atenção para um possível aumento da pegada hídrica na região de estudo em relação à média nacional, de 99 m³/GJ apresentada no estudo de (GERBENS-LEENES et al., 2009), possivelmente devido a maior parte da produção de cana-de-açúcar no Brasil ocorrer em regime de sequeiro, o que não é uma realidade para a região de estudo.

A comparação entre as pegadas hídricas de diferentes culturas e coberturas do solo que vêm sendo substituídas pela produção de biocombustíveis, sobretudo as culturas alimentares, é de extrema importância para verificar a eficiência da alocação dos recursos hídricos aos diferentes usos e os potenciais conflitos de programas de biocombustíveis. A análise realizada para a bacia do rio Paranaíba, considerando as culturas de milho e soja e a potencial substituição destas pela cultura de cana-de-açúcar, serviu de exercício para mensurar a eficiência do uso de água por unidade produzida de biomassa (m³/t), mostrando que a cultura de cana é mais eficiente no uso da água que as culturas de milho e soja quando considerada a pegada hídrica total (componente verde e azul). Considerando apenas a componente azul da pegada hídrica, a cultura de cana fica atrás da cultura de soja na eficiência do uso da água por quantidade de biomassa produzida. No entanto, a necessidade de se avaliar a pressão sobre os recursos hídricos de forma especializada, mostrou que a pressão por unidade de área de produção de cana-de-açúcar incorre em uma maior exigência quantitativa por recursos hídricos, tanto via precipitação (pegada verde) quanto via irrigação (pegada azul) quando comparada com as demais culturas, milho e soja.

Esse resultado não necessariamente implica em um padrão de produção insustentável da cultura de cana-de-açúcar em relação às demais culturas analisadas, uma vez que as informações das pegadas hídricas das culturas necessitam ser cruzadas com informações de disponibilidade hídrica da bacia, além da necessidade de uma análise do ponto de vista econômico e social para verificar se a água está sendo alocada e utilizada de forma eficiente e justa.

Segundo HOEKSTRA, A.Y *et.al.* (2011) ao se promover o uso eficiente da água em áreas hidricamente ricas para a produção de *commodities* que requerem seu uso intensivo, reduz-se a necessidade de água para produzir essas mesmas mercadorias em

outras áreas onde há escassez hídrica. Assim, avaliar a sustentabilidade das pegadas hídricas vai além da simples observação dos seus possíveis impactos locais e imediatos.

De fundamental importância é a regionalização das áreas de expansão de culturas energéticas, no caso deste estudo analisadas por unidade de gestão hídrica (UGHs), além da análise da pressão sobre os usos múltiplos da água destas unidades de estudo. Apesar de requerer um número maior de dados e tempo para o tratamento destas informações, a identificação dos impactos da produção de biocombustíveis sobre os recursos hídricos por sub-bacia ou UGH, no caso da bacia do rio Paranaíba, permite uma melhor priorização de ações e medidas para evitar conflitos entre os usuários da água nas regiões de produção e expansão da cana-de-açúcar. Conforme apresentado nos resultados deste estudo, especial atenção deve ser dada as UGHs Turvo e dos Bois, Meia Ponte e Afluentes Mineiros do Baixo Paranaíba, com destaque para a UGH Meia Ponte, uma vez que maior parte de seus recursos está comprometida com o uso mais nobre, o abastecimento humano.

Outra importante contribuição do estudo é chamar atenção para a necessidade de estudos considerando cenários de mudanças climáticas em regiões de expansão de culturas energéticas. As mudanças do clima podem resultar em maiores pressões sobre os recursos hídricos durante a fase de crescimento de biomassa, resultando em maior captação de água para irrigação de lavouras energéticas. Ou ao contrário, as mudanças climáticas podem aumentar a eficiência no uso de água para produção de biomassa energética.

Este trabalho serviu como um exercício para a integração dos temas **energia** (produção de etanol de cana-de-açúcar), **uso da terra** (diferentes coberturas do solo que vêm sofrendo pressão pela cultura de cana) e **clima** (anomalias em variáveis climáticas considerando cenários de mudanças climáticas) com o tema central do estudo, a **água** (uso da água na produção de cana-de-açúcar na bacia do rio Paranaíba) a fim de gerar informações sobre potenciais impactos locais do programa de biocombustíveis em bacias hidrográficas do Brasil.

Por fim, as principais considerações do trabalho e limitações são listadas seguir:

i) Importante analisar o uso da água para a produção de biocombustíveis ao longo de toda a cadeia produtiva, sobretudo a etapa de crescimento de biomassa, a qual é responsável pela maior apropriação deste recurso.

ii) Importante analisar a demanda de água via precipitação (pegada verde), via captação superficial ou subterrânea (pegada azul), ou água necessária para diluir poluentes (pegada cinza).

iii) Importante para a avaliação da pegada hídrica da produção de biocombustíveis considerar como unidade de análise a bacia hidrográfica, pois esta é a unidade espacial natural que permite a comparação da pegada hídrica e disponibilidade de água, bem como da alocação dos recursos hídricos e os potenciais conflitos de forma localizada.

iv) Importante a elaboração e disponibilização dos Planos de Recursos Hídricos das bacias hidrográficas, previstos na lei das águas (BRASIL, 1997), para subsidiar informações para a avaliação da pegada hídrica.

v) Importante considerar o mapeamento e avaliação de bacias hidrográficas onde ocorrem a produção ou a expansão da cultura de cana-de-açúcar destinada ao processamento de etanol, considerando cenários com substituição de culturas alimentares ou áreas de pastagem para verificar a pressão da produção de biocombustível sobre os recursos hídricos.

vi) Importante considerar o mapeamento e avaliação de bacias hidrográficas onde ocorrem a produção ou a expansão da cultura de cana-de-açúcar destinada ao processamento de etanol, considerando cenários de mudanças climáticas e como as consequentes alterações em variáveis climáticas poderão impactar os recursos hídricos frente às alterações nas necessidades hídricas das culturas.

vii) Importante articular e integrar programas governamentais de produção de biocombustíveis - sobretudo sob o viés da sustentabilidade ambiental dos recursos hídricos - a programas, planos e iniciativas governamentais tais como: Plano Nacional de Agroenergia; Plano Nacional de Energia; Política Nacional de Irrigação; Planos de Recursos Hídricos (nacional, estaduais e de bacias hidrográficas); Zoneamento Agroecológico da cana-de-açúcar.

viii) Importante agregar a pegada hídrica de culturas energéticas no planejamento e gestão integrada de recursos hídricos em bacias hidrográficas tanto para avaliar padrões insustentáveis presentes e futuros da produção de biocombustíveis e poder antecipar conflitos no uso da água. Tais informações poderão auxiliar na promoção da agricultura de culturas energéticas em áreas onde a precipitação pode suprir a maior parte das necessidades de água da cultura e aumentar a produtividade da água verde; auxiliar em processos de outorgas; auxiliar na adoção de medidas para

redução da pegada hídrica azul e cinza; aumentar a eficiência do uso de água em nível de bacia hidrográfica através da alocação de recursos hídricos para os propósitos que oferecem mais benefícios sociais; aplicar medidas de mitigação de conflitos pelo uso da água.

ix) Importante ressaltar o reconhecimento da pegada hídrica, por meio da ISO 14046 – Pegada Hídrica: princípios, requerimentos e guias (a ser publicada), como uma métrica para quantificar potenciais impactos ambientais relacionados à água, por meio da Análise de Ciclo de Vida (ACV).

x) Importante ressaltar que a avaliação da pegada hídrica é uma ferramenta parcial que deve ser adotada em conjunto com outros tipos de análises para permitir o entendimento de todas as questões relevantes durante a tomada de decisões.

xi) Importante ressaltar que o presente trabalho considerou o manejo de irrigação de forma a evitar qualquer estresse hídrico durante todo o período de desenvolvimento da cultura para toda a bacia do rio Paranaíba.

xii) Importante ressaltar que o presente trabalho não considerou captação de água subterrânea para atender a demanda de irrigação da cultura de cana.

xiii) Importante ressaltar que o trabalho subestimou os impactos qualitativos (pegada cinza) sobre os recursos hídricos da bacia do rio Paranaíba ocasionados pela produção de cana-de-açúcar.

6.2 Sugestão para trabalhos futuros

i) Analisar sob o viés econômico e social os impactos da produção de cana-de-açúcar na bacia do rio Paranaíba sobre os recursos hídricos a partir de informações geradas por este trabalho.

ii) Utilização de modelo para a alocação de recursos hídricos da bacia para atender as necessidades hídrica das culturas capaz de integrar os recursos hídricos subterrâneos.

iii) Levantar maiores informações sobre impactos qualitativos dos recursos hídricos relacionados à produção de cana-de-açúcar e incorporá-las na avaliação da pegada hídrica cinza.

iv) Utilizar modelos e sistemas de informação geográfica para verificar tendências de expansão e substituição de coberturas e usos do solo pela cultura de cana-

de-açúcar em bacias hidrográficas e a parcela da produção destinada ao processamento de etanol. Dessa forma poderá ser melhor mensurado e localizado o impacto da pegada hídrica na bacia do rio Paranaíba.

Referências Bibliográficas

ALLEN R. G.; *et.al.* Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. (FAO: Irrigation and Drainage Paper, 56).

ANA - Agência Nacional de Águas / Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos (SPR). Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba (PRH-Paranaíba), 2013.

ANA - Agência Nacional de Águas. Resolução nº 707, Dispõe sobre procedimentos de natureza técnica e administrativa a serem observados no exame de pedidos de outorga, e dá outras providências. Brasília, 21.12.2004.

ANFAVEA – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES. *Anuário da Indústria Automobilística 2013*. São Paulo, 2013.

BAZILIAN, M. et al. Considering the energy, water and food nexus: Towards an integrated modelling approach. *Energy Policy*, v. 39, p. 1–11, out. 2011.

BERNDES, G. Water demand for global bioenergy production: trends, risks and opportunities *Energy*, 2008.

BNDES; CGEE. Bioetanol de cana-de-açúcar: Energia para o desenvolvimento sustentável. Coordenação do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social e do Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. 1º Edição, 2008. Disponível em < <http://www.bioetanoldecana.org/pt/download/bioetanol.pdf> >. Acesso em: setembro 2013

BRASIL. Decreto 19.717, Obrigatoriedade da adição de álcool à gasolina de procedência estrangeira. Rio de Janeiro, 20.2.1931

BRASIL. Decreto 76.593, Institui o Programa Nacional do Alcool e dá outras Providências. Brasília, 14.10.1975

BRASIL. Decreto 76.593, Institui Política Nacional de Irrigação e dá outras Providências. Brasília, 11.01.2013

BRASIL. Lei 11.097, Dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira; e dá outras providências. Brasília, 13.01.2005.

BRASIL. Lei nº 12.490. Brasília, 16.09.2011.

BRASIL. Lei nº 9.433/1997, Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. Brasília, 08.01.1997.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Disponível em: < <http://www.integracao.gov.br/pt/home> >. Acesso em: janeiro de 2014.

CANASAT – Monitoramento da Cana-de-Açúcar via satélite. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/laf/canasat/index.html>>. Acesso em: março de 2013.

CGEE – CENTRO DE Gestão DE ESTUDOS ESTRATÉGICOS. Estudo sobre as possibilidades e impactos da produção de grandes quantidades de etanol visando à substituição parcial de gasolina no mundo – Fase 2. Campinas: Nipe/Unicamp, 2007.

CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Bioetanol combustível: uma oportunidade para o Brasil - Brasília, DF : Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2009. 536 p.: il.; 24 cm.

CLEWS – Climate, Land, Energy and Water strategies. Disponível em <<http://clews.net/index.html>>. Acesso em junho de 2013.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, primeiro levantamento, abril/2012 - Companhia Nacional de Abastecimento. – Brasília : Conab 2012.

CRAMER J. Testing Framework for Sustainable Biomass, Netherlands, 2007. Disponível em: <http://www.senter-novem.nl/duurzameengie/publicaties/publicaties_bio-energie//toetsingskader_voor_duurzame_biomassa.aspS>. Acesso em: setembro de 2013.

CTC - CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA. Avaliação de Áreas com Potencial para Produção de cana-de-açúcar no Brasil – Relatório Técnico de Transferência de Tecnologia, Revisão 1, 14p., 2005.

DE LA TORRE UGARTE, D. G. et al. Expanded ethanol production: Implications for agriculture, water demand, and water quality. Biomass and Bioenergy, v. 34, n. 11, p. 1586–1596, nov. 2010.

DOMINGUEZ-FAUS, R. et al. The Water Footprint of Biofuels : A Drink or Drive Issue ? Are We Ready for Fifty Gallons of Water per Mile. Environmental Science & Technology, v. 2007, p. 3005–3010, 2009.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Yield response to water. Rome: FAO, 1979. 193p. Irrigation and Drainage Paper,33.

EIA - Energy Information Administration. International Energy Statistics database. Disponível em <<http://www.eia.gov/>>. Acesso em agosto de 2013.

ELBEHRI, A. et. al. Biofuels and the sustainability challenge: A global assessment of sustainability issues, trends and policies for biofuels and related feedstocks. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2013.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Climwat 2.0. Roma, 2006

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. CROPWAT Model. Food and Agriculture Organization. Rome, Italy, 2003.

FARGIONE, J.; ET.AL. Land clearing and the biofuel carbon debt. *Science* (New York, N.Y.), v. 319, n. 5867, p. 1235–8, 29 fev. 2008.

FIESP/ICONE - Federação das Indústrias do Estado de São Paulo, Instituto de Estudos do Comércio e Negociações Internacionais. *Outlook Brasil 2022 - projeções para o agronegócio* – São Paulo: 2012. 132 p.: il. ; 27 cm.

FINGERMAN, K. R. et al. Accounting for the water impacts of ethanol production. *ENVIRONMENTAL RESEARCH LETTERS*, v. 5, 2010.

FRAITURE, C. ET. AL. Biofuels and implications for agricultural water use: blue impacts of green energy. *Water Policy*, v. 10, n. S1, p. 67–81, fev. 2008.

FRITSCHÉ, U. R. et al. Direct and indirect land-use competition issues for energy crops and their sustainable production – an overview. *Biofuels, Bioprod. Bioref.*, v. 4, p. 692–704, 2010.

GBEP- Global Bioenergy Partnership. *The global bioenergy partnership sustainability indicators for bioenergy*. 2011

GERBENS-LEENES, W. et al. The water footprint of bioenergy. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 106, n. 25, p. 10219–23, 2009.

GERBENS-LEENES, W.; HOEKSTRA, A. Y. The water footprint of biofuel-based transport. *Energy Environ. Sci.*, v. 4, p. 2658–2668, 2011.

GIBBS, H. K. et al. Carbon payback times for crop-based biofuel expansion in the tropics: the effects of changing yield and technology. *ENVIRONMENTAL RESEARCH LETTERS*, v. 3, p. 10, 2008.

GRIESER, J. *et al.* New LocClim - the Local Climate Estimator of FAO. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 8, 08305, 2006.

GOLDEMBERG, J. The Brazilian biofuels industry. *Biotechnology for biofuels*, v. 1, n. 1, p. 7, jan. 2008.

GOLDEMBERG, J.; ET.AL. The sustainability of ethanol production from sugarcane. *Energy Policy*, v. 36, n. 6, p. 2086–2097, jun. 2008.

HASTINGS, E., PEGRAM, G. Literature Review for the Applicability of Water Footprints in South Africa, WRC Report No. 2099/P/11, Water Research Commission, Gezina, South Africa, 2012.

HOEKSTRA, A. Y. E CHAPAGAIN, A. K.. *Globalization of Water: Sharing the Planet's Freshwater Resources*, Blackwell Publishing, Oxford, 2008.

HOEKSTRA, A.Y., et al. *The water footprint assessment manual: Setting the global standard*, Earthscan, London, UK., 2011.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/>>.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Agropecuário 2006, Resultados Preliminares, 2006.

IEA - International Energy Agency. World Energy Outlook 2012, OECD/IEA, Paris.

IEA– International Energy Agency/ International Renewable Energy Agency. Global Renewable Energy Policies and Measures Database. Disponível em: <<http://www.iea.org/policiesandmeasures/renewableenergy/>>. Acesso em: agosto de 2013.

KING, C. W.; WEBBER, M. E. Water Intensity of Transportation. *Environmental Science & Technology*, v. 42, n. 21, 2008.

KOHLHEPP, G.. Análise da situação da produção de etanol e biodiesel no Brasil. *Estud. av.* [online]. 2010, vol. 24, n.68, pp. 223-253. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40142010000100017>>. Acesso em: dezembro 2012

LAPOLA, D. M. et al. Indirect land-use changes can overcome carbon savings from biofuels in Brazil. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 107, n. 8, p. 3388–93, 23 fev. 2010.

LATHUILLIÈRE, M. J. et al. Water use by terrestrial ecosystems : temporal variability in rainforest and agricultural contributions to evapotranspiration in Mato Grosso , Brazil. *ENVIRONMENTAL RESEARCH LETTERS*, v. 7, p. 12, 2012.

LIN, J. Governing Biofuels: A Principal-Agent Analysis of the European Union Biofuels Certification Regime and the Clean Development Mechanism. v. 1, n. September, p. 43–73, 2011.

LUIZ, A. et al. Plant development and yield of four sugarcane varieties irrigated by a subsurface drip irrigation system in Campinas , Brazil. v. 15, p. 11261, 2013.

MACEDO I. The Power of Cane Sugar (cane sugar energy: twelve studies on the sugar cane agribusiness and its sustainability). São Paulo: UNICA (União da Indústria de Cana-de-Açúcar), 2005

MANZATTO, C. V et. al.. Zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 55 p.

MAPA - Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento/Assessoria de Gestão Estratégica. BRASIL PROJEÇÕES DO AGRONEGÓCIO 2011/2012 a 2021/2022. Brasília, 2012.

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento/Secretaria de Produção e Agroenergia. Anuário Estatístico da Agroenergia, 2010.

MAPA.- Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Plano Nacional de Agroenergia 2006-2011 / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento,

Secretaria de Produção e Agroenergia, 2. ed. rev. - Brasília, DF : Embrapa Informação Tecnológica, 2006. 110 p.

MARENGO, J. A. Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI / José A. Marengo – Brasília: MMA, 2007. 2a edição.

MARKEVIČIUS, A. et al. Trends and sustainability criteria of the production and use of liquid biofuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, n. 9, p. 3226–3231, dez. 2010.

MEA - Millennium Ecosystem Assessment, 2005. ECOSYSTEMS AND HUMAN WELL-BEING: WETLANDS AND WATER Synthesis. World Resources Institute, Washington, DC.

Mekonnen, M.M. and Hoekstra, A.Y. (2010) The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products, Value of Water Research Report Series No. 47, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands. <http://www.waterfootprint.org/Reports/Report47-WaterFootprintCrops-Vol1.pdf>

MIN - Ministério da Integração Nacional. Retrato da irrigação no Brasil. 15.04.2013 Disponível em: < <http://www.integracao.gov.br/> /> Acesso em: julho de 2013.

MIYAKE, S. et al. Land-use and environmental pressures resulting from current and future bioenergy crop expansion : A review. v. 28, p. 650–658, 2012.

MME/EPE- Ministério de Minas e Energia / Empresa de Pesquisa Energética. Plano Decenal de Expansão de Energia 2021 / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2012.

NASSAR, A. M. et al. Biofuels and land-use changes : searching for the top model. *Focus*, p. 224–232, 2011.

PEREIRA JR., A. O. ET. AL. Energy in Brazil: Toward sustainable development? *Energy Policy*, v. 36, n. 1, p. 73–83, jan. 2008.

Ribeiro, N. V. Expansão Sucroalcooleira no Bioma Cerrado: Tendências, cenários e impactos. Universidade Federal de Goiás – Instituto de Estudos Sócio-ambientais, 2010. Tese de Doutorado.

SÃO PAULO (Estado). Lei n. 11.241, de 19 de setembro 2002. Dispõe sobre eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar. *Diário Oficial [do] Estado de São Paulo*, São Paulo, SP, 20 set. 2002.

SCHAFFEL, S. B.; LA ROVERE, E. L. The quest for eco-social efficiency in biofuels production in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, v. 18, p. 1663–1670, 2010.

SEMARH - Secretaria de meio ambiente e dos recursos hídricos, governo de Goiás. manual técnico de outorga. Manual Técnico de Outorga, 1ª versão 2012.

SILVA, A. L. B. O. et; al. Plant development and yield of four sugarcane varieties irrigated by a subsurface drip irrigation system in Campinas, Brazil. 2013. Geophysical Research Abstracts, Vol. 15, 2013.

SIMS, R. E. H. Bioenergy to mitigate for climate change and meet the needs of society, the economy and the environment. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, v. 8, n. 4, p. 349–370, 2003.

SMEETS, E. et al. The sustainability of Brazilian ethanol—An assessment of the possibilities of certified production. Biomass and Bioenergy, v. 32, n. 8, p. 781–813, ago. 2008.

SMEETS, E.; AL., E. The sustainability of Brazilian ethanol—An assessment of the possibilities of certified production. Biomass and Bioenergy, v. 32, n. 8, p. 781–813, ago. 2008.

SUGARCANE.ORG. Disponível em: <<http://sugarcane.org/>>.

TÁVORA, F. L. História e economia dos biocombustíveis no Brasil. Abr. 2011. Disponível em: <http://www.senado.gov.br/senado/conleg/textos_discussao/NOVOS%20TEXTOS/TD%2089%20-%20Fernando%20Lagares.pdf>. Acesso em: agosto de 2012.

UDOP – União dos Produtores de Bioenergia. Relação das unidades/destilarias no Brasil. Disponível em: <<http://www.udop.com.br/index.php?item=unidades>>. Acesso em: junho de 2013.

UE – União Européia, 2008. EP seals climate change package. PARLAMENTO EUROPEU, 17 Dez 2008. Disponível em: <<http://www.europarl.europa.eu/sides/getDoc.do?pubRef=-//EP//NONSGML+IM-PRESS+20081208BKG44004+0+DOC+PDF+V0//EN&language=EN>>. Acesso em outubro de 2013.

UE – União Européia, 2008a. More Sustainable Energy in Road Transport Targets. PARLAMENTO EUROPEU, 11 Set 2008. Disponível em: <http://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/infopress/20080909IPR36658/20080909IPR36658_en.pdf>. Acesso em outubro de 2013.

UNICA - União da Indústria de Cana-de-Açúcar. Protocolo Agroambiental. s/d disponível em < www.unica.com.br>. Acessado em: setembro de 2013.

UNICA – União das Indústrias de Cana-de-Açúcar, São Paulo - Brasil. Disponível em: <<http://www.unicadata.com.br>>.

UNICA. - União da Indústria de Cana-de-Açúcar. Protocolo Agroambiental. 2º Relatório de Sustentabilidade do setor sucroenergético, 2010. Disponível em <www.unica.com.br>. Acessado em: setembro de 2013.

USDA - Agricultural Projections to 2022. Office of the Chief Economist, World Agricultural Outlook Board, U.S. Department of Agriculture. Prepared by the

Interagency Agricultural Projections Committee. Long-term Projections Report OCE-2013-1, 105 pp.

WALTER, A. et al. Sustainability assessment of bio-ethanol production in Brazil considering land use change , GHG emissions and socio-economic aspects. *Energy Policy*, v. 39, p. 5703–5716, 2011.

WHO - World Health Organization. "International Program on Chemical Safety, Environmental Health Criteria 5: Nitrates, Nitrites, and N-Nitroso Compounds."2006.

YANG, H. et al. Land and water requirements of biofuel and implications for food supply and the environment in China. *Energy Policy*, v. 37, n. 5, p. 1876–1885, maio. 2009.