



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**



**WALLYSSON KLEBSON DE MEDEIROS SILVA**

**INFLUÊNCIA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO  
CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DA  
PARAÍBA**

**JOÃO PESSOA - PB**  
**2019**

**PPGER / MESTRADO ACADÊMICO / Nº 38**

**WALLYSSON KLEBSON DE MEDEIROS SILVA**

**INFLUÊNCIA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO CULTIVO DA CANA-DE-  
AÇÚCAR NO ESTADO DA PARAÍBA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em energias renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador  
Dr. Raphael Abrahão

**JOÃO PESSOA - PB  
2019**

S586i Silva, Wallysson Klebson de Medeiros.

INFLUÊNCIA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO CULTIVO DA  
CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DA PARAÍBA / Wallysson  
Klebson de Medeiros Silva. - João Pessoa, 2019.  
142 f. : il.

Orientação: Raphael Abrahão.  
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Saccharum officinarum. 2. Clima. 3. Economia.  
4. Meio ambiente. 5. Produção. 6. Agricultura. 7.  
Métodos quantitativos. 8. ACV. 9. Gases de efeito  
estufa. I.  
Abrahão, Raphael. II. Título.

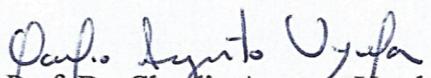
UFPB/BC

**WALLYSSON KLEBSON DE MEDEIROS SILVA**

**INFLUÊNCIA DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO CULTIVO DA CANA-  
DE-AÇÚCAR NO ESTADO DA PARAÍBA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em energias renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

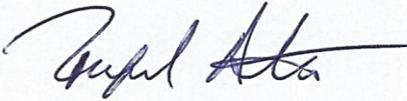
APROVADA em 22 de Fevereiro de 2019.

  
Prof. Dr. Claudio Augusto Uyeda

IFPE

  
Prof. Dr. Luiz Moreira Coelho Junior

UFPB

  
Orientador  
Dr. Raphael Abrahão

**JOÃO PESSOA - PB  
2019**

Dedico, a todos aqueles que acreditam que seja possível contribuir com a ciência brasileira como um fator de mudança social, mesmo em tempos tão sombrios como o que vivemos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que com sua infinita bondade me proporcionou força e perseverança de acreditar neste sonho. Agradeço a ele, pois esteve presente em todos os momentos, sempre estendendo sua mão para me guiar.

À minha família (Irenise e Jackson), que me apoiaram em minhas escolhas e por fazer dos meus sonhos os seus sonhos. À minha noiva Camila por me dedicar tanto amor, carinho, incentivo, compreensão, por me incentivar a sempre lutar pelos meus sonhos.

Ao Professor Raphael Abrahão pelas orientações, pela sua sinceridade, pela ajuda, pela educação, pela confiança, incentivo e força durante toda essa etapa. Agradeço ao orientador por não somente uma orientação, mas também pelo meu crescimento acadêmico, profissional e pessoal. Meus sinceros agradecimentos.

Aos Professores Luiz Moreira Coelho Junior, Monica Carvalho e Pablo Aurélio Lacerda de Almeida Pinto, pelas orientações, apoio, dedicação, paciência e conhecimentos adquiridos durante a elaboração dos artigos e das aulas.

A Claudio Augusto Uyeda, por ter se prontificado a participar da qualificação e defesa final desse trabalho, como também, pela colaboração de saberes e conhecimentos que enriqueceram a dissertação.

Aos colegas do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis (PPGER) pela amizade, trocas e experiências conjuntas. Em especial, Susane, Louise e Graziela pela ajuda, assistência e elaboração dos artigos.

Por fim agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – pelo apoio financeiro prestado, imprescindível para realização do trabalho.

## RESUMO

As mudanças climáticas representam um grande desafio para a agricultura do Brasil, devido à dependência dos cultivos a elementos climáticos como precipitação, umidade relativa do ar, temperatura e radiação solar. O objetivo deste trabalho foi analisar a influência das mudanças do clima no cultivo da cana-de-açúcar no Estado da Paraíba. Para tanto, utilizaram-se diferentes conjuntos de dados, a saber: dados meteorológicos de temperatura média, precipitação total e umidade relativa do ar, obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia; dados das culturas agrícolas temporárias obtidos do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística e do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada; dados de emissão de gases de efeito estufa extraídos do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa; além das bases de dados do SimaPro® e através de um experimento de campo realizado no município de Pedras de Fogo, no Estado da Paraíba. Realizaram-se cálculos através de métodos estatísticos (teste de tendência de Mann-Kendall e técnica de regressão linear múltipla), econométricos (regressão com dados em painel), econômico (shift-share) e de avaliação de ciclo de vida (avaliação de impactos ambientais). Os resultados evidenciaram que ocorreram impactos das variáveis climáticas na produção de cana-de-açúcar nos municípios paraibanos; a precipitação foi uma condicionante positivamente correlacionada e a temperatura influenciou negativamente. Foram observadas também tendências importantes, principalmente em relação à temperatura, com tendência de crescimento na maioria das estações meteorológicas analisadas e de decréscimo para a umidade relativa do ar. Percebeu-se uma resposta heterogênea dos impactos para as mesorregiões, com os municípios pertencentes à Mata Paraibana possuindo maior probabilidade de produção de cana-de-açúcar, em relação às outras mesorregiões. Na decomposição nos Efeitos Área (EA), Rendimento (ER) e Localização Geográfica (ELG) observou-se uma expansão heterogênea, sendo os ganhos de produtividade explicados pelo EA e o ELG, pois o ER evidenciou o baixo dinamismo agrícola. A decomposição do efeito área em efeitos escala e substituição da cana-de-açúcar e do abacaxi foram as que mais absorveram áreas, enquanto que o feijão foi o que mais cedeu áreas para as demais culturas. A aplicação da regressão linear múltipla mostrou que a quantidade produzida de cana-de-açúcar apresentou correlação positiva, significativa e crescente com os gases de efeito estufa ( $\text{CO}_2$  e  $\text{N}_2\text{O}$ ). De acordo com o estudo de avaliação do ciclo de vida, observou-se que a utilização do bio sólido como fertilizante para a cana-de-açúcar se mostrou mais viável

ambientalmente, com maior produtividade e menor emissão de dióxido de carbono produzido, contribuindo assim na redução da pegada de carbono e solucionando o problema da destinação final desse resíduo.

**Palavras-Chave:** Saccharum officinarum, Clima, Economia, Meio Ambiente, Produção, Agricultura, Métodos quantitativos, ACV, Gases de efeito estufa.

## ABSTRACT

Climate change poses a major challenge for Brazilian agriculture, due to the dependence of crops on climatic elements such as precipitation, relative humidity, temperature and solar radiation. The objective of this work was to analyze the influence of climate changes on the cultivation of sugarcane in the state of Paraíba. For this, different datasets were used, namely: meteorological data of average temperature, total precipitation and relative humidity, obtained from the National Institute of Meteorology; data from temporary agricultural crops obtained from the Brazilian Institute of Geography and Statistics and the Institute of Applied Economic Research; data on the emission of greenhouse gases extracted from the Greenhouse Gas Emissions and Removal Estimate System; in addition to the databases of SimaPro® and through a field experiment carried out in the municipality of Pedras de Fogo, in the state of Paraíba. Calculations were performed using statistical methods (Mann-Kendall trend test and multiple linear regression technique), econometric (regression with panel data), economic (shift-share) and life-cycle assessment environmental impacts). The results showed that there were impacts of climatic variables on the production of sugarcane in the municipalities of Paraíba; the precipitation was a positively correlated conditioner and the temperature influenced negatively. Significant trends were also observed, mainly in relation to temperature, with a tendency to grow in the majority of the meteorological stations analyzed and to decrease to the relative humidity of the air. A heterogeneous response of impacts to the mesoregions was observed, with municipalities belonging to Mata Paraibana having a higher probability of producing sugarcane compared to other mesoregions. In the decomposition of Area Effects (EA), Yield (ER) and Geographic Location (ELG) a heterogeneous expansion was observed, with productivity gains explained by EA and ELG, since the ER showed the low agricultural dynamism. The decomposition of the area effect on scale and substitution effects of sugarcane and pineapple were the ones that absorbed the most areas, while the beans yielded more areas for the other crops. The application of multiple linear regression showed that the amount of sugarcane produced had a positive and significant correlation with the greenhouse gases (CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O). According to the life cycle assessment study, the use of biosolids as fertilizer for sugarcane proved to be more environmentally viable, with higher productivity and lower emissions of produced carbon dioxide, reducing the carbon footprint and solving the problem of final destination of this waste.

**Keywords:** Saccharum officinarum, Climate, Economics, Environment, Production, Agriculture, Quantitative methods, LCA, Greenhouse gases.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1:</b> Mudanças das médias globais do aquecimento do planeta.....	21
<b>Figura 1.2:</b> Ciclo fenológico da cana-de-açúcar.....	28
<b>Figura 1.3:</b> (a) Precipitação total anual (em: mm) e (b) Temperatura média anual (em: °C) do Brasil, Nordeste e Paraíba entre 1961 e 2015.....	30
<b>Figura 1.4:</b> Produção anual de cana-de-açúcar na Paraíba em milhões de toneladas (106 t) da cana-de-açúcar na Paraíba entre 1931 e 2015.....	31
<b>Figura 1.5:</b> Fases da avaliação do ciclo de vida.....	35
<b>Figura 2.1:</b> Localização das estações meteorológicas estudadas no Estado da Paraíba, com destaque para as quatro mesorregiões do Estado.....	39
<b>Figura 2.2:</b> (a) Temperatura média anual (°C), (b) Precipitação total anual (mm) e (c) Umidade relativa do ar média anual (%) da estação de Areia, Campina Grande, João Pessoa, Monteiro, Patos e Sousa.....	43
<b>Figura 2.3:</b> Área colhida da cana-de-açúcar nas mesorregiões do Estado da Paraíba entre os anos de 1973 a 2016.....	50
<b>Figura 3.1:</b> Mapa de localização do Estado da Paraíba no Brasil, com divisão das mesorregiões.....	61
<b>Figura 3.2:</b> Evolução da temperatura média (°C) e precipitação total (mm) no Estado da Paraíba, no período de 1990 a 2015.....	69
<b>Figura 4.1:</b> Resíduos do modelo $\text{Pred}(\text{Área plantada de cana-de-açúcar}) / \text{Área plantada de cana-de-açúcar}$ no período de 2000 a 2016 no Estado da Paraíba.....	96
<b>Figura 5.1:</b> Abrangência da Avaliação do Ciclo de Vida.....	105
<b>Figura 5.2:</b> Categorias midpoint e endpoint, assim como as suas relações em uma ACV.....	106
<b>Figura 5.3:</b> Categorias de impacto e categorias de dano do método Eco-indicator 99.....	107
<b>Figura 5.4:</b> Contribuição relativa das 11 categorias de impacto para o índice único, na abordagem (H/A).....	108
<b>Figura 5.5:</b> Contribuição às categorias de dano do Eco-indicator 99 (H/A) para o fertilizante comercial e o biossólido 1x.....	115

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.1:</b> Evolução da Produção da cana-de-açúcar no Brasil, Nordeste e Paraíba, no período de 1990 a 2015, em milhões toneladas ( $10^6$ t).....	29
<b>Tabela 2.1:</b> Localidades elegidas do Estado da Paraíba com intervalo da série, coordenadas geográficas e altitude.....	40
<b>Tabela 2.2:</b> Valores médios anuais e mensais de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), precipitação total (mm) e umidade relativa do ar (%) das estações convencionais da Paraíba para o período 1950 a 2016.....	44
<b>Tabela 2.3:</b> Tendências de temperatura média ( $^{\circ}\text{C}$ ) mensal e anual apontadas pelo teste de Mann-Kendall e quantificadas pelo declive de Sen para as estações convencionais da Paraíba.....	46
<b>Tabela 2.4:</b> Tendências da precipitação total (mm) mensal e anual apontados pelo teste de Mann-Kendall e quantificadas pelo declive de Sen para as estações convencionais da Paraíba.....	48
<b>Tabela 2.5:</b> Tendências na umidade relativa do ar (%) apontados pelo teste de Mann-Kendall e quantificadas pelo declive de Sen para para as estações convencionais da Paraíba.....	49
<b>Tabela 2.6:</b> Tendências da área colhida (ha) e produção (t) da cana-de-açúcar apontadas pelo teste de Mann-Kendall e quantificadas pelo declive de Sen para as mesorregiões da Paraíba no período de 1973 a 2016.....	51
<b>Tabela 3.1:</b> Evolução da produção da cana-de-açúcar nas mesorregiões da Paraíba, para os anos de 1990, 1995, 2000, 2005, 2010 e 2015, em milhões de toneladas ( $10^6$ t).....	70
<b>Tabela 3.2:</b> Testes econométricos para escolha do modelo de dados em painel para produção de cana-de-açúcar da Paraíba, no período de 1990 a 2015.....	71
<b>Tabela 3.3:</b> Resultado das estimativas dos impactos das variáveis climáticas na produção de cana-de-açúcar pelo modelo pooled para as mesorregiões do Estado da Paraíba de 1990 a 2015.....	72
<b>Tabela 4.1:</b> Evolução da produção das principais culturas da Paraíba para os anos de 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 e 2017, em mil toneladas ( $10^3$ t).....	89

<b>Tabela 4.2:</b> Evolução das emissões de CO <sub>2</sub> -eq (103 t) na agricultura no Estado da Paraíba, para os anos de 2000, 2002, 2004, 2006, 2008, 2010, 2012, 2014 e 2016.....	91
<b>Tabela 4.3:</b> Decomposição da variação da área (efeitos escala e substituição), em ha, da cana-de-açúcar no Estado da Paraíba e da mesorregião Mata Paraibana, período de 1990-2017, 2000-2017, 2010-2017.....	92
<b>Tabela 4.4:</b> Taxa de crescimento da produção (efeitos área, rendimento e localização geográfica), em %, dos dez municípios com maior produção da cana-de-açúcar do Estado da Paraíba, período entre 1990 a 2017.....	94
<b>Tabela 4.5:</b> Parâmetros estimados pela análise de regressão múltipla e correlação das emissões de CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O e NO <sub>x</sub> em tonelada de cana-de-açúcar no Estado da Paraíba, 2000 a 2016.....	96
<b>Tabela 5.1:</b> Inventário da fertilização da cana-de-açúcar utilizando os fertilizantes químicos no experimento.....	110
<b>Tabela 5.2:</b> Inventário da fertilização da cana-de-açúcar utilizando o biossólido industrial no experimento.....	111
<b>Tabela 5.3:</b> Pegada de carbono associada ao uso da fertilização química comercial no cultivo da cana-de-açúcar.....	111
<b>Tabela 5.4:</b> Pegada de carbono associada ao uso do biossólido industrial como fertilizante no cultivo da cana-de-açúcar.....	112
<b>Tabela 5.5:</b> Impactos ambientais associados ao uso da fertilização química comercial no cultivo da cana-de-açúcar calculados por meio do Eco-indicator 99 (H/A).....	113
<b>Tabela 5.6:</b> Impactos ambientais associados ao uso do biossólido industrial como fertilizante no cultivo da cana-de-açúcar calculados por meio do Eco-indicator 99 (H/A).....	114
<b>Tabela 5.7:</b> Produtividade da cana-de-açúcar alcançada para cada tratamento e emissões geradas e pontuação de impacto ambiental em relação à quantidade produzida.....	115

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas  
AESA - Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba  
ASPLAN - Associação de Plantadores de Cana da Paraíba  
ACV- Avaliação do Ciclo de Vida  
CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento  
CES - Constant Elasticity of Substitution  
CH<sub>4</sub> - Metano  
CO<sub>2</sub> - Dióxido de carbono  
CRU - Climate Research Unit  
EA - Efeito Área  
ELG - Efeito Localização Geográfica  
ER - Efeito Rendimento  
FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations  
GEE - Gases de Efeito Estufa  
GWP - Global Warming Potential  
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia  
IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change  
IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada  
ISO - International Organization for Standardization  
MQG - Mínimos Quadrados Generalizados  
MQO - Mínimos Quadrados Ordinários  
N<sub>2</sub>O - Óxido nitroso  
NO<sub>x</sub> - Óxido de nitrogênio  
OMM - Organização Meteorológica Mundial  
OMC - Organização Mundial de Comércio  
PIB - Produto Interno Bruto  
PB – Paraíba  
PND - Plano Nacional de Desenvolvimento  
POLs - Pooled Ordinary Least Squares  
PPGER – Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis

PROÁLCOOL - Programa Nacional do Álcool

R<sup>2</sup> - Coeficiente de Determinação

RENOVABIO - Política Nacional de Biocombustíveis

SEEG - Sistema de Estimativa de Emissão de Gases Estufa

SIDRA - Sistema de Recuperação Automática

TGC - Taxa Geométrica de Crescimento

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>18</b>
<b>1.1. OBJETIVOS.....</b>	<b>20</b>
<b>1.2. REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>20</b>
<b>1.2.1. Mudanças climáticas.....</b>	<b>20</b>
<b>1.2.2. Clima e agricultura.....</b>	<b>21</b>
<b>1.2.3. Função de produção e crescimento econômico na agricultura.....</b>	<b>24</b>
<b>1.2.4. Cultura da cana-de-açúcar.....</b>	<b>27</b>
<b>1.2.5. Análise comparativa da produção de cana-de-açúcar, temperatura e precipitação entre Paraíba, Nordeste e Brasil.....</b>	<b>29</b>
<b>1.2.6. Gases de efeito estufa e seu impacto na agricultura.....</b>	<b>31</b>
<b>1.2.7. Biossólido como alternativa sustentável na cultura canavieira.....</b>	<b>33</b>
<b>1.2.8. Avaliação do ciclo de vida.....</b>	<b>34</b>
<b>CAPÍTULO 2 - ARTIGO: Análise de tendências climáticas sobre o cultivo da cana-de-açúcar no Estado da Paraíba.....</b>	<b>36</b>
<b>2.1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>37</b>
<b>2.2. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>39</b>
<b>2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>42</b>
<b>2.4 CONCLUSÃO.....</b>	<b>53</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>54</b>
<b>CAPÍTULO 3 - ARTIGO: Efeitos das mudanças climáticas na produção da cana-de-açúcar no Estado da Paraíba (Brasil): uma abordagem de dados em painel (1990-2015).....</b>	<b>58</b>
<b>3.1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>59</b>
<b>3.2. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>61</b>
<b>3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>69</b>
<b>3.4 CONCLUSÃO.....</b>	<b>74</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>75</b>

<b>CAPÍTULO 4 - ARTIGO: Dinâmica e expansão da cana-de-açúcar na Paraíba (Brasil): uma análise dos impactos dos gases de efeito estufa.....</b>	<b>79</b>
<b>4.1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>80</b>
<b>4.2. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>82</b>
<b>4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>89</b>
<b>4.4. CONCLUSÃO.....</b>	<b>98</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>98</b>
<b>CAPÍTULO 5 - ARTIGO: Pegada de carbono da fertilização no cultivo da cana-de-açúcar utilizando biossólido e fertilizante comercial.....</b>	<b>103</b>
<b>5.1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>104</b>
<b>5.2. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>105</b>
<b>5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>111</b>
<b>5.4. CONCLUSÃO.....</b>	<b>117</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>118</b>
<b>CAPÍTULO 6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>123</b>
<b>REFERÊNCIAS DE TODA A DISSERTAÇÃO.....</b>	<b>125</b>

## CAPÍTULO 1

### **INTRODUÇÃO GERAL**

A mudança climática é um dos grandes desafios para a humanidade contemporânea. Há evidências científicas sobre as alterações que estão se manifestando e também sobre a relação entre estas e as atividades que causaram. Uma das maiores preocupações em todo o mundo é a influência que o aquecimento global teve e terá. Por isso, existe uma grande preocupação com a mudança climática, nos diferentes setores econômicos, principalmente nos países em desenvolvimento, como o Brasil, que expressam maior vulnerabilidade e menor resiliência em sua população (JONES; MANN, 2004; STOTT *et al.*, 2004; IPCC, 2014).

As observações científicas, que começaram há algumas décadas atrás, detectaram um aquecimento global do planeta, bem como um aumento na frequência de eventos extremos, que são evidenciados através de inundações, secas, ondas de calor e outros efeitos. Essas alterações são ocasionadas principalmente por atividades antrópicas, como: a queima de combustíveis fósseis, poluição, desmatamento, queimadas, uso de fertilizantes químicos na agricultura, com o objetivo de aumentar a produtividade, causando maiores concentrações de CO<sub>2</sub> atmosférico, dentre outros efeitos (IPCC, 2014).

A alteração dos padrões climáticos certamente afetará a produção e produtividade agrícola, de diferentes formas, em conformidade com os tipos de práticas agrícolas, sistemas e período de produção, culturas, variedades e zonas de impacto. Estima-se que os principais efeitos diretos, decorrentes das variações de temperatura e precipitação, principalmente, seriam na duração dos ciclos de cultivo, alterações fisiológicas por exposição a temperaturas fora do limite permitido, deficiências de água e resposta a novas concentrações atmosféricas de CO<sub>2</sub> (WATSON *et al.*, 1997).

Considera-se a agricultura uma das principais atividades econômicas do Brasil, devido sua importância no Produto Interno Bruto (PIB), com destaque para o cultivo da cana-de-açúcar. Atualmente, o maior produtor mundial e responsável pela produção de açúcar, aguardente, melão, álcool combustível, biodiesel, dentre outros derivados da planta. No Estado da Paraíba, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017), a cana-de-açúcar é maior produto agrícola produzido no Estado, com uma produtividade média de 44,33 toneladas/ha e uma produção de 5,53 bilhões de toneladas.

Segundo Cesar *et al.* (1987) diversos fatores intervêm na produção canavieira, sendo os principais: a influência climática, fertilidade do solo, manejo da cultura e o cultivo selecionado. Figueiredo *et al.* (2008), Cardoso e Sentelhas (2013), Nelson *et al.* (2014) concordam que o clima é o fator com maior ação na produção da cultura. Sendo assim, temperatura, precipitação, radiação solar e umidade relativa do ar são os principais elementos climáticos que interferem no crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar.

As informações de produtividade e produção da cana-de-açúcar são essenciais para o planejamento das atividades sucroalcooleiras e uma das formas mais utilizadas para estudar o impacto de uma mudança climática na agricultura é por meio de modelos computacionais e matemáticos, de simulação e tendências. A análise de tendências de elementos climáticos colabora para uma melhor avaliação de projeções e variações, ajudando na construção de políticas de mitigação e adaptação, voltadas para a agricultura e alterações do clima.

A dissertação foi organizada em forma de “artigos científicos” desenvolvida da seguinte maneira: Na introdução geral foi apresentado o embasamento teórico necessário para o entendimento do tema estudado, com definições e esclarecimentos a respeito da mudança climática, clima e agricultura, função de produção e crescimento econômico na agricultura, cultura da cana-de-açúcar, gases de efeito estufa na agricultura, biossólido, avaliação de ciclo de vida e uma análise comparativa da produção da cana-de-açúcar, temperatura e precipitação entre Paraíba, Nordeste e Brasil.

O capítulo 2 apresenta as tendências climáticas sobre o cultivo da cana-de-açúcar no estado da Paraíba, utilizando o teste estatístico de Mann-Kendall e complementado pelo estimador de declive de Sen. O capítulo 3 mostra os efeitos das mudanças climáticas na produção da cana-de-açúcar no estado da Paraíba através de uma abordagem de dados em painel.

O capítulo 4 avaliou a dinâmica e expansão da cana-de-açúcar na Paraíba por meio de uma análise dos impactos dos gases de efeito estufa através do método shift-share e regressão linear múltipla e por fim no capítulo 5 foi aplicado a metodologia da avaliação do ciclo de vida para analisar e quantificar os impactos ambientais associados ao uso de biossólido industrial e de fertilização química comercial para a produção de cana-de-açúcar, cujo métodos escolhidos foram o *Global Warming Potential (GWP)* do IPCC, versão 2013 e o Eco-indicator 99.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo geral**

Analisar a influência das mudanças do clima no cultivo da cana-de-açúcar no Estado da Paraíba.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

- Analisar a influência de variações e tendências climáticas no cultivo da cana-de-açúcar no Estado da Paraíba, de modo a investigar quais as consequências da temperatura, da umidade do ar e das mudanças no regime de precipitação na cultura canavieira.
- Analisar os impactos potenciais dos elementos climáticos na produção de cana-de-açúcar para os municípios do Estado da Paraíba (Brasil), no período de 1990 a 2015.
- Avaliar a dinâmica e expansão da cana-de-açúcar na Paraíba (Brasil) sob uma análise dos impactos dos gases de efeito estufa.
- Analisar e quantificar os impactos ambientais associados ao uso de biossólido industrial e de fertilização química comercial para a produção de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum L.*), variedade RB92579, para assim avaliar qual método de fertilização é mais viável ambientalmente.

## **1.2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **1.2.1 Mudanças climáticas**

De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), a mudança climática é uma variação estatisticamente significativa de um estado médio do clima ou de sua variabilidade, a longo prazo, para um determinado local (IPCC, 2014).

Evidências científicas têm advertido para o aquecimento global, pois a temperatura global média cresceu em 0,85 °C de 1880 a 2012. Após 1850, cada década foi considerada mais quente que sua antecessora. Projeções a longo prazo indicam que a temperatura média do planeta pode superar 4,0 °C até 2100. As implicações são preocupantes, induzindo na transmissão de doenças, alteração no volume de precipitação, produtividade das culturas, no

ritmo das estações climáticas e em outros impactos sociais, ambientais e econômicos (IPCC, 2014).

Os motivos das mudanças climáticas são de origem natural e/ou antrópica. A Figura 1.1 evidenciou a ação do homem como o principal responsável pelo aquecimento global. O crescente aumento da temperatura na superfície da terra e do oceano, bem como os conteúdos de calor do oceano. A diferença entre as forças naturais (faixa cinza escuro) e naturais mais antrópica (faixa cinza claro) são bastante expressivas.

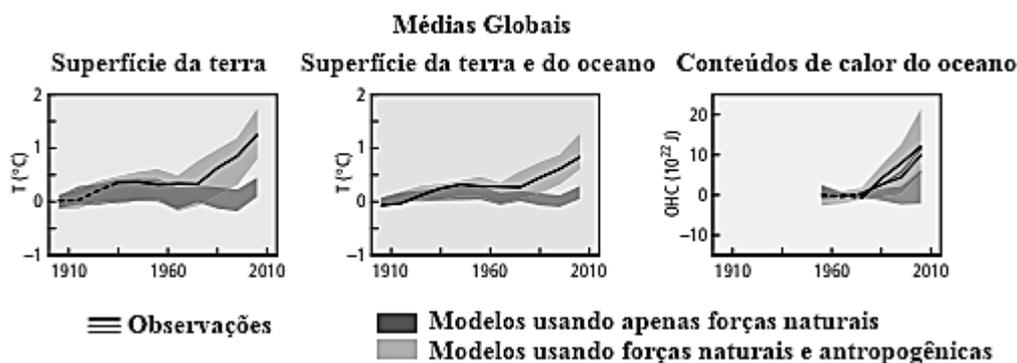


Figura 1.1 - Mudanças das médias globais do aquecimento do planeta.

Fonte: IPCC (2014).

Desde a Revolução Industrial, o homem passou a emitir quantidades significativas de gases de efeito estufa. Os aumentos da liberação desses gases estão seguindo o cenário das mais altas emissões (2ppm/CO<sub>2</sub>/ano), desde 1750, houve um aumento das concentrações de dióxido de carbono (40%), metano (150%) e óxido nitroso (20%). Este processo se tornou ainda mais significativo, por exemplo, devido aos seus impactos intensos, como as alterações nas correntes marinhas e nos ventos (podendo modificar as características climáticas de qualquer lugar do globo), derretimento do gelo no Ártico, poluição, desmatamento de florestas, queimadas, alterações no período de floração e crescimentos nas plantas, além da perda de biodiversidade (IPCC, 2014).

### 1.2.2 Clima e agricultura

Com as transformações impulsionadas pelo desenvolvimento das áreas urbanas e agrárias, o processo de industrialização se intensificou e, assim, proporcionou uma maior degradação do ecossistema. Essas atividades econômicas vêm resultando na ampliação de emissões de gases do efeito estufa, através da agricultura e uso da terra, por meio de atividade

antrópicas, como queima de combustíveis fósseis e desmatamento (MANNING; TIEDEMANN, 1995). Esses fatores vêm causando alterações climáticas, como o aumento da temperatura e mudanças na precipitação e nos ventos.

As pesquisas no Brasil, envolvendo os fatores climáticos e sua influência na agricultura, começaram a ter notoriedade a partir da década de 1990. Foi a partir da negociação do acordo de Bali, em 2013, na 9ª Conferência Ministerial da Organização Mundial de Comércio (OMC) em Bali que aumentaram os debates sobre a temática. Nesta conferência, destacou-se a proposta de estabilização da concentração dos gases do efeito estufa, na agricultura (GIDDENS, 2009).

Segundo o IPCC (2014), cerca de 20% das emissões dos gases do efeito estufa foram do setor agrícola, outros 14% associados ao uso da terra na agricultura, totalizando 34% da emissão. Conforme os dados do Sistema de Estimativa de Emissão de Gases Estufa (SEEG, 2018), 68% das emissões brasileiras de CO<sub>2</sub> vêm da agricultura, sendo 22% da agropecuária e 46% da mudança de uso da terra e floresta. Mas, no Estado da Paraíba, apenas 20% vem do setor agropecuário e 13% pelo uso da terra, totalizando 33%.

Ao estudar o clima e sua influência na agricultura, Marengo (2001) percebeu que o aquecimento e o grau de previsibilidade alteram de acordo com a Região brasileira. Estimou-se, por década, um aquecimento de 0,1 °C a 0,4 °C nos meses de dezembro a fevereiro, e 0,2 °C a 0,6 °C entre junho e agosto. Os locais que mais devem aquecer no Brasil são as regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste e os menores no Sudeste. Quanto à variável precipitação, o Sul deverá tornar-se mais úmido, enquanto parte do Norte deverá ficar mais seco, já o Nordeste ficará mais úmido entre os meses de dezembro e maio, mais seco de junho a novembro.

O setor agropecuário destaca-se como um setor sensível às alterações do clima. Em regiões de baixas temperaturas, as mudanças climáticas poderão impulsionar a produtividade, melhorar as lavouras e aumentar o processo de desmatamento do setor, enquanto que, nas regiões mais quentes, na qual as temperaturas estão próximas ao limite de tolerância das culturas agrícolas, poderá ocasionar decréscimo de produtividade e alteração na estrutura produtiva e no padrão de uso da terra (FÉRES *et al.*, 2009).

Pinto e Assad (2008), Domingues *et al.* (2011), Margulis *et al.* (2010), Cunha *et al.* (2015), indicam prejuízos econômicos, no qual tornou-se uma questão estratégica, devido

ao seu impacto<sup>1</sup> no Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro. Sabe-se que, mesmo com os avanços tecnológicos na agricultura, o clima ainda é a variável mais importante e que mais afeta na produtividade agrária. Para Ayoade (2010), o clima influencia a agricultura e determina sua viabilidade numa determinada área. Esse pensamento retrata o valor do clima, como variante reguladora na produção dos espaços agrícolas, sendo a agricultura a atividade econômica que mais se suscitibiliza com variabilidade climática que se reproduz pela instabilidade das chuvas e variações da temperatura.

A agricultura em regiões tropicais é uma das atividades econômicas mais vulneráveis ao aquecimento global. As culturas já adaptadas ao clima nessas regiões sofrerão com temperaturas mais altas e mudanças na distribuição pluviométrica, no decorrer do tempo. Para Pinto *et al.* (2010) as mudanças climáticas poderão alterar as condições agrícolas de determinadas regiões, fazendo com que, algumas culturas necessitem migrar para outros locais, devido as alterações na temperatura e precipitação, que farão com que as culturas deixem de ser aptas para o cultivo.

Féres *et al.* (2009) averiguaram que, para a Região Nordeste, as alterações do clima farão com que a produtividade de diversas culturas como do feijão, soja, algodão, cana-de-açúcar tenham quedas de produção. Pinto e Assad (2008), ressaltam que 95% das perdas poderão ocorrer devido as inundações e secas. Tais acontecimentos tendem a acontecer com mais frequências, devido às mudanças climáticas. Marengo e Valverde (2007) reforçam que as tendências para o Nordeste serão de diminuição de chuvas e elevação da temperatura, para o final do século XXI.

Ao analisarem o efeito estufa em produções nacionais do trigo, soja e milho, os autores Siqueira *et al.* (1994) empregaram modelos de simulação de crescimento de cultura, com base em dados climáticos de 1951 a 1980 e concluíram que vem ocorrendo um decréscimo nas produções de milho e trigo e ampliação na de soja. Já Nobre e Assad (2005) em seu estudo, obteve como resultado que o arroz, café, feijão, milho e soja sofrerão redução em sua produção no Brasil, destacando que a soja deve ser a cultura com maior prejuízo, podendo chegar a 60% na produção e área plantada.

Pinto e Assad (2008) destacam que a ausência de políticas públicas voltadas a adaptação e mitigação frente às mudanças climáticas, fará com que a produção agrícola sofra prejuízos bastante significativos. Sobre isto, o Relatório Stern é uma das investigações mais

---

<sup>1</sup> O setor agrícola representa 48% das exportações brasileiras, com saldo comercial significativo de US\$ 72,5 bilhões acumulado em 2016. Além de configurar cerca de 30% do PIB brasileiro (CNA, 2017).

utilizadas, pois a mesma constatou que, os custos totais vão ser semelhantes a um prejuízo de no mínimo 5% do PIB global por ano, até 2050 (STERN, 2006).

Dessa maneira, a importância da agricultura se impõe através de um processo de adequação às mudanças climáticas como uma resposta da nossa civilização aos desafios que o aquecimento global nos estabeleceu. Para isso, dispõe-se o fato de que há uma necessidade de ampliação de demanda de produção por produtos agrícolas para satisfazer as necessidades atuais e futuras, sem prejudicar a sustentabilidade ambiental.

### **1.2.3 Função de produção e crescimento econômico na agricultura**

O processo de transformação da agricultura entre 1960 a 1980, acarretada pela modernização agrícola, colaborou para o crescimento econômico brasileiro, contribuindo para consolidação do setor. Diante disso, a agricultura passou a ter grande importância na formação do produto nacional, ao mesmo momento que traduz a mudança estrutural característica do crescimento, acentuando o valor crítico deste setor de produção (CONCEIÇÃO; CONCEIÇÃO, 2014).

Nesse contexto, o método pioneiro nas análises de impactos das alterações climáticas sobre o setor agrícola foi denominado como modelo da função de produção, no qual é fundamentado em estimativas de produtividade de cada cultura perante diversos cenários climáticos. Dessa forma, com objetivo de maiores ganhos de produtividade, utilizar os modelos de crescimento econômico na agricultura, passou a ser fundamental, para um melhor embasamento teórico da influência da função de produção.

Um dos principais modelos de crescimento econômico, o modelo Harrod-Domar, destaca que a economia era formada por uma função de produção do tipo Lenotief, ou seja, uma tecnologia de produção com extensões fixas para os fatores de produção e uma razão capital/produto fixo. Acentuava ainda, que a força de trabalho crescia a uma taxa constante exógena. Já o Modelo neoclássico do crescimento econômico, mais conhecido como Modelo de Solow, focaliza no estudo sobre quatro variáveis: avanço tecnológico, capital, produto real e trabalho. A função de produção expõe como os insumos são determinados para gerar o produto, enquanto que o Modelo endógeno de crescimento econômico tinha como particularidade básica, a carência de restrições ao crescimento de longo prazo, devido à existência de rendimentos não decrescentes no fator de produção e seu valor oferecido à inovação no processo de crescimento econômico (AMORIM, 2008).

A função de produção pode ser determinada de acordo com a natureza que o pesquisador pretende analisar. As principais funções de produção são: Função de produção Cobb-Douglas, Função de produção de Leontief e Função de produção *Constant Elasticity of Substitution* (CES). A função de produção CES apresenta a oportunidade de substituição entre os fatores de produção. Enquanto que a função Cobb-Douglas implica na substituição imperfeita entre os fatores de produção e retornos constantes à escala (SOUSA *et al.*, 2013). Já a Função de produção Leontief os fatores de produção não são substituíveis, sendo complementos perfeitos, dessa forma, tornam-se produtivos à medida que ocorra uma combinação em uma determinada proporção. Uma das diferenças entre a função de produção CES e Cobb-Douglas, é que a CES possui elasticidade de substituição  $\sigma = 0$ , com uma isoquanta em formato de L, enquanto que a Cobb-Douglas, detêm de uma elasticidade de substituição  $\sigma = 1$ .

Para estudos envolvendo questões ambientais, recursos naturais e mudanças climáticas, a função de produção mais indicada é a de elasticidade de substituição da CES, uma vez que a hipótese do grau de substitutibilidade entre os fatores produtivos, dentre outras hipóteses, podem ser averiguadas. A função de produção CES pode ser calculada pelo seguinte procedimento:  $\sigma = \frac{1}{1 + \rho}$ , em que  $\rho$  é parâmetro de substituição. Se nessa sentença  $\rho \rightarrow 0$ , a elasticidade de substituição volta-se para um, na qual demonstra uma função Cobb-Douglas, e os insumos equivalem a bens substitutos imperfeitos. Se  $\rho \rightarrow \infty$ , a elasticidade de substituição tende para zero e a função CES tende para uma Leontief, onde se associam grandezas mínimas entre os fatores de produção, isto é, ocorre uma relação de correção. No entanto, se  $\rho$  tender para  $-1$  a função CES encaminhar-se para uma função linear e a elasticidade de substituição tende para o infinito. Neste cenário, há um processo de substituição perfeita entre os fatores de produção (SOUSA *et al.*, 2013).

O estudo da função de produção na agricultura faz-se imprescindível, pois conforme Gomes e Baptista (2004) esse aprofundamento torna-se uma significativa ferramenta para a pesquisa do setor. Sua compreensão propicia a tomada de decisão e atribuição dos recursos escassos, impulsionando toda a produção do local.

Dessa forma, a função de produção pode ser determinada como a relação que demonstra a quantidade máxima que se pode alcançar de um produto, por unidade de tempo, por meio do uso de uma determinada quantidade de fatores de produção, através da escolha do processo de produção mais apropriado (VARIAN, 2015).

Esta pode ser generalizada, com dois ou mais fatores de produção que relacionam o máximo de nível de produção por unidade de tempo ( $Y$ ), que pode ser alcançada, através de dadas quantidades desses ( $n$ ) insumos. A função de produção pode ser escrita como mostrada na equação 1.1.

$$Y = f (X_1, X_2, X_3, \dots X_n) \quad (1.1)$$

Com base em Fleischer *et al.* (2007), para obter a função de produção agrícola, faz-se a derivada parcial da função de produção em relação ao fator, combinando-se, por meio de variáveis endógenas ( $d$ ), variáveis exógenas ( $x$ ) e variáveis características do agricultor ( $g$ ), mostrada na equação 1.2.

$$Q_t = f (g_t, x_t, d_t) \quad (1.2)$$

Onde,

$Q$ : Nível de produção;

$g$ : Características do agricultor (incluído capital humano);

$d$ : Fatores de Produção (capital, trabalho, insumos);

$x$ : Variáveis climáticas (Temperatura, Chuva, etc);

$t$ : Tempo ou período considerado.

A partir dessa equação, têm-se preliminarmente subsídio para sabermos o grau de impacto ao longo do tempo das variáveis climáticas ( $x$ ). Aplicando as variáveis climáticas na função da produção agrícola, Ruiz de Castilla (2010), propõe um modelo de condição funcional quadrática, por determinar de maneira mais eficaz as variáveis explicativas estimadas. Sendo assim, a função lucro de um agricultor, com produção de  $n$  cultivos no tempo  $t$  pode ser apresentada conforme a equação 1.3.

$$\pi = \sum^N p_{jt} Q_{jt} (g_t, x_t, d_{jt}) - w_t x_{jt} \quad j = 1, 2, \dots n \text{ cultivos} \quad (1.3)$$

Onde,

$p_j$ : Preço do produto  $j$ ;

$w$ : Preço dos insumos do produto  $j$ .

A lei dos rendimentos decrescentes acontece em formato *sigmoidal*, sendo caracterizado pelo crescimento, essencialmente rápido, até alcançar o ponto de inflexão, quando passa a crescer em menores proporções, até atingir estabilização no crescimento, identificada como valor máximo da produção (ASSMANN, 1970). Levando em consideração os fatores climáticos, suas variáveis afetarão o rendimento agrícola de forma

positiva, mas ao alcançar o ponto ótimo de produção, o clima começará a impactar negativamente nos rendimentos.

O documento técnico da Cepal (2010) salienta que as variáveis endógenas ( $d$ ) não são empregadas, tendo em vista que o modelo pressupõe que os agricultores buscam maximizar seus lucros e, assim, designam a quantidade de insumos ( $d$ ) já conduzindo-se de acordo com as variáveis exógenas ( $x$ ). No que diz respeito às características do agricultor ( $g$ ), Ruiz de Castilla (2010), salienta que este é um dado que se tem através de corte-transversal e não por modelos de séries de tempo.

Assim, a função de produção relaciona a quantidade ou o valor da produção ao conjunto de insumos empregados no seu processo produtivo. Ressalta-se que boa parte das funções da produção, deixam de lado a dimensão espacial ou utilizam em grau limitado o processo produtivo (ALMEIDA, 2005). Logo, necessita-se de uma progressão na composição de um conceito de função de produção, tanto na esfera da estimação, quanto da especificação.

Conhecer a função de produção e sua relação com a agricultura permite que os tomadores de decisão levem em consideração não apenas o crescimento econômico como também a problemática da mudança climática e suas influências na quantidade produzida dos fatores de produção.

#### **1.2.4 Cultura da cana-de-açúcar**

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) foi introduzida no Brasil no período colonial e desde então se transformou em uma das principais atividades da economia brasileira (REZENDE; RICHARDSON, 2015). Fundamentalmente, pode ser considerada como uma planta típica de clima tropical e subtropical, com ciclo vegetativo extenso, permanecendo no solo ao longo de todas as estações do ano e, em razão disso, sua produtividade se torna muito influenciada por variáveis climáticas (VAREJÃO-SILVA; BARROS, 2001).

A cana-de-açúcar é uma espécie da família Poaceae (gramíneas) com fotossíntese do tipo C4, que comparece de um metabolismo de incorporação de CO<sub>2</sub> e alta taxa fotossintética. Tem como características o contorno de inflorescência em espiga, o desenvolvimento do caule em colmos, as folhas com lâminas de sílica em suas bordas e com bainha aberta (DIOLA; SANTOS, 2012; SEGATO *et al.*, 2006). A Figura 1.2 mostra o ciclo fenológico de desenvolvimento da cana-de-açúcar.

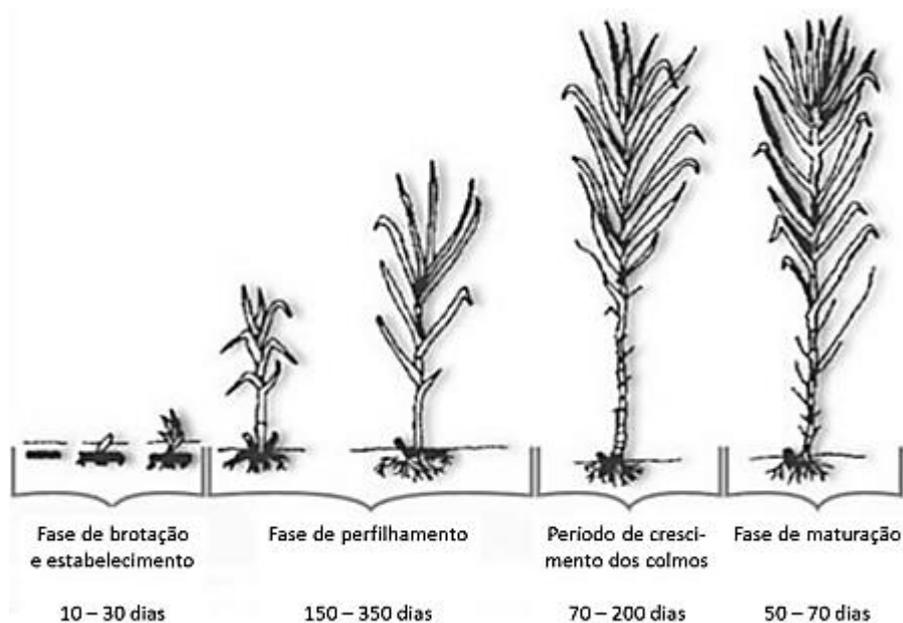


Figura 1.2 - Ciclo fenológico da cana-de-açúcar.

Fonte: Gascho e Shih (1983).

Conforme o ciclo se repete, em intervalos anuais, ocorre uma diminuição na produtividade, podendo alcançar a inviabilidade econômica. Desse modo, para reverter a situação torna-se necessário que ocorra um manejo intitulado de reforma, que reinicia o ciclo fenológico com novas mudas.

As práticas culturais da cana-de-açúcar são divididas, segundo Castro (1999), em sistema de ano (aproximadamente 12 meses) e o sistema de ano e meio (em torno de 18 meses), podendo ser representadas por uma curva que distingue o crescimento e diferenciada de acordo com a época de plantio. A diferença entre elas é que a primeira é simétrica e a segunda bimodal.

Desta forma, pode-se conceituar que a cana-de-açúcar apresenta quatro fases de desenvolvimento, sendo elas: Fase 1 – plantio, com a brotação e emergência dos brotos (colmos primários). Para que a cana-de-açúcar tenha sucesso na colheita, essa fase é considerada a mais importante, pois é nela que se desenvolve a consignação inicial das plantas no campo. Fase 2 – perfilhamento e estabelecimento da cultura. Acontece nessa fase o estabelecimento definitivo da cana. Fase 3 – período de máximo crescimento. Nessa fase, a cana dirige-se do perfilhamento final ao acúmulo de sacarose nos colmos, no qual define a futura produtividade (t/ha) da cultura. Fase 4 – maturação. É quando se estabelece a qualidade de matéria-prima dos colmos industrializáveis.

### 1.2.5 Análise comparativa da produção de cana-de-açúcar, temperatura e precipitação entre Paraíba, Nordeste e Brasil

Com a finalidade de comparação, os dados da Tabela 1.1 apresentam a evolução da produção da cana-de-açúcar, no Estado da Paraíba, na Região Nordeste e no Brasil, obtidos nos períodos de 1990, 2000, 2010 e 2015.

A Tabela 1.1 mostrou que a produção canavieira do Brasil vem crescendo no decorrer dos anos. No Nordeste e na Paraíba, observa-se uma alta produção da cana-de-açúcar em 1990, mostrando uma grande queda no ano 2000 e uma recuperação de 2010 em diante. Em relação ao Nordeste, a Paraíba tem participação na produção da cana-de-açúcar de 12% em 1990, 7% em 2000, 8% em 2010 e 11% em 2015, ou seja, vem recuperando sua participação no cenário nordestino, após uma brusca queda. No que tange sua participação no cenário nacional, a Paraíba apresentou uma participação pequena, de 3,2% em 1990, 1,2% em 2000, 0,8% em 2010 e 0,9% em 2015, ou seja, em relação à produção brasileira, a Paraíba ainda apresenta uma baixa participação.

Tabela 1.1 - Evolução da Produção da cana-de-açúcar no Brasil, Nordeste e Paraíba, no período de 1990 a 2015, em milhões toneladas ( $10^6$  t).

Ano	1990	2000	2010	2015
<b>Paraíba</b>	8,28	3,99	5,65	6,80
<b>Nordeste</b>	71,69	58,86	68,79	61,55
<b>Brasil</b>	262,67	326,12	717,46	748,63

Fonte: Elaboração própria a partir do IBGE (2016)

A Figura 1.3 mostrou o comportamento das variáveis climáticas de precipitação total anual e temperatura média anual, no período entre 1961 e 2015, na Paraíba, no Nordeste e no Brasil em sua totalidade.

Com base na Figura 1.3a, percebeu-se que o volume de precipitação anual se manteve relativamente estável ao longo do período no Brasil, Nordeste e Paraíba, oscilando entre 800 mm e 1200 mm no Nordeste e Paraíba, com uma média de 1073 mm no Nordeste e 976 mm na Paraíba, enquanto que no Brasil houve uma variação de precipitação anual entre 1200 mm e 1600 mm, com uma média de 1422 mm. A única ressalva foi no ano de 1985, no qual apontou um aumento de precipitação na Paraíba (1713 mm) e no Nordeste (1767 mm), ultrapassando, inclusive, a precipitação anual do Brasil, que foi de 1649 mm.

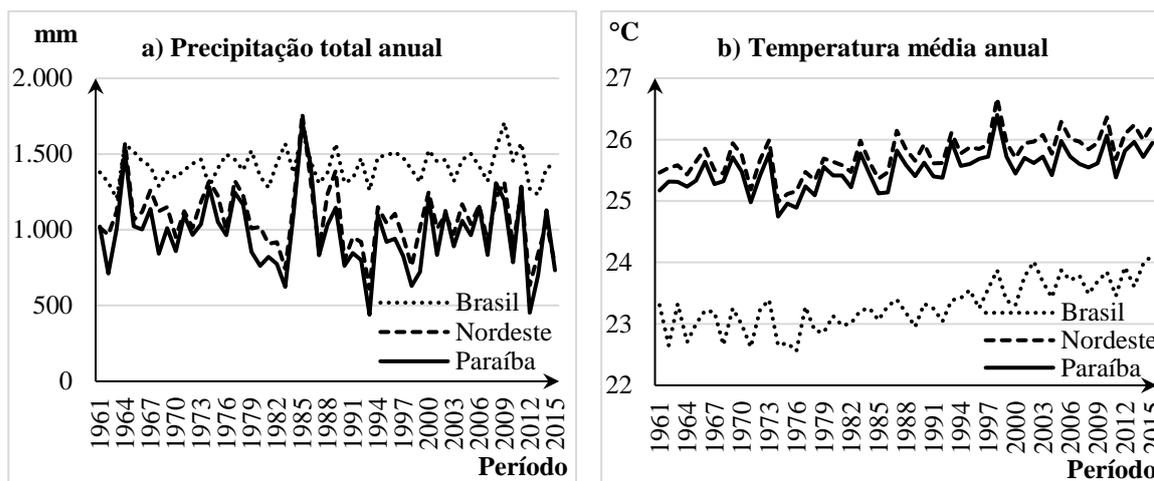


Figura 1.3 - (a) Precipitação total anual (em: mm) e (b) Temperatura média anual (em: °C) do Brasil, Nordeste e Paraíba entre 1961 e 2015.

Fonte: Elaboração própria a partir de CRU/University of East Anglia15 (UEA, 2018).

A Figura 1.3b expõe uma tendência de aumento da temperatura no Brasil, Nordeste e Paraíba. O padrão de aumento de temperatura nos últimos anos é consistente, visto que na análise realizada neste estudo, na qual compreende entre 1990-2015, a maior temperatura média dos municípios brasileiros foi em 2015. Esses resultados estão em concordância com a literatura mundial, uma vez que em 1990 o IPCC distinguia a década de 1980 como a mais quente. Em seguida, essa afirmativa ganhou atualizações em seu novo relatório em 1995, onde o IPCC alegou que os últimos anos estavam entre os mais quentes. Posteriormente, em 2007, a organização assinalava que entre 1995 e 2006 estavam reunidos onze dos doze anos mais quentes já registrados (IPCC, 2014). Em 2015 bateu o recorde de ano mais quente da história e, logo depois, 2016 quebrou esse recorde (NOAA, 2017).

No que se refere à produção da cana-de-açúcar na Paraíba, em 2015, foram produzidas 6.801.981 toneladas de cana-de-açúcar (IBGE, 2016). Conforme os dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), na safra 2015/16 a cana-de-açúcar, obteve uma média de produtividade de 44.327 kg/ha, com uma produção de 5.532,5 milhões de toneladas. Enquanto que, na safra 2016/17, houve uma redução na produção canavieira, a produtividade média foi de 44.014 kg/ha e a produção total de 4.856,1 milhões de toneladas. Assim, ocorreu uma redução de 12,2% na produção, com esse decréscimo ocorrendo devido à diminuição na pluviosidade e má distribuição das chuvas no segundo semestre desta safra (CONAB, 2017).

Porém, a Paraíba, vem apresentando tendências de crescimento na produção canavieira, na qual teve uma grande produção entre 1982 a 1992, foram dez anos de

produção, com valores em milhões de toneladas de cana-de-açúcar entre 7.196 e 10.747, como pode ser visualizado na Figura 1.4. Esse aumento foi estimulado pelos recursos do Programa Nacional do Alcool (Proálcool).

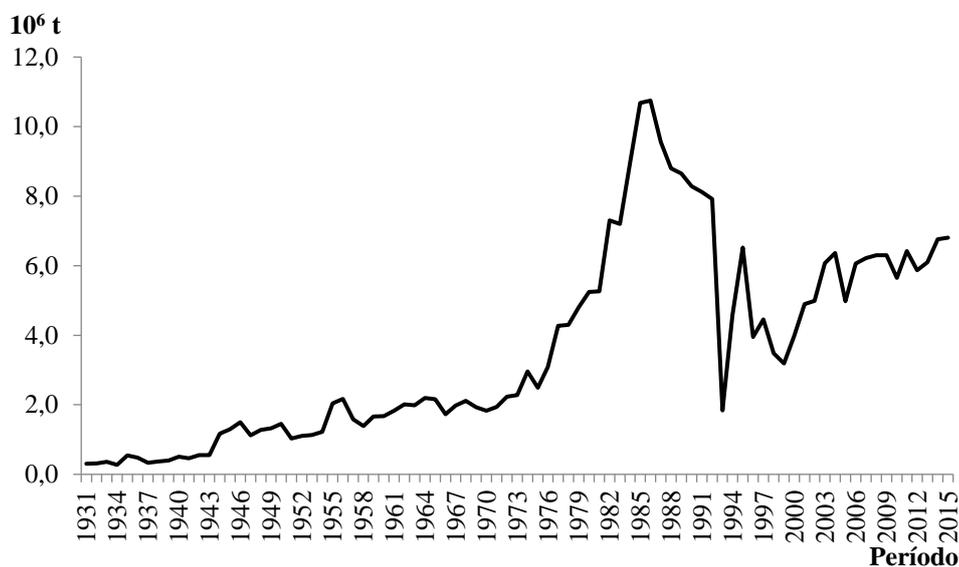


Figura 1.4 - Produção anual de cana-de-açúcar na Paraíba em milhões de toneladas ( $10^6$  t) da cana-de-açúcar na Paraíba entre 1931 e 2015.

Fonte: IBGE (2015); IPEA (2015).

De acordo com Bacchi e Caldarelli (2015), as variáveis climáticas, como temperatura e precipitação, são os elementos que mais influenciam na produção da cana-de-açúcar. Dados da Associação de Plantadores de Cana da Paraíba (ASPLAN) confirmam as pesquisas acadêmicas, na qual retratam que desde 2012 vem ocorrendo anormalidade pluviométrica e seca no período agrícola, que como consequência acarretam problemas para o produtor (ASPLAN, 2014).

### 1.2.6 Gases de efeito estufa e seu impacto na agricultura

O avanço industrial observado a partir do século XX, intensificou a emissão de gases poluentes, que estariam gerando o chamado efeito estufa, que vem evitando que a energia calorífica regresse para fora da atmosfera, resultando no aquecimento global. Esse processo vem sendo intensificado e seus efeitos podem se revelar irreversíveis devido à intensificação da queima de combustíveis fósseis e mudanças no uso da terra (LAL, 2004; FIELD; FIELD, 2009; IPCC, 2014).

As evidências das mudanças climáticas, somadas ao progressivo aumento de gases como metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), dentre outros, na atmosfera terrestre, variam conforme a economia do país, o preço do combustível e diversos outros fatores. Uma vez, que a exemplo do Brasil a principal fonte do CO<sub>2</sub> são atribuídas aos combustíveis fósseis. Já do N<sub>2</sub>O, considera-se a agropecuária como principal fonte, através do despejo de animais e o CH<sub>4</sub> decorre de atividades agrícolas e da queima de combustíveis fósseis (BRASIL, 2016).

O aumento acentuado do uso do solo na agricultura tem colaborado para a aceleração da emissão de gases de efeito estufa e, em consequência, às mudanças climáticas, propiciando a busca por procedimentos que visem a diminuição das fontes desses gases. Suas origens remontam a Segunda Guerra Mundial, quando começaram a ser introduzidos mecanismos desenvolvimentistas na agricultura, com objetivo de acompanhar o grande crescimento populacional e assim suprir a demanda por alimentos da população mundial. Entre 1961 e 2005, a população mundial aumentou 111% (de 3,08 para 6,51 bilhões), enquanto a produção agrícola cresceu 162% (de 1,8 para 4,8 bilhões de toneladas nos últimos anos). Embora a produção agrícola tenha aumentado, os ganhos observados desde 1961 foram amplamente intensivos, impulsionados pelo aumento do uso de pesticidas e fertilizantes, melhor acesso à irrigação e mecanização (CARVALHO *et al.*, 2009; BURNEY; DAVIS; LOBELL, 2010).

De acordo com a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), nas próximas décadas será necessário um aumento de aproximadamente 60% na demanda global por alimentos. Em contrapartida, a agricultura vem emitindo bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub>-eq/ano, sendo a aplicação por fertilizantes responsáveis por em média 13% das emissões. Deste modo, um dos desafios da agricultura para as próximas décadas será expandir a área de cultivo em cerca de 20%, produzir mais e, ao mesmo tempo, mitigar suas emissões de gases de efeito estufa (FAO, 2011; FAO, 2014).

A pressão para o aumento na produção agrícola contribuiu para o surgimento da Revolução Verde, baseada no uso intensivo de insumos químicos, acarretando em uma modernização agrícola e como consequência no aumento dos impactos ambientais ocasionados pelo uso intensivo de fertilizantes comerciais (SHIVA, 2016; WEIL; BRADY, 2016). Nesse contexto, com o aumento da preocupação relacionada às mudanças climáticas, oriunda principalmente da emissão de gases de efeito estufa, torna-se necessário compreender esses impactos para aplicar de maneira correta medidas de mitigação e

sequestro de carbono com o objetivo de minimizar as emissões de gases de efeito estufa. O IPCC aponta três categorias que são tidas como oportunidades de diminuição de GEE na agricultura: 1) diminuição das emissões, 2) promoção do sequestro de carbono e 3) impedir emissões (IPCC, 2014).

### **1.2.7 Bio sólido como alternativa sustentável na cultura canavieira**

O uso de fontes energéticas ganhou substancial importância no desenvolvimento socioeconômico, principalmente a partir da primeira Revolução Industrial, influenciando a sociedade e a competitividade econômica entre os países. A evolução do uso das fontes primárias de energia aconteceu rapidamente, intensificando-se após a Segunda Guerra Mundial – as fontes de energia de origem fóssil passaram a constituir elemento indispensável no processo de crescimento e desenvolvimento mundial. No entanto, as crises internacionais do petróleo, na década de 1970, e a subsequente crise energética, representaram grandes motivações para a busca de novas fontes de recursos naturais, como o bio sólido (DARWICHE, 2010).

Dentre as alternativas da utilização do bio sólido, a principal é a agrícola, como adubo ou como fertilizante, uma vez que 99,9% da sua constituição média é de água, desse total, 70% são de compostos orgânicos como proteínas e carboidratos etc e 30% de inorgânicos com areia e sais etc. Assim, o bio sólido transforma-se em um insumo rico em nutrientes e matéria orgânica para o solo. Contribuindo, para diminuição da fertilização agrícola e incineração. Porém, o bio sólido também pode conter: agentes patogênicos, nitrogênio, atração de vetores, entre outros agentes malignos (MONTANO; FOFONKA, 2011). Para isso, deve-se seguir a Resolução CONAMA Nº 375/2006 que delibera critérios e procedimentos, para utilização agrícola do bio sólido advindos de estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados.

O uso do bio sólido, na produção canavieira, é uma alternativa, segundo Oliveira (2000) viável tecnicamente, de baixo custo, pois age como fonte de nutriente na plantação, sustentável, potencializa a estrutura do solo, promissora na produção de cana-de-açúcar. Chiba (2005) destaca que uso de bio sólido na agricultura é promissor, uma vez que, traz benefícios ambientais com a redução do impacto sobre o meio ambiente e descarte do resíduo e socioeconômico, por meio do aumento da produtividade das culturas.

Diversos estudos como o de Franco *et al.* (2008) e Franco *et al.* (2010) comprovam o aumento da produtividade da cana-de-açúcar com a utilização do bio sólido como

fertilizante. Outros estudos apontam a cultura canavieira como uma das culturas com melhores aptidões para uso do bio sólido (URBAN; ISAAC, 2016). Deste modo, o uso do bio sólido na cana-de-açúcar é uma estratégia fundamental para reciclagem de resíduos orgânicos originados do meio urbano. Devido sua riqueza em matéria orgânica, possui capacidade de recuperar a estrutura física e melhorar a qualidade química do solo (KULIKOWSKA; GUSIATIN, 2015).

### **1.2.8 Avaliação do ciclo de vida (ACV)**

A ACV é uma metodologia internacionalmente consagrada na avaliação de aspectos ambientais, processos e serviços. Destaca-se como uma ferramenta de gestão normalizada, validada e consolidada, desenvolvida para calcular “do berço ao túmulo”, com a finalidade de avaliar os potenciais impactos ambientais durante as diversas etapas do seu ciclo de vida (GUINÉE, 2001; GUINÉE, 2002).

A estrutura metodológica da ACV é padronizada pelo ISO 14040 e 14044 (ISO 14040, 2006; ISO 14044, 2006), na qual é composta por quatro especificações de uma ACV: definição dos objetivos e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação dos resultados. Esse procedimento aumentou a maturidade e robustez da metodologia, colaborando para que os trabalhos envolvendo ACV sejam desenvolvidos e interpretados com um grau de confiabilidade mais apropriado, contribuindo na identificação e avaliação das causas dos impactos ambientais associados ao processo em estudo, desde a construção do processo às operações e transporte (GUINÉE, 2001; GUINÉE, 2002; FINNVEDEN *et al.*, 2009).

De acordo com ISO 14040 (2006), a definição do objetivo e do escopo consiste na descrição e definição do processo ou produto estudado, a seleção dos indicadores e a fronteira dos efeitos ambientais a ser avaliado. A análise de inventário engloba a coleta dos dados de entrada e saída do sistema estudado, além da identificação e quantificação de aspectos ambientais. A avaliação de impacto permite analisar a caracterização ambiental, nessa fase os dados do inventário são transformados em impactos ambientais, por meio da multiplicação dos valores brutos, por coeficientes de equivalência que remetem a resultados em unidades comuns. A interpretação examina os resultados da análise de inventário. Assim, através dessas etapas será possível definir as conclusões, as limitações e as recomendações do estudo (BAUMANN; TILLMAN, 2004; HAUSCHILD, 2005; CARVALHO *et al.*, 2017). A iteração entre estas fases pode ser vista na Figura 1.5.

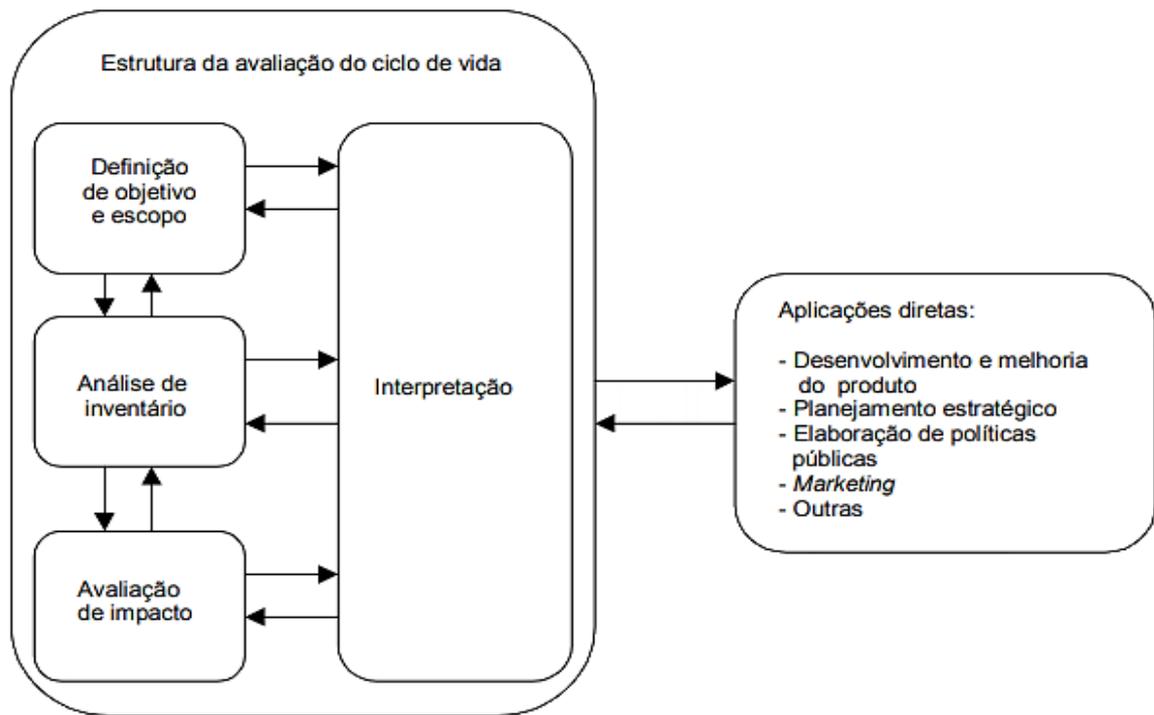


Figura 1.5 - Fases da avaliação do ciclo de vida.

Fonte: ISO 14040 (2006).

Para facilitar e compilar todas as informações contraídas durante as etapas de análise do ciclo de vida, diferentes softwares foram desenvolvidos, desse modo é necessário testar e conferir todas as informações e dados antes da sua utilização (PEREIRA, 2004). O SimaPro é o programa mais usado para ACV, sendo uma ferramenta especializada, capaz de modelar e analisar ciclos de vida complexo, de maneira transparente e interativa, conforme os padrões ISO (PRÉ-CONSULTANTS, 2018).

## CAPÍTULO 2

### **ARTIGO: Análise de tendências climáticas sobre o cultivo da cana-de-açúcar no Estado da Paraíba**

**Resumo:** O clima é uma das variáveis mais importantes no cultivo da cana-de-açúcar, promovendo restrições e adequações para a lavoura canavieira. Assim, os testes estatísticos para detecção de tendências em séries temporais tornaram-se ferramentas fundamentais para avaliação da dinâmica do cultivo da cana-de-açúcar e de planos de mitigação e adaptação para os possíveis impactos ocasionados pelas mudanças climáticas. Este trabalho analisou a influência das mudanças climáticas no cultivo da cana-de-açúcar no Estado da Paraíba, de modo a investigar quais as consequências do aumento da temperatura, do nível de umidade de ar e de mudanças no regime de precipitação projetados para a Região na cultura canavieira. Foram usados dados de temperatura média, precipitação total e umidade relativa média de cinco estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia distribuídas no Estado da Paraíba e dados de área colhida da cana-de-açúcar do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. O teste de tendência de Mann-Kendall foi empregado para analisar a existência de tendências de cada estação, isoladamente. Os resultados evidenciaram tendência significativamente crescente de temperatura para as estações de Campina Grande, João Pessoa, Monteiro, Patos e Sousa. As estações de Areia, Campina Grande e João Pessoa obtiveram tendências significativas de precipitação. Areia apresentou tendência crescente no mês de janeiro e decrescente no mês de março, Campina Grande obteve um aumento significativo no mês de junho, enquanto João Pessoa obteve uma diminuição na tendência no mês de abril. No que diz respeito à umidade relativa, as estações de João Pessoa, Monteiro e Patos apresentaram tendências significativas de diminuição, enquanto que Sousa apresentou tendências significativas de aumento. A continuidade dessas tendências poderá resultar em impactos na produção e produtividade da cana-de-açúcar no Estado da Paraíba.

**Palavras-Chave:** Mann-Kendall; Mudanças climáticas; Temperatura; Precipitação; Umidade relativa do ar; *Saccharum officinarum* L.

**Abstract:** The climate is one of the most important variables in the cultivation of sugarcane, promoting restrictions and adjustments for the sugar cane crop. Thus, statistical tests to detect trends in time series have become fundamental tools for assessing the dynamics of sugarcane cultivation and mitigation and adaptation plans for the possible impacts caused by climate change. This work analyzed the influence of climate changes on sugarcane cultivation in the state of Paraíba, in order to investigate the consequences of the increase in temperature, air humidity level and changes in the precipitation regime projected for the region in sugarcane culture. Data from mean temperature, total precipitation and average relative humidity of five meteorological stations of the National Institute of Meteorology distributed in the state of Paraíba and data of area harvested from the sugar cane of the Brazilian Institute of Geography and Statistics were used. The Mann-Kendall trend test was used to analyze trends for each season, in isolation. The results evidenced a significant increase in temperature for the stations of Campina Grande, João Pessoa, Monteiro, Patos and Sousa. The Areia, Campina Grande and João Pessoa stations obtained significant precipitation trends. Sand showed a growing trend in January and decreasing in the month of March, Campina Grande obtained a significant increase in the month of June, while João

Pessoa obtained a decrease in the trend in the month of April. Concerning relative humidity, the stations of João Pessoa, Monteiro and Patos presented significant decreasing trends, while Sousa presented significant trends of increase. The continuity of these trends may result in impacts on the production and productivity of sugarcane in the state of Paraíba.

**Keywords:** Mann-Kendall; Climate changes; Temperature; Precipitation; Relative humidity; *Saccharum officinarum* L.

## 2.1 INTRODUÇÃO

Com a revolução industrial, intensificaram-se as mudanças causadas no ambiente pelas ações antrópicas, ocasionando uma crescente preocupação com a irreversibilidade em termos globais, sobretudo com relação aos efeitos climáticos (BIERMANN *et al.*, 2012; COSTANZA *et al.*, 2007). O clima interfere diretamente nos processos naturais, consequentemente as alterações climáticas são capazes de gerar impactos significativos no meio ambiente, assim como nos âmbitos econômicos e sociais. O aumento da temperatura global, a alteração nos padrões de precipitação, a acidificação dos oceanos e o aumento do nível do mar são apenas alguns dos efeitos das mudanças climáticas que podem causar consequências desastrosas (IPCC, 2014).

Esses efeitos adversos, resultantes das mudanças climáticas, tendem a provocar um aumento da vulnerabilidade do planeta em diversas áreas, como é o caso da agricultura. O clima é uma das variáveis mais relevantes na produção agrícola ao, por exemplo, determinar as áreas mais propícias à exploração de determinada cultura. MO *et al.* (2017), Juhola *et al.* (2017), Blanco *et al.* (2017) afirmam que anomalias em variáveis climáticas terão consequências diretas na agricultura em várias regiões do mundo. Independentemente dos avanços tecnológicos que melhoram a produtividade agrícola, tais como irrigação mais eficiente, melhoramento genético, entre outros, os elementos climáticos ainda são determinantes no cultivo agrícola (DESCHÊNES; GREENSTONE, 2007).

A utilização de dados climatológicos, através da aplicação de análises estatísticas, permite o diagnóstico das tendências climáticas históricas, o que possibilita uma maior segurança no que diz respeito ao monitoramento e otimização da produção, aplicação de recurso financeiro, previsão de rendimento futuro e expansão das áreas para cultivo (MARIN *et al.*, 2011). Pesquisas envolvendo o setor agrícola e as mudanças climáticas podem auxiliar na tomada de decisões para a criação de planos de adaptação e mitigação (MARIN *et al.*, 2012).

James (1999), Eggleston *et al.* (2001), Gilbert *et al.* (2006), Nelson *et al.* (2014) asseguram que os elementos climáticos influenciam no cultivo da cana-de-açúcar, afetando a produtividade e a qualidade da cultura, seja durante o corte ou em pós-colheita. Deste modo, temperatura, precipitação, radiação solar e umidade são os principais elementos climáticos que interferem no desenvolvimento da cana-de-açúcar (RUDORFF *et al.*, 2010; SRIVASTAVA; RAI, 2012).

Como os elementos climáticos influenciam na produtividade da cana-de-açúcar, ela deve ser cultivada em ambientes com condições climáticas específicas, sendo imprescindível um planejamento agrícola e eficiência produtiva. Quando essas exigências não são obedecidas, normalmente acontece queda na produtividade, desenvolvimento lento, perda na qualidade e morte da planta. Além de interferir no comportamento fisiológico da cultura em relação ao metabolismo de brotação, perfilhamento, comprimento do colmo, maturação e florescimento, causando restrições nas lavouras canavieiras (MANHÃES *et al.*, 2015).

Para uma melhor compreensão do comportamento da cana-de-açúcar diante das variações climáticas, é imprescindível conhecer a fisiologia da cultura, a interação genótipo e ambiente, podendo, os elementos climáticos afetarem positivamente ou negativamente nas etapas de desenvolvimento vegetativo, no sistema radicular, na emissão de folhas. Ressalta-se que a cana-de-açúcar é uma planta de metabolismo fotossintético C4, a qual tem características que as beneficiam no processo de fotorrespiração (MANHÃES *et al.*, 2015).

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017) a cana-de-açúcar é o produto agrícola mais produzido na Paraíba. Em 2016, foram produzidas 6,91 milhões de toneladas do produto em 2016, um aumento de 4,7% em relação a 2015. O valor da produção de cana-de-açúcar em 2016 da Paraíba foi de R\$ 649 milhões e sua área destinada à colheita foi de 122.738 hectares, sendo que o rendimento médio foi de 56.290 kg/ha. Mesmo com tamanha importância estadual da cultura, ainda são escassos os trabalhos científicos envolvendo as influências das mudanças climáticas na cana-de-açúcar. Torna-se fundamental a execução de trabalhos que busquem verificar a resposta dessa cultura a variações e tendências nos elementos climáticos na Região.

Este trabalho analisou a influência de variações e tendências climáticas no cultivo da cana-de-açúcar no Estado da Paraíba, de modo a investigar quais as consequências da temperatura, da umidade do ar e das mudanças no regime de precipitação na cultura canavieira.

## 2.2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.2.1 Objeto de estudo

O Estado da Paraíba, localizado na Região Nordeste do Brasil, possui quatro mesorregiões, sendo: Mata Paraibana, Agreste Paraibano, Borborema e Sertão Paraibano (AESAs, 2016). As estações meteorológicas utilizadas fazem parte da rede de estações convencionais do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizadas nos municípios de João Pessoa, Areia, Campina Grande, Monteiro, Patos e Sousa (Figura 2.1). João Pessoa está situada na mesorregião da Mata Paraibana e se enquadra no clima tropical úmido (Am), segundo a classificação de Köppen-Geiger.

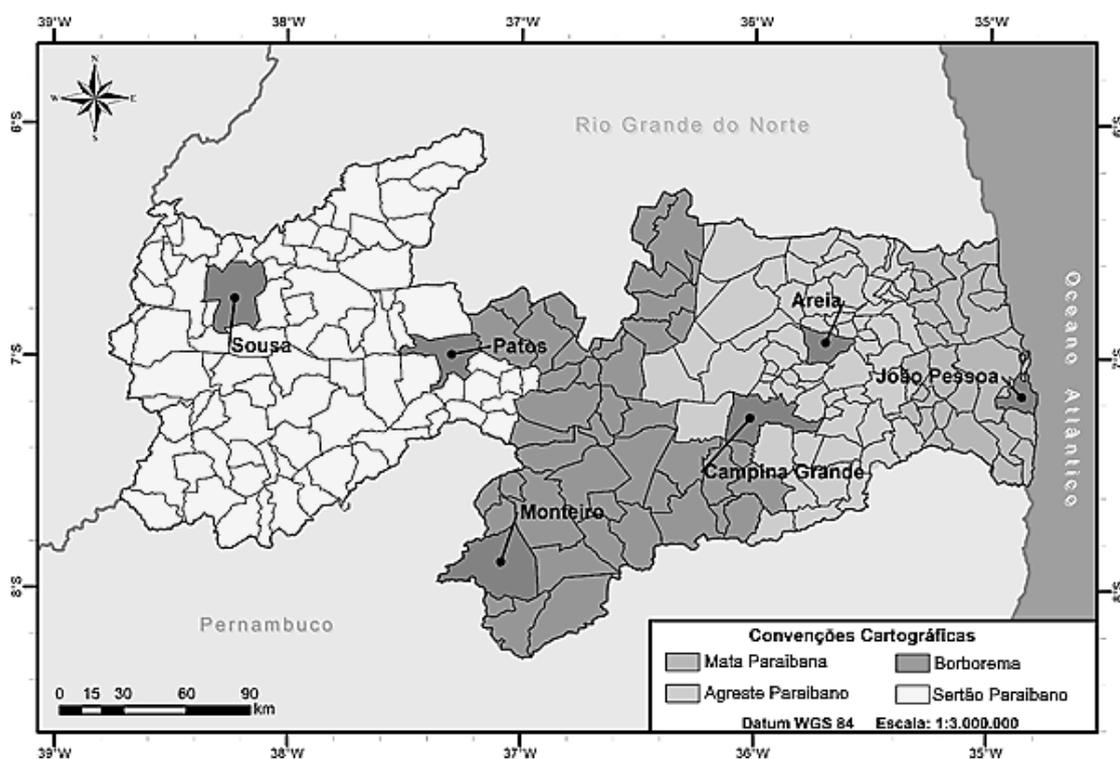


Figura 2.1 - Localização das estações meteorológicas estudadas no Estado da Paraíba, com destaque para as quatro mesorregiões do Estado.

As cidades de Areia e Campina Grande estão inseridas na área que corresponde ao Agreste Paraibano. Areia possui um clima tropical semiúmido, com estação chuvosa no inverno (As) (Classificação de Köppen-Geiger). Já Campina Grande tem de um clima tropical, com inverno seco (Aw), de acordo com a classificação de Köppen-Geiger.

Na mesorregião da Borborema se localiza a cidade de Monteiro com um clima tropical e inverno seco (Aw), em conformidade com a classificação de Köppen-Geiger. No Sertão Paraibano, encontram-se Patos e Sousa. Patos e Souza se enquadram no clima tropical, com inverno seco (Aw), segundo a classificação de Köppen-Geiger.

Os dados climáticos utilizados foram oriundos do banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Foram reunidos dados mensais de janeiro de 1961 a dezembro de 2016, provenientes de todas as estações convencionais do Estado da Paraíba (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 - Localidades elegidas do Estado da Paraíba com intervalo da série, coordenadas geográficas e altitude.

<b>Localidade</b>	<b>Intervalo da série (ano)</b>	<b>Latitude (°S)</b>	<b>Longitude (°W)</b>	<b>Altitude (m)</b>
Areia	1995-2016	-6,97	-35,68	574,6
Campina Grande	1974-2016	-7,22	-35,88	547,6
João Pessoa	1961-2016	-7,10	-34,86	7,4
Monteiro	1973-2016	-7,88	-37,06	603,7
Patos	1977-2016	-7,01	-37,26	249,1
Sousa (São Gonçalo)	1961-2016	-6,75	-38,21	233,1

Fonte: INMET (2018).

Os parâmetros selecionados foram temperatura média, precipitação total, umidade relativa média e área colhida (ha) de cana-de-açúcar. Os dados climáticos foram fornecidos pelas estações meteorológicas convencionais do INMET, sendo agrupados em planilhas, e em seguida, passou por um processo de controle de qualidade, com a finalidade de verificar a confiabilidade em relação aos dados e eliminar possíveis erros advindos de problemas técnicos dos equipamentos meteorológicos. Os dados da área colhida e de quantidade produzida da cana-de-açúcar foram obtidos do IBGE e do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA).

Para evitar inconsistência nas análises, foram utilizados apenas os anos completos da série, ou seja, os anos em que os dados se apresentaram disponíveis para todos os meses, de janeiro a dezembro.

### 2.2.3 Análise de tendências

O teste de Mann-Kendall, proposto por Mann (1945) e alterado por Kendall (1975), permite detectar a tendência estatística em uma série temporal. O método foi recomendado pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) devido a robustez, sendo frequentemente aplicado em pesquisas envolvendo mudanças climáticas (GOOSSENS; BERGER, 1986; YUE; YANG; WU, 2002). Deste modo, aplicou-se o teste de Mann-Kendall para detectar e estimar tendências nas séries de dados temporais, sendo calculado conforme mostrado na equação 2.1.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{ sinal}(x_j - x_i) \quad (2.1)$$

A estatística  $S$  é obtida pela soma de todas as contagens da série de dados, sendo  $x_i$  e  $x_j$  os valores da série de tempo nos anos  $i$  e  $j$ , respectivamente. O sinal pode ser obtido pela equação 2.2.

$$\text{ sinal}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1, \text{ se } (x_i - x_j) > 0 \\ 0, \text{ se } (x_i - x_j) = 0 \\ -1, \text{ se } (x_i - x_j) < 0 \end{cases} \quad (2.2)$$

Kendall (1975) indicou que ao considerar uma independência temporal entre os  $n$  valores da série, o valor de  $S$  tende para a normalidade. Quando ocorre hipótese nula ( $H_0$ ), a ausência de tendências e a existência de autocorrelação positiva ampliam a probabilidade de rejeitar a hipótese nula quando ela é verdadeira. Em casos de autocorrelação negativa, particularidades opostas são observadas. A média e a variância são calculadas respectivamente pelas equações 2.3 e 2.4.

$$E[S_i] = 0 \quad (2.3)$$

$$\text{Var}(s) = \frac{1}{18} [N(N-1)(2N+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5)] \quad (2.4)$$

Em que  $t_p$  é o tamanho da série temporal. A estatística  $Z$  do teste estatístico de Mann Kendall foi calculada pela equação 2.5.

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(s)}}, \text{ se } S > 0 \\ 0, \text{ se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(s)}}, \text{ se } S < 0 \end{cases} \quad (2.5)$$

O valor  $Z$  estabelece se a tendência estatisticamente significativa para a série temporal. Para testar qualquer tendência em nível de significância, a hipótese nula é aceita se  $Z$  for menor que  $Z_{1-p/2}$ . Um valor positivo de  $Z$  aponta uma tendência crescente, ao mesmo tempo em que o negativo de  $Z$  designa uma tendência decrescente.

Mesmo com a eficácia do teste de Mann-Kendall, torna-se necessário complementar com o estimador de declive Sen (SEN, 1968), uma vez que o teste não fornece a magnitude das tendências detectadas. O teste de Sen aplica um modelo linear para estimar a magnitude de uma tendência, através do cálculo do declive de Sen (SALMI *et al.*, 2002). A estatística  $Q$  é estimada pela equação 2.6.

$$Q = \frac{X_j - X_i}{j - i} \quad (2.6)$$

Onde  $X_j$  e  $X_i$  são os valores estudados nos anos  $i$  e  $j$ . O valor positivo ou negativo para  $Q$  sugere tendências crescentes ou decrescentes, respectivamente. Caso haja  $n$  valores na série analisada, logo o número de pares estimados de  $Q$  pode ser dado conforme mostrado na equação 2.7.

$$N = \frac{n(n-1)}{2} \quad (2.7)$$

O estimador de declive de Sen é a mediana dos  $N$  valores de  $Q$ . O método foi fundamentado no teste não paramétrico de Mann-Kendall para a tendência e no método não paramétrico de Sen para a magnitude da tendência (MANN 1945; KENDALL, 1975). Para estipular a tendência temporal dos elementos climáticos selecionados foi utilizado o programa Makenses, versão 1.0 (SALMI *et al.*, 2002).

### 2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A dinâmica climática influencia e é influenciada por diversos agentes naturais, no qual é controlada por elementos e fatores climáticos que diferenciam o tipo climático de um lugar de outro. Introduzido nestas circunstâncias, o Estado da Paraíba apresenta uma significativa complexidade climatológica. Por sua localização geográfica, sofre a influência de fenômenos meteorológicos, apresentando o clima tropical úmido no litoral, com chuvas numerosas. Em direção ao interior, após a Serra da Borborema, o clima torna-se semiárido e passível à estiagem prolongada (ARIAS; CABALLERO, 2015). Através do comportamento climático da área de estudo é possível observar a série temporal para os diferentes parâmetros estudados. Na Figura 2.2, tem-se a distribuição histórica dos elementos climáticos para as localidades escolhidas neste estudo.

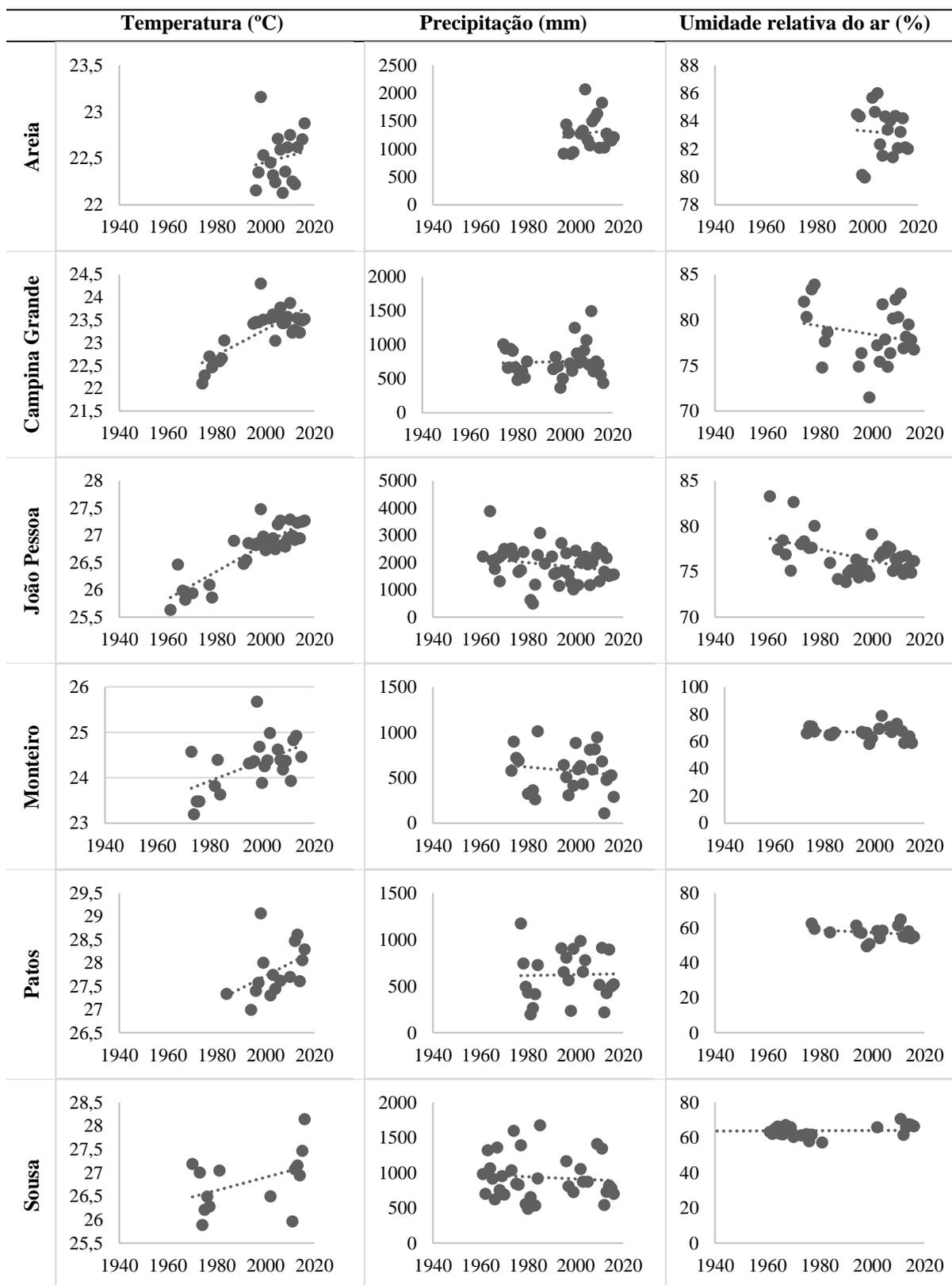


Figura 2.2 - (a) Temperatura média anual (°C), (b) Precipitação total anual (mm) e (c) Umidade relativa do ar média anual (%) da estação de Areia, Campina Grande, João Pessoa, Monteiro, Patos e Sousa.

Fonte: INMET (2018).

A Tabela 2.2 mostra os valores médios mensais e anuais dos parâmetros analisados para as cinco estações objeto de estudo com objetivo de analisar se o clima é favorável à produtividade da cana-de-açúcar nas estações estudadas.

Tabela 2.2 - Valores médios anuais e mensais de temperatura (°C), precipitação total (mm) e umidade relativa do ar (%) das estações convencionais da Paraíba para o período 1950 a 2016.

		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Areia</b>	23,5	23,7	23,7	23,5	22,6	21,4	20,6	20,6	21,4	22,5	23,1	23,5	22,5
	<b>Campina Grande</b>	24,4	24,5	24,5	24,3	23,3	22,0	21,2	21,4	22,2	23,3	23,9	24,3	23,3
	<b>João Pessoa</b>	27,7	27,8	27,8	27,4	26,7	25,6	25,0	25,2	26,0	26,8	27,4	27,6	26,7
	<b>Monteiro</b>	25,8	25,5	25,3	24,7	23,6	22,4	21,9	22,4	23,7	25,0	25,7	25,6	24,3
	<b>Patos</b>	28,5	28,3	27,9	27,6	27,3	26,5	26,3	26,9	27,8	28,6	29,1	29,3	27,8
	<b>Sousa</b>	27,1	26,6	26,3	26,1	26,0	25,7	25,6	26,5	27,5	28,1	28,1	28,3	26,8
<b>Precipitação (mm)</b>	<b>Areia</b>	88,6	99,4	128,1	142,4	177,0	196,8	178,6	122,8	54,7	24,6	28,2	46,8	1287,8
	<b>Campina Grande</b>	45,1	56,0	88,8	94,2	106,4	112,6	113,2	56,3	32,4	14,3	13,8	18,6	751,8
	<b>João Pessoa</b>	89,2	109,0	187,0	274,5	282,4	348,0	297,5	152,5	81,4	33,1	22,5	30,2	1907,3
	<b>Monteiro</b>	27,5	84,7	108,5	111,0	104,9	36,3	36,1	15,3	11,5	16,9	18,6	31,3	576,2
	<b>Patos</b>	104,6	104,5	170,9	101,6	60,8	24,0	9,4	2,3	0,7	6,0	8,3	28,9	621,9
	<b>Sousa</b>	118,2	182,0	235,0	184,4	87,0	30,3	19,9	4,8	5,3	19,6	11,9	35,4	933,7
<b>Umidade (%)</b>	<b>Areia</b>	80,9	81,5	83,6	84,9	87,2	88,8	88,2	85,7	82,4	79,4	77,3	78,2	83,2
	<b>Campina Grande</b>	75,1	76,3	78,6	79,6	82,7	85,3	84,8	81,0	77,3	73,8	72,9	74,2	78,5
	<b>João Pessoa</b>	74,3	74,9	76,1	78,1	80,3	81,9	81,7	78,5	75,4	72,9	72,7	73,2	76,7
	<b>Monteiro</b>	59,8	64,6	69,0	72,8	75,9	75,3	74,7	68,2	61,8	58,7	57,7	58,7	66,4
	<b>Patos</b>	58,0	61,1	66,1	67,8	64,5	63,5	58,6	52,3	50,0	47,9	48,2	49,9	57,3
	<b>Sousa</b>	64,7	71,2	76,0	76,1	72,2	67,9	62,4	55,4	53,1	54,3	55,7	57,2	63,8

Fonte: INMET (2018).

De acordo com Dayana (2015) que analisou a influencia da temperatura no desenvolvimento da cana-de-açúcar, indicando que média anual de temperatura varie entre 25 °C e 35 °C. As estações de João Pessoa, Patos e Sousa apresentam valores dentro da faixa

ideal (entre 25° C e 35° C) para o cultivo da cana-de-açúcar durante todo o ano, já a estação localizada em Monteiro exibe temperaturas ideais apenas durante os meses de outubro a março. Segundo Alves e Marengo (2010), o aumento da temperatura colabora para o desenvolvimento da cana-de-açúcar, assim as tendências de aumento da temperatura constatada neste estudo, poderão contribuir para o aumento da produtividade da cultura. Manhães *et al.* (2015) ressaltam que à medida que a temperatura se eleva, até o máximo em torno de 35 °C torna-se prejudicial para cultura canavieira. Já Henry (2010) mostrou que em períodos de seca diminuem a produtividade da cana-de-açúcar, principalmente, nos municípios localizados na mesorregião do Sertão Paraibano, que constantemente são afetados pela seca.

Para a precipitação, Verheye (2010) afirma que a cana-de-açúcar exige grandes quantidades de água (pelo menos 1500 mm de chuva bem distribuídas ao longo do ano, a menos que seja cultivada com irrigação). Para Doorembos e Kassam (1979), as necessidades hídricas da cana-de-açúcar variam de 1500 mm a 2500 mm, devendo ser distribuídas de maneira uniforme principalmente durante o subperíodo vegetativo. Inman-bamber *et al.* (2008) mostram que as quantidades desejáveis de precipitação variam entre 1200 mm a 1300 mm. Conforme a Tabela 2.2, percebe-se que os valores anuais diferem bastante nas estações analisadas. Nesse sentido, a estação localizada em João Pessoa exibe precipitação anual dentro da faixa (1500 mm a 2500 mm) e a estação de Areia na faixa (1200 mm a 1300 mm). O déficit hídrico afeta negativamente o crescimento e desenvolvimento do cultivo da cana-de-açúcar, sendo a principal razão da diminuição da produtividade (INMAN-BAMBER, 2004).

À umidade relativa do ar, Dayana (2015) aponta que o exagero prejudica o crescimento da cana-de-açúcar e a ausência causa a morte da planta. Para um melhor aproveitamento, seria necessária uma umidade relativa do ar entre 80% e 85% durante o crescimento e entre 45% e 65% durante a amadurecimento/colheita (geralmente acontece entre setembro a abril no Nordeste brasileiro). A estação de Areia apresenta valores de umidade média relativa dentro da faixa ideal (80% a 85%) para o crescimento da cana-de-açúcar durante os meses de janeiro a setembro, a estação de Campina Grande exprime valores ótimos entre os meses de maio a agosto e a estação de João Pessoa entre os meses de maio a julho. Quanto aos valores ótimos para o amadurecimento da cana (45% a 65%), a estação de Monteiro exibe valores dentro dessa faixa entre os meses de setembro e fevereiro, Patos apresenta umidade relativa ideal para todos os meses do ano, exceto março e abril, já

Sousa manifesta valores de umidade relativa do ar dentro da faixa ótima entre os meses de junho e janeiro.

Para o parâmetro temperatura (Tabela 2.3), a análise de regressão mostrou que em todas as estações, à exceção da localizada em Areia, ocorreu tendência de incrementos significativos na temperatura média anual e mensal.

Tabela 2.3 - Tendências de temperatura média (°C) mensal e anual apontadas pelo teste de Mann-Kendall e quantificadas pelo declive de Sen para as estações convencionais da Paraíba.

<b>Período</b>	<b>Areia</b>	<b>Campina Grande</b>	<b>João Pessoa</b>	<b>Monteiro</b>	<b>Patos</b>	<b>Sousa</b>
<b>Anual</b>	0,015 ns	0,040 **	0,035 ***	0,040 *	0,064 *	0,109 +
<b>Janeiro</b>	-0,038 ns	0,019 ns	0,024 **	0,033 ns	0,007 ns	0,004 ns
<b>Fevereiro</b>	-0,021 ns	0,034 +	0,039 ***	0,038 ns	-0,014 ns	0,089 ns
<b>Março</b>	0,019 ns	0,045 **	0,053 ***	0,052 ns	0,116 *	0,095 ns
<b>Abril</b>	0,032 ns	0,048 ***	0,054 ***	0,089 **	0,125 +	0,093 +
<b>Mai</b>	0,007 ns	0,051 **	0,032 **	0,085 *	0,190 *	0,120 *
<b>Junho</b>	0,040 +	0,045 ***	0,021 *	0,062 *	0,105 +	0,138 ns
<b>Julho</b>	0,024 ns	0,041 **	0,032 ***	0,045 ns	0,095 **	0,137 *
<b>Agosto</b>	0,012 ns	0,041 **	0,033 **	0,040 *	0,057 **	0,090 +
<b>Setembro</b>	-0,004 ns	0,037 *	0,035 **	0,028 ns	0,050 ns	0,029 ns
<b>Outubro</b>	0,004 ns	0,031 +	0,038 ***	0,019 ns	0,021 ns	0,071 ns
<b>Novembro</b>	0,003 ns	0,036 +	0,037 ***	0,037 +	0,022 ns	0,091 ns
<b>Dezembro</b>	-0,006 ns	0,028 ns	0,030 ***	0,027 ns	-0,012 ns	0,058 ns

Legendas: ns = não significativo; +p < 0,10; \*p < 0,05; \*\*p < 0,01; \*\*\*p < 0,001

Período da análise: Areia (1996-2016); Campina Grande (1961-2016); João Pessoa (1961-2016); Monteiro (1973-2015); Patos (1984-2016); Sousa (1970-2016).

As tendências anuais, a maior parte dos municípios apresentaram tendências positivas para temperatura média, com exceção do município de Areia que apresentou uma tendência não significativa. Em termos mensais, na estação de Areia, verificou-se apenas uma tendência significativa de incremento na temperatura média no mês de junho (p < 0,10, 0,040 °C/ano). Já a estação de Campina Grande, apresentou aumentos significativos para a maioria dos períodos analisados, a exceção dos meses de janeiro e dezembro. Em Campina Grande, os acréscimos mais relevantes ocorreram nos meses de abril (p < 0,001, 0,048 °C/ano) e junho (p < 0,001, 0,045 °C/ano).

Em João Pessoa, todos os períodos analisados mostraram tendências significantes de aumento. Na maioria dos meses o grau de relevância foi expressivo ( $p < 0,001$ ), exceto nos meses de janeiro, maio, agosto e setembro, em que a significância foi de  $p < 0,01$ , e no mês de junho, em que a significância foi de  $p < 0,05$ , ainda assim sendo muito significativos. Esse resultado, além da influência de mudanças globais, pode ter sido influenciado pela expansão da malha urbana, em decorrência da ampliação da área edificada e pavimentada, e a consequente diminuição de áreas verdes.

A estação de Monteiro apresentou significância de aumento na temperatura em cinco dos doze meses do ano (abril, maio, junho, agosto e novembro) e a estação de Patos em seis (março, abril, maio, junho, julho, agosto). Os resultados apontaram declividade de Sen entre  $0,057\text{ }^{\circ}\text{C/ano}$  e  $0,190\text{ }^{\circ}\text{C/ano}$  em Patos e entre  $0,037\text{ }^{\circ}\text{C/ano}$  e  $0,089\text{ }^{\circ}\text{C/ano}$  em Monteiro.

Para a estação de Sousa, os resultados mensais revelam-se de modo similar ao anual nos meses de abril ( $0,093\text{ }^{\circ}\text{C/ano}$ ) e agosto ( $0,90\text{ }^{\circ}\text{C/ano}$ ), em que  $p < 0,10$ . Adicionalmente, observa-se uma tendência significativa ( $p < 0,05$ ) nos meses de maio ( $0,120\text{ }^{\circ}\text{C/ano}$ ) e julho ( $0,137\text{ }^{\circ}\text{C/ano}$ ).

Esses resultados corroboram com o relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas que considera o Nordeste brasileiro uma das regiões mais vulneráveis às mudanças climáticas (IPCC, 2014). Essas evidências de aumento de temperatura afetam diretamente a agricultura

A precipitação total (Tabela 2.4), constatou-se que as seis estações em estudo apresentaram valores não significativos de tendências quando analisados anualmente. Entretanto, houve aumento significativo na precipitação total em meses distintos para os municípios de Areia, Campina Grande e João Pessoa.

A estação de Areia apresentou tendência significativa de aumento de precipitação no mês de janeiro ( $p < 0,05$ ,  $4,07\text{ mm/ano}$ ) e significância de decréscimo no mês de março ( $p < 0,05$ ,  $-5,70\text{ mm/ano}$ ).

Nas estações de Campina Grande e João Pessoa, com exceção dos meses de junho ( $1,99\text{ mm/ano}$ ) em Campina Grande, com tendência de aumento de  $p < 0,10$ , e no mês de abril ( $-4,48\text{ mm/ano}$ ) em João Pessoa, o qual apresentou tendência de decréscimo de  $p < 0,05$ , o que indica que a precipitação vem diminuindo com o passar dos anos, não foram observadas tendências significativas para a precipitação na maior parte dos períodos analisados. Por fim, não foram observadas tendências significativas no aumento da

precipitação total nos municípios de Monteiro, Patos e Sousa para nenhum período analisado.

Tabela 2.4 - Tendências da precipitação total (mm) mensal e anual apontados pelo teste de Mann-Kendall e quantificadas pelo declive de Sen para as estações convencionais da Paraíba.

<b>Período</b>	<b>Areia</b>	<b>Campina Grande</b>	<b>João Pessoa</b>	<b>Monteiro</b>	<b>Patos</b>	<b>Sousa</b>
<b>Anual</b>	9,11 ns	-1,96 ns	-6,52 ns	-5,48 ns	0,27 ns	-4,19 ns
<b>Janeiro</b>	4,07 *	0,45 ns	0,23 ns	11,88 ns	2,93 ns	1,19 ns
<b>Fevereiro</b>	0,48 ns	0,48 ns	-0,12 ns	-1,74 ns	-0,58 ns	-2,34 ns
<b>Março</b>	-5,70 *	-0,92 ns	-2,04 ns	0,18 ns	-2,51 ns	-1,85 ns
<b>Abril</b>	1,00 ns	-1,38 ns	-4,48 *	-2,96 ns	-1,30 ns	-1,92 ns
<b>Mai</b>	-1,02 ns	-0,73 ns	-0,91 ns	0,22 ns	-0,43 ns	0,37 ns
<b>Junho</b>	-0,39 ns	1,99 +	0,87 ns	0,55 ns	0,16 ns	0,13 ns
<b>Julho</b>	7,09 ns	-0,36 ns	-1,90 ns	0,09 ns	0,00 ns	0,07 ns
<b>Agosto</b>	-2,63 ns	1,27 ns	0,14 ns	-0,03 ns	0,00 ns	0,02 ns
<b>Setembro</b>	1,39 ns	-0,30 ns	-0,58 ns	-0,14 ns	0,00 ns	0,00 ns
<b>Outubro</b>	0,00 ns	-0,04 ns	-0,13 ns	0,00 ns	0,00 ns	0,10 ns
<b>Novembro</b>	-0,70 ns	-0,31 ns	0,01 ns	-0,41 ns	-0,02 ns	-0,11 ns
<b>Dezembro</b>	1,59 ns	0,06 ns	0,26 ns	0,13 ns	0,43 ns	-0,14 ns

Legenda: ns = não significativo; +p < 0,10; \*p < 0,05; \*\*p < 0,01; \*\*\*p < 0,001

Período da análise: Areia (1995-2016); Campina Grande (1974-2016); João Pessoa (1961-2016); Monteiro (1973-2016); Patos (1977-2016); Sousa (1961-2016).

De acordo com Wilhite (2000) a seca meteorológica acontece quando há um desvio negativo nos valores de precipitação, ainda que na maioria dos resultados não sejam estatisticamente significativas, proporcionam uma diminuição de chuva que podem, posteriormente, colaborar para a ocorrência de secas agrícolas. O IPCC (2014) prevê uma diminuição de chuvas no Nordeste brasileiro e o aumento de períodos secos mais intensos e longos.

Em relação às tendências para umidade relativa do ar (Tabela 2.5), a estação de João Pessoa foi à única que apresentou significância anual ( $p < 0,10$ ,  $-0,05$  %/ano). Na análise mensal, observou-se que as tendências para umidade relativa apresentaram um comportamento inverso às da temperatura média, ou seja, a maioria dos resultados foi de decréscimo, uma vez que o aumento da temperatura proporciona o crescimento da pressão de saturação.

Nas estações de Areia e Campina Grande não houve significância em nenhuma análise. Em João Pessoa, os decrescimentos de significância mais relevantes foram para os meses de março ( $p < 0,05$ ,  $-0,15$  %/ano), setembro ( $p < 0,05$ ,  $-0,12$  %/ano) e outubro ( $p < 0,05$ ,  $-0,07$  %/ano). No que diz respeito à estação de Monteiro, apenas os meses de setembro ( $p < 0,05$ ,  $-0,26$  %/ano) e novembro ( $p < 0,10$ ,  $-0,18$  %/ano) tiveram tendências significativa, o que indica uma diminuição da porcentagem de nebulosidade no céu.

Tabela 2.5 - Tendências na umidade relativa do ar (%) apontados pelo teste de Mann-Kendall e quantificadas pelo declive de Sen para para as estações convencionais da Paraíba.

Período	Areia	Campina Grande	João Pessoa	Monteiro	Patos	Sousa
<b>Anual</b>	-0,04 ns	-0,03 ns	-0,05 +	-0,19 ns	-0,25 ns	0,08 ns
<b>Janeiro</b>	0,14 ns	0,16 ns	-0,02 ns	-0,09 ns	0,25 ns	0,20 ns
<b>Fevereiro</b>	0,12 ns	0,10 ns	-0,06 ns	-0,08 ns	-0,21 ns	0,18 ns
<b>Março</b>	-0,13 ns	-0,09 ns	-0,15 *	-0,41 ns	-0,70 *	0,26 +
<b>Abril</b>	-0,13 ns	-0,09 ns	-0,06 ns	-0,40 ns	-0,67 +	0,24 ns
<b>Mai</b>	-0,06 ns	-0,12 ns	-0,02 ns	-0,22 ns	-1,04 *	0,10 ns
<b>Junho</b>	-0,03 ns	-0,05 ns	-0,02 ns	-0,16 ns	-0,34 ns	-0,00 ns
<b>Julho</b>	0,06 ns	-0,10 ns	-0,09 +	0,09 ns	-0,25 ns	0,02 ns
<b>Agosto</b>	-0,21 ns	-0,04 ns	-0,09 +	-0,14 ns	-0,16 ns	-0,17 ns
<b>Setembro</b>	-0,05 ns	-0,04 ns	-0,12 *	-0,26 *	0,13 ns	-0,14 ns
<b>Outubro</b>	-0,07 ns	0,08 ns	-0,07 *	-0,12 ns	0,07 ns	0,10 ns
<b>Novembro</b>	-0,15 ns	-0,02 ns	-0,04 ns	-0,18 +	0,06 ns	0,23 ns
<b>Dezembro</b>	-0,02 ns	-0,09 ns	0,00 ns	-0,24 ns	0,05 ns	0,25 ns

Legenda: ns = não significativo; + $p < 0,10$ ; \* $p < 0,05$ ; \*\* $p < 0,01$ ; \*\*\* $p < 0,001$

Período da análise: Areia (1996-2016); Campina Grande (1974-2016); João Pessoa (1961-2016); Monteiro (1973-2015); Patos (1977-2016); Sousa (1961-2016).

A estação de Patos apresentou tendências de significância de decrescimento no período de março a maio. Os resultados apontaram uma declividade de  $-0,70$  %/ano com  $p < 0,05$ , declividade de  $-0,668$  %/ano com  $p < 0,10$  e declividade de  $-1,04$  %/ano com  $p < 0,05$ , respectivamente. Enquanto que a estação de Sousa foi à única estação que apresentou tendência significativa positiva dentre todas as estações analisadas, porém apenas no mês de março ( $p < 0,10$ ,  $0,26$  %/ano).

As tendências de decrescimento da umidade relativa do ar acompanhadas do aumento nas temperaturas favorecem uma maior necessidade do uso de irrigação na agricultura, podendo proporcionar perdas de produtividade. Além disso, a umidade relativa do ar é um

fator determinante na qualidade de produção, podendo até estar relacionada a incêndios em plantações em casos de baixa umidade relativa do ar (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION - WMO, 2012).

A Figura 2.3 revela a área colhida (ha) da cana-de-açúcar nas mesorregiões do Agreste Paraibano, Borborema, Mata Paraibana e Sertão Paraibano entre os anos de 1973 e 2016. De forma já manifesta, a Mata Paraibana destaca-se como a mesorregião mais produtiva em comparação com as demais, apresentando uma tendência crescente de área colhida para a cultura da cana-de-açúcar. Posteriormente, e com uma área colhida significativamente inferior, tem-se o Agreste Paraibano, que apresenta uma tendência decrescente de área colhida para essa cultura ao longo do período estudado. As mesorregiões do Sertão Paraibano e Borborema apresentam uma área colhida muito baixa e quase que constante ao longo do período mencionado, de modo que suas linhas de tendências se comportam de maneira semelhante.

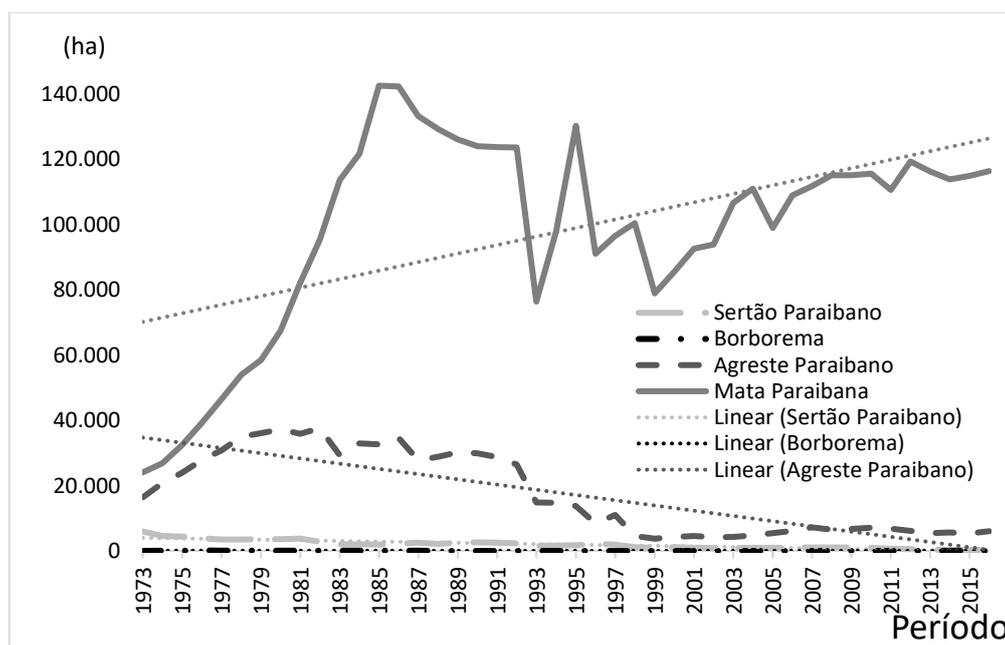


Figura 2.3 - Área colhida (ha) da cana-de-açúcar nas mesorregiões do Estado da Paraíba entre os anos de 1973 a 2016.

Fonte: Adaptado de IBGE (2017).

A Tabela 2.6 apresenta as tendências verificadas para a área colhida (ha) e produção (t) da cana-de-açúcar apontadas pelo teste de Mann-Kendall e quantificadas pelo declive de Sen, para as mesorregiões da Paraíba. Percebe-se, claramente, que as tendências para área

colhida e produção da cana-de-açúcar apresentam tendência de crescimento apenas para Mata Paraibana ( $p < 0,01$ , 1372,64 ha/ano;  $p < 0,01$ , 84894,76 t/ano), enquanto que as outras mesorregiões apresentam tendência significativa de decréscimo para ambas variáveis analisadas. Alguns fatores podem auxiliar a compreender este fenômeno, que diferencia a Mata Paraibana das outras mesorregiões, tais como: sua localização, que colabora para boas condições climáticas, que favorecem a cultura canavieira, o Programa Nacional do Álcool (PROÁLCOOL), que contribuiu para modernização do parque industrial sucroalcooleiro na Região, maiores investimentos em tecnologias de irrigação e maquinários.

Na Tabela 2.6, há uma tendência positiva para a Mata Paraibana, mais tradicional Região canavieira do Estado, continuar aumentando a produtividade, levando em consideração os crescentes estudos e investimentos em irrigação. Enquanto para as outras mesorregiões do Estado da Paraíba (Sertão Paraibano, Borborema e Agreste Paraibano) a tendência é negativa, apontando para a redução da área colhida e produção, isto se deve especialmente ao período de seca, que vem afetando boa parte dos municípios dessas regiões, principalmente as localizadas no semiárido brasileiro.

Tabela 2.6 - Tendências da área colhida (ha) e produção (t) da cana-de-açúcar apontadas pelo teste de Mann-Kendall e quantificadas pelo declive de Sen para as mesorregiões da Paraíba no período de 1973 a 2016.

	Sertão Paraibano	Borborema	Agreste Paraibano	Mata Paraibana
<b>Área colhida (ha)</b>	-93,35 ***	-1,14 ***	-761,25 ***	1.372,64 **
<b>Produção (t)</b>	-2.805,13 ***	-23,89 ***	-33.788,85 ***	84.894,76 **

Legenda: ns = não significativo; +p < 0,10; \*p < 0,05; \*\*p < 0,01; \*\*\*p < 0,001

A tendência de aumento da temperatura sobre a área da cana-de-açúcar, nos últimos anos, parece não ter prejudicado a produtividade canavieira. Contudo, um aumento na temperatura muito intenso, como relatado por Manhães *et al.* (2015), torna-se prejudicial para a cultura da cana-de-açúcar, deixando seu crescimento mais lento. Essas tendências detectadas, especialmente na Mata Paraibana, onde a maioria dos meses apresentaram tendências significativas de aumento na temperatura do ar, apontam para uma provável interferência negativa futura do aquecimento global nas lavouras canavieiras.

Às tendências da precipitação, as mesorregiões da Mata Paraibana e Agreste Paraibano apresentaram aumento significativo na precipitação, em meses distintos, porém constata-se que não importa tanto que tenha diminuído ou aumentado o nível de precipitação,

uma vez que a irrigação pode suprir um déficit hídrico. Isso se dá devido às fases de crescimento da cana-de-açúcar, que entre o plantio e a colheita podem ser divididas em quatro: brotação (1 mês), perfilhamento (1 a 2 meses), crescimento vegetativo (6 meses) e maturação (2 meses). A planta necessita de mais de água nas duas primeiras fases; posteriormente sua exigência hídrica diminui, tornando-se quase desnecessária na maturação (SCARPARE; LEAL; VICTORIA, 2013; WALTER *et al.*, 2014).

Carvalho *et al.* (2015) e Zhao e Li (2015) apontam que em alguns cenários de mudança climática o potencial de crescimento e produtividade canavieira podem ser reduzidos, sem o uso adequado de irrigação. Em todo o Estado da Paraíba, já se observa um aumento na utilização de técnicas de irrigação para aumentar a produtividade, em especial em usinas de cana-de-açúcar, com objetivo de diminuir os custos de produção. Desse modo, a tecnologia de irrigação se tornou uma alternativa rentável e operacional para as condições da Paraíba.

Em 1985, somente 375 estabelecimentos agropecuários usavam a prática da irrigação na Paraíba, sendo a área irrigada equivalente a 5.026 (ha), o que representava 26,6% da área colhida no Estado. Em 1995, o número de estabelecimentos passou a ser de 988, dos quais a área irrigada totalizava 36.819 hectares (57,9% do total da área irrigada). Dados do censo de 2017, cuja pesquisa foi realizada em 2016, identificou que o número de estabelecimentos agropecuários com uso de irrigação na Paraíba chegou a 19.284, no qual equivale a 105.178 (ha) de área irrigada. No que se refere à área colhida de cana-de-açúcar, a área irrigada equivale a 113.870 (ha) dos 122.770 (ha), ou seja, 92,75% do total da área irrigada no Estado (IBGE, 2018).

Diversos autores como Inman-Bamber e Smith (2005) e Gunarathna *et al.* (2018) apontam os benefícios da utilização da irrigação na cultura canavieira, colocando como principais vantagens: o aumento da produtividade, a longevidade das soqueiras e a diminuição dos custos operacionais no processo produtivo. Desse modo, a utilização da irrigação permite que a cana-de-açúcar tenha atendidas suas exigências hídricas durante todo seu ciclo, proporcionando maior produtividade e produtos de boa qualidade. Conforme Guarenghi e Walter (2016) no Nordeste brasileiro a irrigação suplementar (utilizada para atender a demanda por água nos períodos mais críticos do desenvolvimento e crescimento da planta) se tornou uma prática habitual no cultivo da cana-de-açúcar.

Desse modo, percebe-se que determinados locais possuem clima ideal para cana-de-açúcar, sem limitações, ao mesmo tempo em que outros apresentam algumas condições

climáticas específicas, podendo, ainda, garantir uma produção economicamente viável, como a mesorregião da Mata Paraibana. No entanto, há municípios em que as restrições são limitantes e o cultivo só é economicamente viável se houver o uso de variedades adaptadas e de técnicas para compensar as deficiências hídricas.

## **2.4 CONCLUSÃO**

A análise de tendências realizada, a partir da aplicação dos testes estatísticos de Mann-Kendall e Sen para os parâmetros analisados permitiu concluir que a temperatura média apresentou tendência crescente para as estações localizadas em Campina Grande, João Pessoa, Monteiro, Patos e Sousa para o período em estudo. Como a estação de Areia apresentou apenas um resultado significativo ocorrido no mês de junho, não é possível afirmar sobre a predisposição ao aumento ou diminuição da temperatura nessa estação. Por meio da análise realizada, foi possível averiguar, ainda, que as condições hídricas da Mata Paraibana beneficiam o desenvolvimento da cana-de-açúcar, uma vez que as ocorrências de perdas de produtividade diminuem.

Em relação à precipitação total, a maioria dos resultados obtidos para o período analisado não apresentaram tendências significativas, o que dificulta a realização de uma análise mais consistente. Esse resultado pode ser justificado pela alta variabilidade normalmente encontrada em dados de precipitação. Nesse sentido, apenas as estações de Areia, Campina Grande e João Pessoa obtiveram tendências significativas em alguns meses. Ressalta-se que a utilização da irrigação na cultura canavieira pode suprir um déficit hídrico, sendo seu uso, atualmente na Paraíba, uma das alternativas tecnológicas em procura da verticalização da produção dessa cultura, contribuindo para o aumento da produtividade da cana-de-açúcar.

Para a umidade relativa do ar, grande parte das tendências observadas não foram significativas. As estações de João Pessoa, Monteiro, Patos e Sousa foram as únicas que apresentaram tendências significativas. Para esse parâmetro, ressalta-se o fato do caráter negativo da maioria das tendências analisadas (11 no total de 12), que atentam para uma diminuição de umidade relativa do ar.

As tendências para o cultivo e produção da cana-de-açúcar apontam para aumentos na mesorregião da Mata Paraibana e decréscimo, especialmente devido aos efeitos da seca, no Sertão Paraibano, Borborema e Agreste Paraibano.

## REFERÊNCIAS

AESA – Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. **Resumo Estendido**. João Pessoa, 2016. Disponível em: <<http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/documentos/plano-estadual/resumo-estendido/>>. Acesso em: 8 fev. 2019.

ALVES, L. M.; MARENGO, J. Assessment of regional seasonal predictability using the PRECIS regional climate modeling system over South America. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 100, n. 3-4, p. 337-350, 2010.

ARIAS, D.; CABALLERO, J. **Paraíba State, Brazil: Agricultural Sector Risk Assessment**. Washington: The World Bank, 2015.

BLANCO, M.; RAMOS, F.; DOORSLAER, B. V.; MARTÍNEZ, P.; FUMAGALLI, D.; CEGLAR, A.; FERNÁNDEZ, F. J. Climate change impacts on EU agriculture: A regionalized perspective taking into account market-driven adjustments. **Agricultural Systems**, v. 156, p. 52-66, 2017.

BIERMANN, F.; ABBOTT, K.; ANDRESEN, S.; BÄCKSTRAND, K.; BERNSTEIN, S.; BETSILL, M. M.; BULKELEY, H.; CASHORE, B.; CLAPP, J.; FOLKE, C.; GUPTA, A.; GUPTA, J.; HAAS, P. M.; JORDAN, A.; KANIE, N.; KLUVÁNKOVÁ-ORAVSKÁ, T.; LEBEL, L.; LIVERMAN, D.; MEADOWCROFT, J.; MITCHELL, R. B.; NEWELL, P.; OBERTHÜR, S.; OLSSON, L.; PATTBERG, P.; SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, R.; SCHROEDER, H.; UNDERDAL, A.; CAMARGO, S. V.; VOGEL, C.; YOUNG, R. O.; BROCK, A.; ZONDERVAN, R. Navigating the anthropocene: improving earth system governance. **Science**, v. 335, n. 6074, p. 1306-1307, 2012.

CARVALHO, A. L.; MENEZES, R. S. C.; NÓBREGA, R. S.; PINTO, A. S. OMETTO, J. P. H. B.; RANDOW, C. V.; GIAROLLA, A. Impact of climate changes on potential sugarcane yield in Pernambuco, northeastern region of Brazil. **Renewable Energy**, v. 78, p. 26-34, 2015.

COSTANZA, R.; GRAUMLICH, L.; STEFFEN, W.; CRUMLEY, C.; DEARING, J.; HIBBARD, K.; LEEMANS, R.; REDMAN, C.; SCHIMEL, D. Sustainability or collapse: what can we learn from integrating the history of humans and the rest of nature?. **Ambio**, v. 36, n. 7, p. 522-527, 2007.

DAYANA, M. L. The population dynamics of insects in sugarcane field at Aundipatti, Theni district, Tamil Nadu. **Journal of the International Association of Advanced Technology and Science**, v. 16, n. 2, p. 1-24, 2015.

DESCHÊNES, O.; GREENSTONE, M. The economic impacts of climate change: evidence from agricultural output and random fluctuations in weather. **The American Economic Review**, v. 97, n. 1, p. 354-385, 2007.

DOOREMBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979.

EGGLESTON, G.; LEGENDRE, B.; RICHARD, C. Effect of harvest method and storage time on sugarcane deterioration I: cane quality changes. **International Sugar Journal**, v.103, n.1232, p. 331-338, 2001.

GILBERT, R.A.; SHINE JUNIOR, J.M.; MILLER, J.D.; RICE, R.W.; RAINBOLT, C.R. The effect of genotype, environment and time of harvest on sugarcane yields in Florida, USA. **Field Crops Research**, [S.l.], v. 95, p. 156-170, 2006.

GOOSSENS, C.; BERGER, A. Annual and seasonal climatic variations over the northern hemisphere and Europe during the last century. In *Annales geophysicae. Series B. Terrestrial and planetary physics*, v. 4, n. 4, p. 385-399, 1986.

GUARENGHI, M. M.; WALTER, A. Assessing potential impacts of sugarcane production on water resources: A case study in Brazil. **Wiley online library**, v. 10, n. 6, p. 699-709, 2016.

GUNARATHNA, M. H. J. P.; SAKAI, K.; NAKANDAKARI, T.; MOMII, K.; ONODERA, T.; KANESHIRO, H.; UEHARA, H.; WAKASUGI, K. Optimized Subsurface Irrigation System: The Future of Sugarcane Irrigation. **Water**, v. 10, n. 3, p. 1-14, 2018.

HENRY, R. J. Basic Information on the sugarcane plant. In: HENRY, R.; KOLE, C. (Ed.). **Genetics, genomics and breeding of sugarcane**. New York: CRC Press, 2010.

IBGE - Brazilian Institute of Geography and Statistics. **Municipal Agricultural Production 2017** (Produção Agrícola Municipal 2017). Rio de Janeiro: IBGEb, 2017. Available in: <<https://sidra.ibge.gov.br>>. Access in: 8 fev. 2019.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário**. Rio de Janeiro: IBGE, 2018. Disponível em: <[www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)>. Acesso em: 8 fev. 2019.

INMAN-BAMBER, N. G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, v. 89, p. 107-122, 2004.

INMAN-BAMBER, N. G.; BONNETT, G. D.; SPILLMAN, M. F.; HEWITT, M. L.; JACKSON, J. Increasing sucrose accumulation in sugarcane by manipulating leaf extension and photosynthesis with irrigation. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 59, p. 13-26, 2008.

INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, v. 92, n. 2-3, p. 185-202, 2005.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Banco de dados meteorológicos para o ensino e pesquisa**. 2018. Disponível em: <[www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep](http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep)>. Acesso em: 8 fev. 2019.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. TEAM, C. W.; PACHAURI, R. K.; REISINGER, A. (eds.). Geneva, Switzerland, 2014.

JAMES, G. The chemical ripening of sugarcane. **International Sugar Journal**, v.101, n.1211, p.560-562, 1999.

JUHOLA, S.; KLEIN, N.; KAYHKO, J.; NESET, T. S. S. Climate change transformations in Nordic agriculture?. **Journal of Rural Studies**, v. 51, p. 28-36, 2017.

KENDALL, M. G. **Rank Correlation Methods**. London: Charles Griffin, 1975.

MANHÃES, C. M. C.; GARCIA, R. F.; FRANCELINO, F. M. A.; FRANCELINO, H. O.; COELHO, F. C. Factors that affect sprouting and tillering of sugar cane. **Vértices**, v. 17, p. 163-181, 2015.

MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. *Econometric*. **The econometric society**, v. 13, p. 245-259, 1945.

MARIN, F. R.; JONES, J. W.; ROYCE, F.; SUGUITANI, C.; DONZELI, J. L.; PALLONE FILHO, W. J. P.; NASSIF, D. S. P. Parameterization and evaluation of predictions of DSSAT/CANEGRO for Brazilian sugarcane. **Agronomy Journal, Madison**, v. 103, p. 100-110, 2011.

MARIN, F. R.; JONES, J. W.; ROYCE, F.; PELLEGRINO, G. Q.; ASSAD, E.D.; Barbosa, F.J. Climate change impacts on sugarcane attainable yield in Southern Brazil. **Climatic Change**, v. 1, p. 101-110, 2012.

MO, X. G.; HU, S.; LIN, Z. H.; LIU, S. X.; XIA, J. Impacts of climate change on agricultural water resources and adaptation on the North China Plain. **Advances in Climate Change Research**, v. 8, n. 2, p. 93-98, 2017.

NELSON, G. C.; VALIN, H.; SANDS, R. D.; HAVLÍK, P.; AHAMMAD, H.; DERYNG, D.; ELLIOTT, J.; FUJIMORI, S.; HASEGAWA, T.; HEYHOE, E.; KYLE, P.; VON, L. M.; LOTZE-CAMPEN, H.; MASON, D. D.; VAN, M. H.; VAN, D. M. D.; MÜLLER, C.; POPP, A.; ROBERTSON, R.; ROBINSON, S.; SCHMID, E.; SCHMITZ, C.; TABEAU, A.; WILLENBOCKEL, D. Climate change effects on agriculture: Economic responses to biophysical shocks. **PNAS**, v. 111, n. 9, p. 3274-3279, 2014.

OYAMA, M. D.; NOBRE, C. A. A new climate-vegetation equilibrium state for Tropical South America. **Geophysical Research Letter**, v. 30, n. 23, p. 2199, 2003.

RUDORFF, B. F. T.; AGUIAR, D.A.; SILVA, W. F.; SUGAWARA, L. M.; ADAMI, L.; MOREIRA, M. A. Studies on the Rapid Expansion of Sugarcane for Ethanol Production. in São Paulo State (Brazil) Using Landsat Data. **Remote Sensing**, v. 2, p. 1057-1076, 2010.

SALMI, T.; MÄÄTTÄ, A.; ANTTILA, P.; RUOHO-AIROLA, T.; AMNELL, T. **Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates** - The Excel template application makesens. n. 31, Finnish Meteorological Institute: Helsinki, 2002.

SCARPARE, F. V.; LEAL, M. R. L. V.; VICTORIA, R. L. The challenges of sugarcane ethanol in Brazil: past, present and future. In: DELLEMAND, J. F.; HILBERT, J. A.; MONFORTI, F. **Bioenergy and Water**. Milam: Luxembourg, 2013. p. 89-101.

SEN, P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. **Journal of the American Statistical Association**, v. 63, p. 1379-1389, 1968.

SRIVASTAVA, A. K.; RAI, M. K. Sugarcane production: Impact of climate change and its mitigation. **Biodiversitas**, v. 13, n. 4, p. 213-227, 2012.

VERHEYE, W. H. **Soils, Plant Growth and Crop Production**. Encyclopedia of life support systems. Oxford: Eolss Publishers, 2010.

WALTER, A.; GALDOS, M. V.; SCARPARE, F. V.; LEAL, M. R. L. V.; SEABRA, J. E. A.; CUNHA, M. P.; PICOLI, M. C. A.; OLIVEIRA, C. O. F. Brazilian sugarcane ethanol: developments so far and challenges for the future. **WIREs Energy Environ**, v. 3, n. 1, p. 70-92, 2014.

WILHITE, D. A. **Drought as a natural hazard**: Conceptions and definitions. In: Drought: A global assessment. Nebraska: Routledge, 2000. p. 111-120.

WMO – World Meteorological Organization. **Guide to Agricultural Meteorological Practices**. n. 134, 2012.

YUE, P. S.; YANG, T. C.; WU, C. K. Impact of climate change on water resources in southern Taiwan. **Journal of Hydrology**, v. 260, p. 161-175, 2002.

ZHAO, D.; LI, Y. R. Climate change and sugarcane production: Potential impact and mitigation strategies. **International Journal of Agronomy**, v. 2015, p. 1-10, 2015.

### CAPÍTULO 3

#### **ARTIGO: Efeitos das mudanças climáticas na produção da cana-de-açúcar no Estado da Paraíba (Brasil): uma abordagem de dados em painel (1990-2015)**

**Resumo:** As mudanças climáticas são um dos mais relevantes desafios a serem enfrentados pelas sociedades contemporâneas. Os efeitos das variabilidades climáticas vêm acentuando, ainda mais, a vulnerabilidade agrícola de uma localidade, sobretudo devido à dependência da agricultura aos fatores climáticos. Este trabalho analisou os impactos dos elementos climáticos na produção de cana-de-açúcar para os municípios do Estado da Paraíba, no Brasil, no período de 1990 a 2015. Foi investigado de que maneira o comportamento dos elementos climáticos temperatura do ar e precipitação influenciam em cada mesorregião. Por meio da função de produção foi estimada uma regressão com dados em painel pelos modelos pooled, de efeitos fixos e de efeitos aleatórios. Para verificar qual modelo foi mais adequado, foram realizados os testes de Chow, Hausman, Breusch-Pagan e Wooldridge. De acordo com os testes, o modelo mais adequado a ser utilizado foi o pooled. Os resultados evidenciaram que houve impactos dos parâmetros climáticos na produção de cana-de-açúcar nos municípios da Paraíba. A precipitação foi uma condicionante positivamente correlacionada com a produção e a temperatura influenciou negativamente. Percebeu-se uma resposta heterogênea dos impactos para as mesorregiões, com os municípios pertencentes à mesorregião da Mata Paraibana possuindo maior probabilidade de produção de cana-de-açúcar em relação às outras mesorregiões.

**Palavras-Chave:** Agricultura; Clima; Prudução; Dados combinados.

**Abstract:** Climate change is one of the most relevant challenges faced by contemporary societies. The effects of climate variability emphasize the agricultural vulnerability of a location, especially through the dependence of agriculture on climatic factors. This work analyzed the impacts of climatic elements on sugarcane production for municipalities of the state of Paraíba, Brazil, from 1990 to 2015. We investigated how the behavior of climatic elements, air temperature and rainfall influenced each mesoregion. Through the production function, a regression with panel data was estimated using pooled fixed and random effects models. To verify which model was most appropriate, the Chow, Hausman, Breusch-Pagan and Wooldridge tests were performed. According to the tests, the most suitable model was the pooled model. The results showed the impacts of climatic parameters on sugarcane production in the municipalities of Paraíba state, Brazil. Rainfall was positively correlated with production, whereas the temperature negatively influenced production. A heterogeneous response of the impacts on the mesoregions was noted, with the municipalities belonging to the mesoregion of Mata Paraibana having a higher probability of producing sugarcane than other mesoregions.

**Keywords:** Agriculture; Climate; Pruduction; Combined data.

### 3.1 INTRODUÇÃO

As atividades humanas vêm influenciando nas mudanças climáticas do planeta. De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), evidências científicas apresentaram que as emissões de gases de efeito estufa (GEE) vêm crescendo substancialmente, principalmente, devido ao uso de combustíveis fósseis. A concentração dos gases na atmosfera é a mais alta desde os últimos 800 mil anos. Se nada mudar, a previsão para o ano de 2100 terá um aumento de 5° C da temperatura média global (IPCC, 2014).

Estimam-se cenários climáticos preocupantes devido a estas previsões, proporcionando eventos extremos frequentes, tais como secas prolongadas, queimadas, inundações, ciclones tropicais e ondas de calor. A agricultura está entre os setores mais fortemente atingidos. Estima-se que as culturas tolerantes a altas temperaturas (mandioca e cana-de-açúcar) serão beneficiadas na maioria dos locais até o limite de tolerância, enquanto outras culturas (café, soja e algodão) terão redução na sua área de cultivo e produção (PINTO; ASSAD, 2008).

Conforme FAO (2015), a produtividade agrícola de regiões tropicais com baixa latitude tende a diminuir devido às alterações climáticas. A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) é considerada como uma planta típica de clima tropical e subtropical, com ciclo vegetativo extenso, permanecendo no solo ao longo de todas as estações do ano e, em razão disso, sua produtividade torna-se muito influenciada pelos elementos climáticos (SRIVASTAVA; RAI, 2012; FRANCISCO *et al.*, 2017).

Considera-se a cana-de-açúcar uma das principais culturas brasileiras, devido ao seu poder de desenvolvimento econômico, com geração de emprego e renda. O Brasil produziu 633,9 milhões de toneladas (t) de cana-de-açúcar que gerou 35,6 milhões de t de açúcar e 28,5 mil metros cúbicos de etanol. O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e açúcar e segundo maior produtor do etanol. Da produção brasileira, a Região Centro-Sul detém de 90,4% da cana-de-açúcar e 90,2% da produção do açúcar e 91,9% do etanol produzido. E a Região Norte-Nordeste representando o restante da outra parcela. Para a safra 2014/2015, o Estado da Paraíba teve a cana-de-açúcar como a principal atividade agrícola, produzindo 6,7 milhões t, gerando 0,1 milhões t de açúcar e 0,4 mil m<sup>3</sup> de etanol (UNICA, 2015).

Para a cana-de-açúcar, os elementos climáticos são os que mais afetam no processo de crescimento e desenvolvimento da cultura. Normalmente, as baixas temperaturas e a

escassez de recursos hídricos contribuem para a diminuição das safras e comprometem a qualidade do produto final (ALVES; MARENGO, 2010; IPCC, 2014).

A econometria fundamenta-se na aplicação de métodos matemáticos e estatísticos às questões econômicas, para dar uma base empírica aos modelos desenvolvidos e alcançar resultados numéricos (TINTNER, 1968; FRISCH, 1993). Os modelos de dados em painel é um método empregado para incorporar uma combinação de séries temporais e de observações em corte transversal (BALTAGI, 2005; HSIAO, 2014). Ao comparar com outros modelos econométricos, se destaca na verificação da heterogeneidade, amplia o grau de liberdade e diminui a correlação entre duas ou mais variáveis independentes e explicativas (HSIAO, 2014).

Alguns estudos econométricos de Mendelsohn, Nordhaus e Shaw (1994), Deschênes e Greenstone (2007) e Cunha *et al.* (2015) trouxeram uma discussão sobre as mudanças climáticas e sua influência na produção agrícola.

Mendelsohn, Nordhaus e Shaw (1994), utilizando um modelo hedônico com dados *cross-section* para analisar o clima na agricultura dos Estados Unidos, constataram um aumento de temperatura média no verão, inverno e primavera e que esse crescimento prejudica as terras agrícolas, enquanto que o aumento da precipitação contribuiria para o aumento da produtividade. Deschênes e Greenstone (2007), ao analisar os efeitos das mudanças do clima, utilizando dados em painel em um modelo de efeitos fixos, chegaram à conclusão que os efeitos do clima na economia americana sobre o valor da terra agrícola deve variar no intervalo de US\$ 200,0 bilhões a US\$ 320,0 bilhões.

Cunha *et al.* (2015), utilizando o método de máxima verossimilhança, afirmam que os prejuízos econômicos das mudanças climáticas na agricultura variam de estimativas pequenas no curto prazo até amplas perdas a longo prazo. Além de problemas financeiros, outros problemas podem aparecer, como pobreza rural, migração, doenças, secas e catástrofes naturais.

Com o intuito de orientação na tomada de decisão de políticas públicas, este trabalho analisou os impactos potenciais dos elementos climáticos na produção de cana-de-açúcar para os municípios do Estado da Paraíba (Brasil), no período de 1990 a 2015. Para tanto, foi utilizado o método de análise de dados em painel.

## 3.2 MATERIAL E MÉTODOS

### 3.2.1. Objeto de estudo

O Estado da Paraíba (Figura 3.1) possui uma área de 56.468,435 km<sup>2</sup>, com densidade demográfica de 66,70 hab/km<sup>2</sup>, situado no extremo leste da Região Nordeste do Brasil. O Estado possui 04 mesorregiões, 23 microrregiões e 223 municípios, com população estimada de 3.999.415 habitantes (IBGE, 2016).

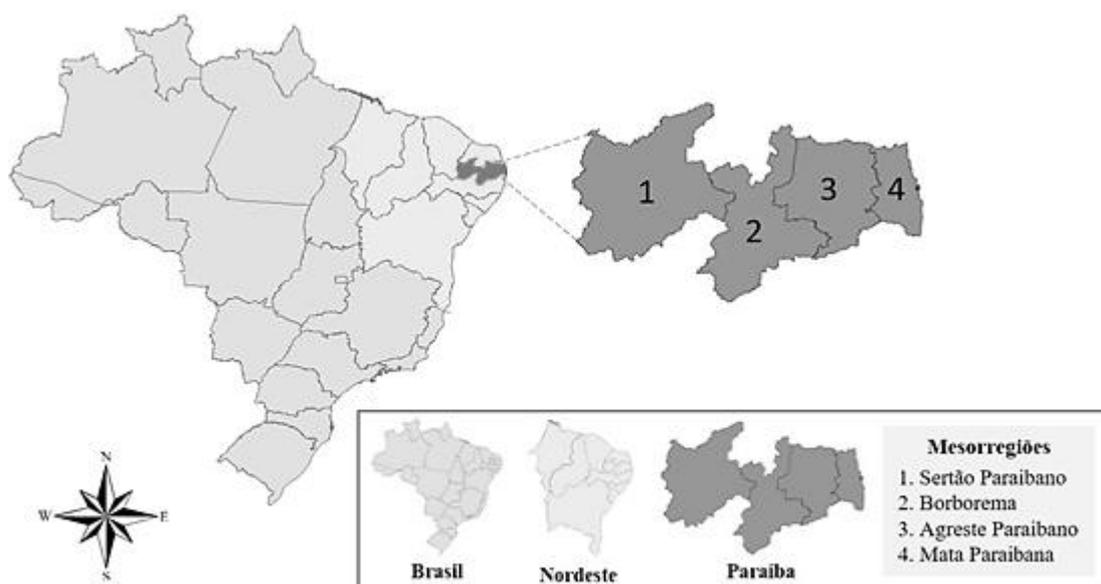


Figura 3.1 - Mapa de localização do Estado da Paraíba no Brasil, com divisão das mesorregiões.

As variáveis utilizadas neste estudo foram: produção de cana-de-açúcar, temperatura e precipitação, no período de 1990 a 2015. Os dados da produção de cana-de-açúcar, em toneladas (t), foram obtidos no Sistema de Recuperação Automática (SIDRA) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Os dados de precipitação total anual, em milímetros (mm), e temperatura média anual, em graus Celsius (°C), estão disponíveis na base de dados CL 3.21 do *Climate Research Unit – CRU/University of East Anglia* (CRU, 2018).

As médias de temperatura e precipitação para cada município foram oriundas dos pontos de grid unidos às fronteiras municipais empregando as coordenadas de latitude e longitude. Para este procedimento foi utilizado QGIS (versão 2.18).

Foi apresentada uma síntese da evolução da produção da cana-de-açúcar nas mesorregiões da Paraíba, para os anos de 1990, 1995, 2000, 2005, 2010 e 2015, em milhões toneladas ( $10^6$  t) e uma síntese da evolução do comportamento climático (temperatura média e precipitação total) do Estado da Paraíba de 1990 a 2015.

### 3.2.2 Modelos de dados em painel

Conforme Greene (2012), o modelo geral para dados em painel pode ser descrito como na equação 3.1.

$$Y_{it} = Z_i\alpha + x_{it}\beta + \varepsilon_{it} \quad (3.1)$$

em que:

$X^2$  = unidade de observação no espaço (município com produção de cana-de-açúcar na Paraíba);

$t$  = unidade de observação no tempo (1990 a 2015);

$x_{it}$  = vetor  $1 \times K$  de variáveis exógenas (temperatura e precipitação);

$Z_i$  = fator de medição de heterogeneidade;

$\varepsilon_{it}$  = termo de erro;

$\sigma$ ,  $\alpha$  e  $\beta$  = parâmetros do modelo.

As variáveis exógenas podem sofrer variações entre os municípios e anos considerados. Dependendo do pressuposto realizado sobre o termo  $Z_i$ , foi possível escolher entre os três modelos aplicados: *pooled*, de efeito fixo e de efeito aleatório. Se  $Z_i$  contém apenas a constante, logo proporciona estimadores constantes e eficientes para o coeficiente comum  $\alpha$  e para o vetor de inclinação  $\beta$ .

Os modelos de dados em painel apenas ponderam dados de maneira empilhada, sem levar em conta as particularidades dos municípios, assim como a evolução destes atributos ao longo do tempo. Se  $Z_i$  não for observado, contudo correlacionado com os regressores  $x_{it}$ , o estimador de método dos mínimos quadrados será inconsistente (equação 3.2).

$$Y_{it} = (\delta + \alpha_i) + x_{it}\beta + \varepsilon_{it} \quad (3.2)$$

em que,

$\alpha_i$  = é um elemento do intercepto;

$\delta$  = é constante que designa a parcela comum a todos os municípios ou no tempo estimado.

O  $\alpha_i$  é uma constante específica para cada município de seção cruzada (municípios) ou no tempo, este modelo é denominado de efeitos fixos. Se  $Z_i$  for uma condição não observada e não correlacionado com os regressores  $x_{it}$ , ele será um elemento do termo de erro, conforme a equação 3.3.

$$Y_{it} = \delta + x_{it}\beta + (\alpha_i\varepsilon_{it}) \quad (3.3)$$

Apesar de que os estimadores de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) estejam consistentes, eles serão ineficientes. Neste sentido,  $\alpha_i$  é um componente aleatório, o modelo é então chamado de modelo de efeitos aleatórios.

### 3.2.2.1 Modelo pooled (POLS)

O primeiro modelo testado com dados em painel foi o modelo POLS (*pooled ordinary least squares*), o qual assume que a conduta das observações seja semelhante para todos os municípios analisados (CAMERON; TRIVEDI, 2009). Ao longo do tempo examinado, todas as observações foram uniformes tanto no coeficiente constante quanto nos coeficientes angulares. O modelo assume que os regressores sejam exógenos e que o termo de erro seja  $\mu_{it}$ , em vez da decomposição  $\alpha_i + \varepsilon_{it}$ , conforme a equação 3.4.

$$Y_{it} = \beta_0 x_{it} \beta_1 \mu_{it} \quad (3.4)$$

### 3.2.2 Modelo de efeitos fixos

De acordo com Verbeek (2000), no modelo de efeito fixo, as mudanças nos elementos são iguais para todas as unidades e períodos. Cada elemento proporciona particularidades heterogêneas sob os outros. Assim, este modelo torna-se apropriado quando a variável independente do elemento pode se relacionar com um ou mais regressores.

O modelo de efeitos fixos (equação 3.5) almeja controlar os efeitos das variáveis omissas que variam entre municípios e encontram-se constantes ao longo do tempo. Supõe que o intercepto varia de um município para outro, mas sendo constante ao longo do tempo, razão pela qual o modelo é denominado efeitos fixos (HILL *et al.*, 1997).

$$Y_{it} = \alpha_i + x_{it}\beta + \eta_{it} \quad (3.5)$$

em que:

$\alpha_i = Z_{i\alpha}$ , sendo  $Z_i$  a heterogeneidade individual que contém um termo constante e um conjunto de variáveis não observadas.

### 3.2.2.3 Modelo de efeitos aleatórios

O modelo de efeitos aleatórios (equação 3.6) estima os elementos de variância para os grupos (ou tempos) e o erro considerando os mesmos interceptos e inclinações. Esse modelo tem os mesmos pressupostos que o modelo de efeitos fixos, no qual o intercepto é suscetível de variação entre os municípios, contudo não é passível de variação ao longo do tempo. Todavia, o modelo de efeitos aleatórios possui o termo erro em dois componentes, um sistemático e outro não sistemático, sendo ambos não correlacionados com os regressores. Assim, faz com que o componente específico de cada município e as variáveis explicativas usadas no modelo sejam não correlacionados.

Neste modelo os erros das unidades de seção cruzada observadas em diferentes períodos de tempo são correlacionados, assim, o método de aplicação dos MQO são inapropriados (homogeneidade). Quando isso acontece, o método mais apropriado para a estimativa dos coeficientes é o método dos Mínimos Quadrados Generalizados (MQG) (GREENE, 2012).

$$Y_{it} = \alpha_i + x_{it}\beta + V_{it} \quad (3.6)$$

Em que  $\alpha_1 \neq \alpha_2 \neq \alpha_3 \dots \neq \alpha_k$

$V$  = termo de erro do modelo de regressão

### 3.2.3 Testes econométricos para modelos de dados em painel

Para decidir qual modelo econométrico era o mais adequado aos objetivos deste estudo, foram aplicados os testes de Chow, Hausman, Lagrange Breusch-Pagan, Wold e de Wooldridge. Estes testes foram destinados a identificar os prováveis vieses na estimativa e avaliar o comportamento conjunto de determinados dados. Eles ponderaram as diferenças existentes entre os municípios e as especificidades de cada período de tempo que compõe a amostra.

### 3.2.3.1 Teste de Chow

O teste de Chow averigua a melhor escolha entre o modelo *pooled* e o modelo de efeitos fixos, no qual calcula-se de maneira separada regressões para cada conjunto de dados, averiguando a diferença nas equações estimadas. Assim, com esse teste torna-se possível verificar se os parâmetros são estáveis durante o período analisado. Vale destacar que em situação em que a diferença seja significativa, a própria sugere uma mudança estrutural na relação. Evidencia-se que o teste parte do fundamento de que a data da mudança estrutural seja conhecida (GUJARATI; PORTER, 2008). O teste de Chow é representado pela equação 3.7.

$$F_C = \frac{\frac{R_{ef}^2 - R_{pooled}^2}{m}}{\frac{1 - R_{ef}^2}{N - K}} \quad (3.7)$$

em que,

$R_{ef}^2$  = o coeficiente de determinação ajustado;

$N - K$  = o número de regressores do modelo com efeitos fixos;

$R_{pooled}^2$  = o coeficiente de determinação ajustado;

$m$  = o número de regressores do modelo *pooled* respectivamente.

As hipóteses nula e alternativa do teste de Chow são:

- Hipótese nula: modelo *pooled* é o mais adequado.
- Hipótese alternativa: modelo de efeito fixo é o mais adequado.

De maneira geral, na hipótese nula do teste de Chow as estimativas para os coeficientes são estáveis, ou seja, o modelo *pooled* é mais aconselhável ao modelo de efeitos fixos. Se a hipótese nula for rejeitada, o modelo de efeitos fixos será o mais apropriado.

### 3.2.3.2 Teste de Hausman

O teste de Hausman testa a ortogonalidade entre os efeitos aleatórios e os regressores, além de avaliar se os estimadores de efeitos fixos e de efeitos aleatórios são significativamente diferentes (HSIAO, 2014). De forma geral, o teste irá auxiliar na decisão de utilizar o efeito fixo ou aleatório. A especificação do teste de Hausman (1978) é apresentada na equação 3.8.

$$H = (\beta_{ea} - \beta_{ef})' (\sum ef - \sum ea)^{-1} (\beta_{ea} - \beta_{ef}) \quad (3.8)$$

em que,

$\beta_{ea}$  = vetor de coeficientes estimados pelo efeito aleatório;

$\beta_{ef}$  = vetor de coeficientes estimados por efeitos fixos;

$\sum ef - \sum ea$  = caracterizam as matrizes de covariância do modelo de efeitos aleatórios (PINDYCK, RUBINFELD, 1998).

As hipóteses do teste de Hausman são:

- Hipótese nula:  $[E(\alpha_i / X_{kit}) = 0$  não são correlacionadas], isto é,  
 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 \dots = \alpha_k$
- Hipótese aleatória:  $[E(\alpha_i / X_{kit}) \neq 0$  são correlacionadas], ou seja,  
 $\alpha_1 \neq \alpha_2 \neq \alpha_3 \dots \neq \alpha_k$

A hipótese nula recomenda que o modelo de efeitos aleatórios seja o mais adequado, ao mesmo tempo em que a hipótese alternativa aconselha que o modelo de efeitos fixos seja o que tenha a melhor adequação aos dados. Perante a hipótese nula de que o modelo de efeitos aleatórios é o mais apropriado, a estatística H oferece uma distribuição assintótica que se aproxima de uma distribuição Qui-Quadrado ( $X^2$ ) em K graus de liberdade, em que K atribui-se ao número de parâmetros estimados (GREENE, 2012).

A diferença entre os modelos é que o modelo de efeitos fixos implica a presença da correlação entre as variáveis explicativas e o efeito fixo, já o modelo de efeitos aleatórios presume a falta dessa correlação. Se a hipótese nula é rejeitada, há preferência ao modelo de efeitos fixos.

### 3.2.3.3 Teste do multiplicador de Lagrange Breusch-Pagan

O teste de Multiplicadores de Lagrange é empregado para escolha da melhor estimativa entre o modelo *pooled* e o modelo de efeitos aleatórios, no qual examina a hipótese de que a variância dos resíduos individuais é igual a zero. As hipóteses nulas e alternativas do teste são:

- Hipótese nula:  $\sigma_\mu^2 = 0$
- Hipótese alternativa:  $\sigma_\mu^2 \neq 0$

Se a hipótese nula for aceita, o método de *pooled* torna-se preferível, quando

confrontado ao modelo de efeitos aleatórios. Porém, se a hipótese nula não for aceita, a melhor opção é utilizar o modelo de efeitos aleatórios, ao invés do modelo POLS. De acordo com Greene (2012) perante a hipótese nula, a estatística  $L\mu$  tem distribuição  $\chi^2$  com um grau de liberdade, conforme a equação 3.9.

$$L\mu = \frac{\eta T}{2(T-1)} \left[ \frac{(\bar{e}')(\bar{e})(T^2)}{e'e} \right]^2 \sim \chi^2 \quad (3.9)$$

em que,

$T$  = remete ao número de unidades de tempo;

$n$  = número de subdivisões cruzadas;

$e$  = refere-se ao vetor de resíduos do modelo de MQO;

$\bar{e}$  consiste no vetor  $n \times 1$  da média dos resíduos de um grupo específico do modelo *pooled*.

### 3.2.3.4 Teste de Wald e de Wooldridge

O teste de Wald e de Wooldridge usa a primeira defasagem dos resíduos da regressão para testar a presença de heterocedasticidade e de autocorrelação respectivamente (equação 3.10). Assim, testa-se a hipótese nula de igualdade entre a variância de todas as unidades amostrais contra a hipótese alternativa de variâncias distintas entre as unidades. Dessa forma:

- Hipótese nula: ausência de heterocedasticidade;
- Hipótese alternativa: presença de heterocedasticidade.

Em vista disso, a não rejeição da hipótese nula recomenda que o modelo seja homocedástico e que a variância de cada painel pode ser apontada em conjunto. De acordo com Wooldridge (2013), o teste sugere a existência de heterocedasticidade quando a variância dos termos de erro da regressão não seja constante no passar do tempo. Para testar a correlação serial é confrontada a regressão defasada  $p$  vezes com os resíduos do modelo, assim, as hipóteses do teste e a regressão dos resíduos foram, respectivamente:

- Hipótese nula: ausência de autocorrelação serial;
- Hipótese alternativa: presença de autocorrelação serial.

$$\hat{e}_{it} = \hat{\rho}_1 \hat{e}_{i,t-1} + \varepsilon_{it} \quad (3.10)$$

Foi utilizada a estatística de teste t de Student para ponderar  $\hat{\rho}_1$  perante a suposição de que os erros  $\varepsilon_{it}$  têm variância constante no tempo t e são serialmente não correlacionados. Uma vez diferenciada a existência de autocorrelação e, ou heterocedasticidade, métodos de

correção considerando erros padrão robustos ou por *bootstrap* devem ser empregados.

### 3.2.4 Formalização matemática do modelo utilizado

A hipótese foi testada e partiu-se do pressuposto de uma função de produção (equação 3.11), utilizando uma derivada parcial da função de produção em relação ao fator, combinando temperatura e precipitação como variáveis explicativas no modelo.

$$Pcana_{it} = \beta_{0i} + \beta_1 \cdot (temp)_{it} + \beta_2 (precip)_{it} + \varepsilon_{it} \quad (3.11)$$

em que:

$Pcana_{it}$  = produção da cana-de-açúcar, em toneladas, no município  $i$  e no tempo  $t$ ;

$\beta_1$  e  $\beta_2$  = as mudanças climáticas na produção da cana-de-açúcar quando aumenta-se 1% da temperatura média anual ou 1% da precipitação total anual, mantidas as demais condições constantes;

$\varepsilon_{it}$  = representa o termo de erro ou fatores não observados.

### 3.2.5 Regressões envolvidas no modelo de dados em painel

Os impactos das mudanças climáticas na produção canavieira foram analisados por meio da efetivação de três diferentes modelos de regressão de dados em painel, com diferentes considerações sobre os estimadores e os termos de erro.

Após os testes econométricos, que determinaram o melhor modelo, foram utilizadas três regressões: na regressão 1 (equação 3.12), foram analisadas a constante, a temperatura e a precipitação. Na regressão 2 (equação 3.13) foram analisadas a constante, a temperatura, a precipitação e todas as mesorregiões do Estado da Paraíba, sendo a Mata Paraibana a referência. Na regressão 3 (equação 3.14), analisaram-se as variáveis constantes, temperatura, precipitação e as mesorregiões paraibanas, sendo o Sertão, a Borborema e o Agreste referência em relação à Mata Paraibana.

$$Pcana_{it} = \alpha + precip + temp + E \quad (3.12)$$

$$Pcana_{it} = \alpha + precip_{it} + temp_{it} + {}_i Agreste + {}_i Borborema + {}_i Sertão + E \quad (3.13)$$

$$Pcana = \alpha + precip_{it} + temp_{it} + {}_i MataParaibana + E \quad (3.14)$$

Nas regressões foram incluídas *dummies*, variáveis categóricas transformadas em numéricas através de um procedimento para "quantificar" um atributo de uma variável

qualitativa através de variáveis artificiais que exibam valores de 1 ou 0 (sugerindo a falta de um atributo e apresentando a sua presença). O uso dos *dummies* contribui para que o modelo seja uma ferramenta flexível, capaz de operar com problemas encontrados, sobretudo em estudos empíricos (WONNACOTT; WONNACOTT, 1990).

### 3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dadas as dimensões continentais do Brasil, percebe-se grande diversidade climática e, ao mesmo tempo, por concentrar a maior parte de sua extensão territorial em uma zona intertropical (de baixas latitudes), o país tem como prevaletentes tipos climáticos quentes e com baixa amplitude térmica.

Com finalidade de verificar como os elementos climáticos temperatura e precipitação evoluíram ao longo do tempo, a Figura 3.2 mostra a evolução conjunta desses elementos para o Estado da Paraíba. Através da observação gráfica é possível notar, além da linha tendência linear, o sinal da correlação entre as variáveis de temperatura e precipitação na Paraíba. Conforme Auffhammer *et al.* (2013), a correlação negativa é uma particularidade de locais mais quentes, como o Estado da Paraíba.

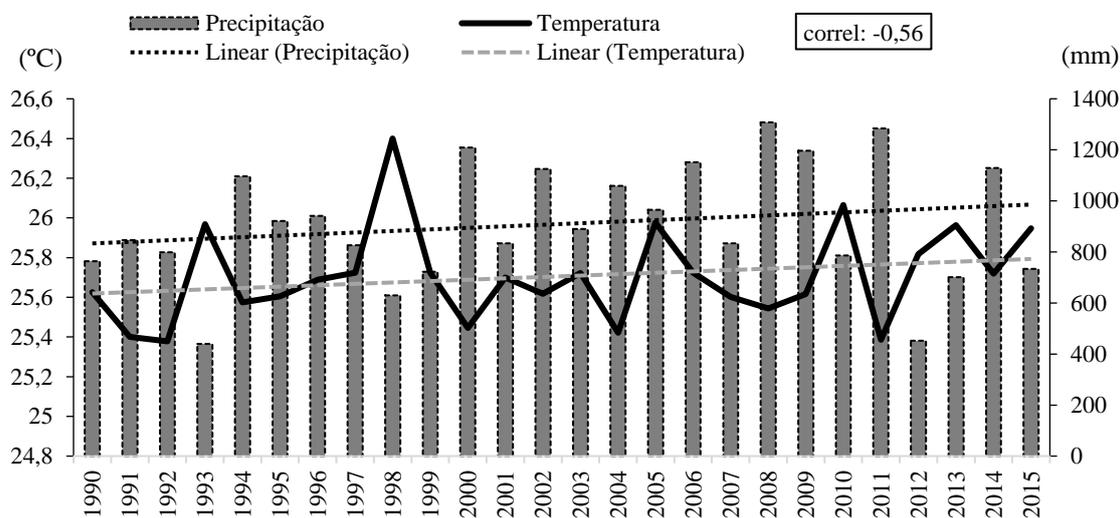


Figura 3.2 - Evolução da temperatura média (°C) e precipitação total (mm) no Estado da Paraíba, no período de 1990 a 2015.

Fonte: CRU (2018).

Os totais de precipitação anual na Paraíba apresentam grande variabilidade interanual, os valores mais elevados foram registrados em 2000 (1.209 mm), 2008 (1.307

mm) e 2011 (1.283 mm) e os anos menos chuvosos foram 1993 (439 mm) e 2012 (452 mm). Estatisticamente a média de precipitação no período estudado foi de 909,46 mm, com desvio padrão alto de 234,52 e coeficiente de variação de 0,26%. Silva *et al.* (2006) afirmaram que a Região Nordeste possui uma elevada variabilidade interanual e intrasazonal de precipitação, com intensa influência na agricultura.

A temperatura média anual da Paraíba apresentou máximos em 1998 (26,4 °C) e 2010 (26,1 °C) e mínimos em 1992 (25,4 °C) e 2011 (25,4 °C). A partir dos dados analisados neste estudo, o valor de temperatura média encontrado para o Estado da Paraíba foi de 25,7 °C, com desvio padrão baixo de 0,24 °C e coeficiente de variação de 0,009%. Evidentemente, esses valores médios variam espacialmente em um Estado que possui uma área de 56.585 km<sup>2</sup>.

A Tabela 3.1 apresenta a evolução da produção da cana-de-açúcar nas mesorregiões da Paraíba, para os anos de 1990, 1995, 2000, 2005, 2010 e 2015, em milhões de toneladas (10<sup>6</sup> t). A mesorregião da Mata Paraibana compõe a principal área produtora de cana-de-açúcar do Estado. Comparando com as outras mesorregiões, ela apresenta melhores condições de precipitação, maior regularidade e melhor distribuição pluviométrica.

Tabela 3.1 - Evolução da produção da cana-de-açúcar nas mesorregiões da Paraíba, para os anos de 1990, 1995, 2000, 2005, 2010 e 2015, em milhões de toneladas (10<sup>6</sup> t).

Mesorregiões	1990	1995	2000	2005	2010	2015
Sertão Paraibano	0,09	0,07	0,03	0,03	0,04	0,01
Borborema	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Agreste Paraibano	1,38	0,44	0,13	0,20	0,24	0,25
Mata Paraibana	6,80	6,01	3,83	4,74	5,37	6,54
<b>Paraíba</b>	<b>8,28</b>	<b>6,52</b>	<b>3,99</b>	<b>4,98</b>	<b>5,65</b>	<b>6,80</b>

Fonte: Elaborado pelos autores a partir do IBGE (2016).

Foi observada uma alta produção da cana-de-açúcar em 1990 (8,28 10<sup>6</sup> t), ocorrendo uma queda em 1995 (6,52 10<sup>6</sup> t) e 2000 (3,99 10<sup>6</sup> t) e uma recuperação a partir de 2010 (5,65 10<sup>6</sup> t). Ao comparar a taxa de crescimento e utilizando o ano de 2015 como base, percebe-se uma taxa de crescimento negativa de -0,22% em 1990 e taxa de crescimento positiva nos anos 1995, 2000, 2005 e 2010, com maior expressividade em 2000 com 0,41%. Esse cenário demonstra o papel da cana-de-açúcar como produto agrícola mais produzido no Estado. Para aumentar esses valores, torna-se necessário um maior investimento em inovação, máquinas

e equipamentos com tecnologia e pesquisa avançada, além de condições climáticas favoráveis.

A Tabela 3.2 demonstra o valor  $p$  dos testes, ao nível de significância de 1%, dado que, por meio do resultado do teste de Chow (0,567), observou-se a aceitação de  $H_0$  e, desta forma, conclui-se que o modelo *pooled* é uma opção adequada. O teste de Hausman, assim como o de Breush-Pagan rejeita a hipótese nula, de maneira que, o teste de Hausman indica que as variáveis são não correlacionadas. Ao mesmo tempo, o teste de Breush-Pagan indica que o método de *Pooled* torna-se preferível quando comparado ao modelo de efeitos aleatórios. No Teste de Wald e Wooldridge, como o p-valor foi de 0,989, não se rejeita a hipótese nula, ocorrendo ausência de autocorrelação entre os resíduos da regressão.

Após a análise dos testes, optou-se pelo modelo *pooled*. A escolha deste modelo se deu após concretizar os resultados nos testes de Chow, Hausman, Breusch Pagan e Wooldridge, que foram empregados para definir qual modelo é mais adequado.

Tabela 3.2 - Testes econométricos para escolha do modelo de dados em painel para produção de cana-de-açúcar da Paraíba, no período de 1990 a 2015.

Tipo de teste	Estatística	p-valor
<b>Chow</b>	9,81	0,567
<b>Hausman</b>	18,67	0,000
<b>Breusch Pagan</b>	4.719,00	0,000
<b>Wald e Wooldridge</b>	243,00	0,989

Os resultados das estimativas da equação 3.11 são apresentados na Tabela 3.3. De maneira a certificar a robustez dos sinais e significância dos parâmetros, foram testadas diversas especificações alternativas, ora abrangendo apenas as variáveis climáticas, como é comum em estudos desta natureza, ora acrescentando *dummy* nas variáveis. Vale ressaltar que os testes para a detecção e correção de heterocedastidade e autocorrelação foram realizados, do mesmo modo que os testes de identificação do modelo que melhor se adequa aos dados.

Na Tabela 3.3 encontram-se os resultados das estimativas dos impactos das variáveis climáticas na produção da cana-de-açúcar. Para formação destes resultados foram considerados um total de 4.007 observações e 221 municípios. Validaram-se as estimativas através dos testes econométricos, por meio do método *pooled*.

Os resultados estimados com o modelo *pooled*, representados na Tabela 3.3,

permitem dizer que, de modo geral, as variáveis precipitação e temperatura foram significativas para este modelo, ao nível de 1%, assim como seus respectivos sinais foram coesivos. A precipitação apresentou preeminentemente impactos positivos e com a temperatura ocorreu impactos negativos na regressão 1 e 3. Este resultado indica que, de modo agregado, o aumento da temperatura na Paraíba deve resultar em um efeito negativo na produção da cana-de-açúcar e, no caso da precipitação, um aumento de 1% do nível médio de chuvas deve resultar em um efeito positivo.

Tabela 3.3 - Resultado das estimativas dos impactos das variáveis climáticas na produção de cana-de-açúcar pelo modelo *pooled* para as mesorregiões do Estado da Paraíba de 1990 a 2015.

Variável	Coeficientes		
	Regressão 1	Regressão 2	Regressão 3
<b>Constante</b>	7,26 *** (4,13)	9,21*** (3,12)	30,85*** (3,86)
<b>Temperatura</b>	-5,68*** (1,23)	0,52*** (0,93)	-9,86*** (1,14)
<b>Precipitação</b>	2,77*** (0,07)	0,02*** (0,07)	1,21*** (0,07)
<b>Agreste Paraibano</b>		-4,97*** (0,09)	
<b>Borborema</b>		-7,36*** (0,32)	
<b>Mata Paraibana</b>		<i>Referência</i>	3,40*** (0,09)
<b>Sertão Paraibano</b>		-2,21*** (0,09)	
Nº observações	4.007	4.007	4.007
Nº municípios	221	221	221

Notas: Valores do erros-padrão dos parâmetros entre parênteses. Significativo ao nível de: \*\*\*1%; \*\*5%; \*10%.

Na regressão 1 observa-se uma correlação negativa ao calcular a produção em relação à temperatura. Aumentando-se 1% da temperatura, o impacto da produção canavieira será de -5,68%. Ao aumentar em 1% a precipitação, o aumento será de 2,77% na produção da cana-de-açúcar. Esse resultado é concedido pela derivada parcial da produção da cana-de-

açúcar em relação à precipitação e à temperatura, através da elasticidade em termos percentuais.

A variável precipitação se mostrou estatisticamente significativa para explicar a variável dependente produção. O coeficiente positivo da variável mostrou-se de acordo com o previsto, isto é, um aumento na variável precipitação está associado significativamente a um aumento na variável produção da cana-de-açúcar.

Em relação à variável temperatura, ela também apresentou-se significativa para explicar a variável produção. De acordo com Fageria *et al.* (2010), nos diferentes estágios fenológicos, a temperatura ótima da cana-de-açúcar é de 25 °C a 35 °C. O sinal negativo sinalizou que quanto maior a temperatura, menor tende a ser o desempenho da produção canavieira.

Na regressão 2 criou-se uma variável *dummy* para representação das mesorregiões. Quando se faz uma análise para *dummy* regionais, o modelo sempre vai escolher uma mesorregião de referência. A ideia é averiguar alguma influência das disparidades regionais existentes sobre a dinâmica de produção canavieira para as mesorregiões paraibanas.

Ao comparar as estimativas das mesorregiões Sertão Paraibano, Borborema e Agreste Paraibano com a Mata Paraibana (mesorregião de referência), percebe-se um comportamento heterogêneo entre as mesorregiões. Em relação à Mata Paraibana, os municípios que estão localizados nas outras mesorregiões (Agreste -4,97%, Borborema -7,36% e Sertão -2,21%) têm uma propensão negativa de produção, por toneladas de cana-de-açúcar. Esses resultados evidenciam que, de fato, há uma produção regional desigual entre as mesorregiões, tornando-se necessário o uso de tecnologias para potencializar sua produção e melhorar sua eficiência.

Têm sido desenvolvidas e propostas novas maneiras de se fazer o manejo da irrigação, com objetivo de aumentar a eficiência e potencializar a produção, mas poucos resultados têm sido aplicados. O manuseio de água apropriado e planejado pode ser realizado empregando-se a eficiência de uso da água, através do uso da irrigação, contribuindo para que as mesorregiões do Agreste, Sertão e Borborema aumentem sua produção da cana-de-açúcar. Considerando a alta demanda de água necessária no decorrer do ciclo da cana-de-açúcar, métodos e sistemas de irrigação mais eficazes na utilização da água, como o de gotejamento, são indispensáveis (PARKES *et al.*, 2010; CARR; KNOX, 2011).

Na regressão 3 as outras mesorregiões são referências, ao contrário da regressão 2, na qual a Mata Paraibana era referência. Então, em relação às mesorregiões Agreste,

Borborema e Sertão, os municípios que estão presentes na Mata Paraibana têm uma propensão a ter uma tendência na produção por tonelada de 3,40 pontos percentuais em média a mais que as outras mesorregiões.

Em 1975, o Brasil criou o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), motivado, sobretudo, pelo inesperado aumento dos preços do petróleo no mercado mundial (primeiro choque do petróleo). Diante disso, criou-se a política governamental de expansão das atividades ligadas à produção do açúcar e, posteriormente, do álcool (etanol). Assim, a cana-de-açúcar, que se expandia apenas nas áreas de condições naturais mais favoráveis como a Mata Paraibana e áreas úmidas do brejo (Parte do Agreste), após o Proálcool avançaram por todas outras mesorregiões. Com o fim do programa, estas regiões perderam incentivos (SANT'ANNA *et al.*, 2016).

De acordo com Olesen e Bindi (2002) o aumento da temperatura, principalmente em regiões áridas e semiáridas (170 municípios paraibanos, sobretudo nas mesorregiões do Sertão Paraibano, Borborema e boa parte do Agreste) pode ter diversos impactos negativos na produtividade agrícola, tais como: o estresse térmico e a perda de água através evaporação, resultando no aumento da respiração e aceleração do desenvolvimento, o que pode acarretar em maturação rápida e, assim, diminuir a produtividade da cana-de-açúcar.

Em relação às mudanças na precipitação, não há um consenso na literatura, isso acontece devido a sua variabilidade, pois seus resultados dependem dos modelos utilizados nas previsões e das regiões analisadas. Um dos principais motivos que levam a essa imprecisão é a grande dependência entre precipitação e a circulação atmosférica (GORNALL *et al.*, 2010). Além disso, áreas com possibilidade de implementação de irrigação são menos vulneráveis aos valores de precipitação local.

Os resultados expostos oferecem alguns subsídios para entendimento dos efeitos das variáveis climáticas no Estado da Paraíba, levando em conta as disparidades regionais entre as mesorregiões, a abrangência temporal e a importância do impacto das mudanças climáticas na agricultura.

### **3.4 CONCLUSÃO**

Considerando os resultados obtidos neste estudo, conclui-se que:

As variáveis de controle se expressaram estatisticamente significativas para explicar a variável produção.

A precipitação é uma condicionante positivamente correlacionada, já a temperatura influencia negativamente na produção canavieira dos municípios do Estado da Paraíba, no Brasil.

Percebe-se uma resposta heterogênea sob os impactos nas mesorregiões, pois os municípios pertencentes à Mata Paraibana possuem maior predisposição climática para a produção de cana-de-açúcar em relação às outras mesorregiões.

Os municípios que têm uma média de precipitação maior produzem mais cana-de-açúcar. Assim, o elemento climático precipitação mostrou-se essencial para o aumento da produção. Apesar das adversidades climáticas de cada mesorregião, a utilização de irrigação poderia proporcionar um impulso na produção canavieira nas áreas mais secas.

Em um contexto de intensificação das mudanças climáticas, o nível de produtividade da cana-de-açúcar pode ser bastante inferior ao observado no período de estudo, contribuindo para que o Estado da Paraíba apresente perdas ainda maiores na produtividade da cana-de-açúcar.

## REFERÊNCIAS

ALVES, L. M.; MARENGO, J. Assessment of regional seasonal predictability using the PRECIS regional climate modeling system over South America. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 100, n. 3-4, p. 337-350, 2010.

AUFFHAMMER, M.; HSIANG, S. M.; SCHLENKER, W.; SOBEL A. Using weather data and climate model output in economic analyses of climate change. **Review of Environmental Economics and Policy**, v. 7, n. 2, p. 181-198, 2013.

BALTAGI, B. B. **Econometric analysis of panel data**. 3. ed. New Delhi, Índia: John Wiley & Sons, 2005.

CAMERON, A. C.; TRIVEDI, P. K. **Microeconometrics using Stata**. College Station: Stata Press, 2009.

CARR, M. K. V; KNOX, J. W. The water relations and irrigation requirements of sugarcane (*Saccharum officinarum*): A review. **Experimental Agriculture**, v. 47, n. 1, p. 1-25, 2011.

CRU - University of East Anglia Climatic Research Unit. Climatic Research Unit, University of East Anglia. **Data**. Norwich: UEA, 2018. Available in: <<http://www.cru.uea.ac.uk/>>. Access in: 8 fev. 2019.

CUNHA, D. A.; COELHO, A. B.; FÉRES, J. G. Irrigation as an adaptive strategy to climate change: an economic perspective on Brazilian agriculture. **Environment and Development Economics**, v. 20, p. 57-79, 2015.

DESCHÊNES, O.; GREENSTONE, M. The Economic Impacts of Climate Change: Evidence from Agricultural Output and Random Fluctuations in Weather. **The American Economic Review**, v. 97, n. 1, p. 354-385, 2007.

FAGERIA, N. K.; MORAIS, O. P.; SANTOS, A. B. Nitrogen use efficiency in upland rice genotypes. **Journal of Plant Nutrition**, v. 33, p. 1696-1711, 2010.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Climate change and food systems: global assessments and implications for food security and trade**. Food Agriculture Organization of the United Nations, 2015.

FRANCISCO, P. R. M.; SANTOS, D.; LIMA, E. R. V.; MORAES NETO, J. M.; TRINDADE, H. C. M. Mapping of pedological potencial of soils for cultivation of sugar cane in Paraíba state using geotechnologies. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 7, n. 5, p. 306-314, 2017.

FRISCH, R. Editor's Note. **Econometrica**, v. 1, n. 1, p. 1-4, 1993.

GORNALL, J.; BETTS, R.; BURKE, E.; CLARK, R.; CAMP, J.; WILLETT, K.; WILTSHIRE, A. Implications of climate change for agricultural productivity in the early twenty-first century. **Philosophical transactions of the royal society B**, v. 365, n. 1554, p. 2973-2989, 2010.

GREENE, W. H. **Econometric Analysis**. 7. ed. New York: Person, 2012.

GUJARATI, D.; PORTER, D. C. **Basic Econometrics**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2008.

HAUSMAN, J. A. Specification tests in econometrics. **Econometrica**, v. 46, n. 6, p. 1251-1272, 1978.

HILL, R. C.; GRIFFITHS, W. E.; JUDGE, G. G. **Undergraduate econometrics**. New York: John Wiley & Sons, 1997.

HSIAO, C. **Analysis of panel data**. 3. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

IBGE - Brazilian Institute of Geography and Statistics. Directorate of Research, Coordination of Work and Income, National Survey by Household Sample Continuous 2016. **Synthesis of Paraíba** (Síntese Paraíba). 2016. Available in: <[www.ibge.gov.br/estadosat/perfil.php?sigla=pb](http://www.ibge.gov.br/estadosat/perfil.php?sigla=pb)>. Access in: 8 fev. 2019.

IBGE - Brazilian Institute of Geography and Statistics. **Municipal Agricultural Production 2015** (Produção Agrícola Municipal 2015). Rio de Janeiro: IBGE, 2016. Available in: <[www.ibge.gov.br/estadosat/temas.php?sigla=pb&tema=lavouratemporaria2015](http://www.ibge.gov.br/estadosat/temas.php?sigla=pb&tema=lavouratemporaria2015)>. Access in: 8 fev. 2019.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment

Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, p. 151, 2014.

IPEA - Institute for Applied Economic Research. **Ipeadata Regional**. 2015. Available in: <<http://www.ipeadata.gov.br/Default.aspx>>. Access in: 8 fev. 2019.

MENDELSON, R.; NORDHAUS, W. D.; SHAW, D. The Impact of Global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis. **The American Economic Review**, v. 84, n. 4, p. 753-771, 1994.

MAPA - Ministry of Agriculture, Livestock and Supply. **Sector Plan for Mitigation and Adaptation to Climate Change for the consolidation of an economy in Low Carbon Agriculture** (Plano Estadual de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura). São Paulo: Ministry of Agriculture, Livestock and Supply (MAPA); Secretariat of Agriculture and Supply, 2016.

OLESEN, J. E.; BINDI, M. Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. **European Journal of Agronomy**, v. 16, n. 4, p. 239-262, 2002.

PARKES, M.; YAO, W. W.; MA, X. Y.; LI, J. Simulation of point source wetting pattern of subsurface drip irrigation. **Irrigation Science**, v. 29, n. 4, p. 331-339, 2010.

PINDYCK, R. S.; RUBINFELD, D. L. **Econometric Models and Economic Forecasts**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 1998.

PINTO, H. S.; ASSAD, E. D. **Global warming and the new geography of the Brazilian agriculture production** (Aquecimento Global e a nova Geografia da Produção agrícola no Brasil). São Paulo: Embrapa, 2008.

SANT'ANNA, A. C.; SHANOYANB, A.; BERGTOLDC, J. S.; CALDAS, M. M.; GRANCO, G. Ethanol and sugarcane expansion in Brazil: what is fueling the ethanol industry?. **International Food and Agribusiness Management Review**, v. 19, n. 4, p. 163-181, 2016.

SILVA, V. P. R.; SOUSA, F. S. S.; CAVALCANTI, E. P.; SOUZA, E. P.; SILVA, B. B. Teleconnections between sea-surface temperature anomalies and air temperature in northeast Brazil. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 68, n. 7, p. 781-792, 2006.

SRIVASTAVA, A. K.; RAI, M. K. Sugarcane production: Impact of climate change and its mitigation. **Biodiversitas**, v. 13, n. 4, p. 213-227, 2012.

STERN, N. **The Economics of Climate Change: the Stern Review**. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.

TINTNER, G. **Methodology of mathematical economics and econometrics**. Chicago: The University of Chicago Press, 1968.

UNICA - Brazilian Sugarcane Industry Association. **Crop production** (Produção por safra). 2015. Available in: <<http://www.unicadata.com.br/historico-de-producao-e-moagem.php?idMn=32&tipoHistorico=4>>. Access in: 8 fev. 2019.

VERBEEK, M. **A guide to modern econometrics**. Chichester: John Wiley & Sons, 2000.

WONNACOTT, T. H.; WONNACOTT, R. J. **Introductory statistics for business and economics**. 4. ed. New York: John Wiley & Sons, 1990.

WOOLDRIDGE, J. M. **Introductory econometrics: A modern approach**. 5. ed. Thomson: South-Western, 2013.

## CAPÍTULO 4

### **ARTIGO: Dinâmica e expansão da cana-de-açúcar na Paraíba (Brasil): uma análise dos impactos dos gases de efeito estufa**

**Resumo:** No Brasil, a Política Nacional de Biocombustíveis de 2017 (RenovaBio) busca ampliar em escala a utilização dos combustíveis renováveis. Anseia-se uma contribuição do setor sucroalcooleiro e suas externalidades sob o clima do Brasil. Este artigo analisou a dinâmica e expansão da cana-de-açúcar na Paraíba (Brasil) com enfoque nos impactos dos gases de efeito estufa, no período de 1990 a 2017. Aplicou-se o modelo *shift-share* para quantificar a produção agrícola do Estado da Paraíba, observando os recortes geopolíticos. As culturas analisadas foram: cana-de-açúcar, abacaxi, feijão, mandioca, milho e outras culturas. Também foi efetuada uma regressão linear múltipla para a cana-de-açúcar e os gases de efeito estufa na Paraíba, entre 2000 a 2016. Os resultados mostraram que a decomposição do efeito área em efeitos escala e substituição das culturas da cana-de-açúcar e do abacaxi foram os que mais absorveram áreas, enquanto que o feijão foi o que mais cedeu áreas para as demais. Na decomposição nos Efeitos Área (EA), Rendimento (ER) e Localização Geográfica (ELG) observou-se que na Paraíba e nos dez municípios analisados ocorreu uma expansão heterogênea, sendo os ganhos de produtividade explicados pelo EA e o ELG, pois o ER evidenciou o baixo dinamismo agrícola. A aplicação da regressão linear múltipla mostrou que a quantidade produzida de cana-de-açúcar apresentou correlação positiva, significativa e crescente com os gases de efeito estufa (CO<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>O) com R<sup>2</sup> de 100%. Para que ocorra uma diminuição nas emissões dos gases de efeito estufa é necessário que o Estado da Paraíba atue por meio de políticas públicas que fomentem a eliminação da queima, que ainda é realizada antes do corte em muitas áreas com o sistema manual de colheita.

**Palavras-Chave:** Bioenergia, Mudanças Climáticas; *Shift-Share*; Análise de regressão múltipla.

**Abstract:** In Brazil, the National Biofuels Policy of 2017 (RenovaBio) seeks to scale up the use of renewable fuels. There is a desire for a contribution from the sugar-alcohol sector and its externalities under the Brazilian climate. This paper analyzes the dynamics and expansion of sugarcane in Paraíba (Brazil) with focus on the impacts of greenhouse gases, from 1990 to 2017. The shift-share model was applied to quantify the state's agricultural production of Paraíba, observing the geopolitical cuts. The analyzed crops were: sugarcane, pineapple, beans, cassava, maize and other crops. A multiple linear regression was also performed for sugarcane and greenhouse gases in Paraíba from 2000 to 2016. The results showed that the decomposition of the area effect on scale and substitution effects of sugarcane crops and pineapple were the ones that absorbed the most areas, while the beans yielded the most areas for the others. In the decomposition in Area Effects (EA), Yield (ER) and Geographic Location (ELG), it was observed that in the Paraíba and in the 10 municipalities analyzed a heterogeneous expansion occurred, being the productivity gains explained by the EA and the ELG, since the ER evidenced the low agricultural dynamism. The application of multiple linear regression showed that the amount of sugarcane produced showed a positive and significant correlation with greenhouse gases (CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O) with 100% R<sup>2</sup>. In order for a reduction in emissions of greenhouse gases to occur, it is necessary for the state of Paraíba

to act through public policies that encourage the elimination of the burning, which is still carried out before cutting in many areas with the manual harvesting system.

**Keywords:** Bioenergy, Climate Change; Shift-Share; Multiple regression analysis.

#### 4.1 INTRODUÇÃO

Desde o Brasil colônia, a cana-de-açúcar tem sido uma das principais culturas agrícola, redefinindo sua estrutura produtiva e industrial. Na década de 1970, diante das crises petróleo, foi inserida nos Planos Nacionais de Desenvolvimento (PND's) a criação do Programa Nacional do Álcool (Proálcool). Este programa incentivou a produção em larga escala da cana-de-açúcar e intensificou do etanol substituindo a gasolina importada, a fim de mitigar a dependência do petróleo importado. A partir do século XXI, o mundo vem apelando cada vez mais por uma energia sustentável e em resposta o Brasil institui a RenovaBio (Lei nº 13.576/2017), que é uma nova política para biocombustíveis, reconhecendo como estratégico na matriz energética brasileira, mitigando a redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE) e proporcionando segurança energética (ZUURBLER; VOOREN, 2008; PRADO JUNIOR, 2011; BRASIL, 2017; MORENO-PÉREZ *et al.*, 2017).

Dentre as culturas energéticas, a cana-de-açúcar é a mais eficiente na geração de energias renováveis, pois proporciona o melhor custo benefício na geração, tendo a taxa mais alta de energia por volume e com potencial de mitigação das mudanças climáticas por meio da substituição de combustíveis fósseis (OLIVEIRA *et al.*, 2005; MACEDO *et al.*, 2008; RENOUF *et al.*, 2008; BÖRJESSON, 2009; JOHNSON *et al.*, 2010; MANOCHIO *et al.*, 2017). Associado a expansão e amplas áreas cultiváveis de cana-de-açúcar, faz do Brasil o maior produtor dessa *commodity*. Isto proporcionou a retomada da produção de etanol em uma nova fase de expansão da cultura (GOLDEMBERG, 2007; NASS *et al.*, 2007; FARGIONE *et al.*, 2008).

Os cenários de políticas públicas e a própria dinâmica do mercado de produtos agrícolas ocasionam diversas mudanças na composição da produção. A cultura da cana-de-açúcar dinamiza a economia brasileira, com o aumento acentuado da expansão e das recentes transformações ocorridas no setor. Estes fatores tem sido objeto de debates devido aos aspectos de área de abrangência, nível tecnológico, econômico, ambiental e social. Em destaque, a mitigação de emissões de GEE que proporciona benefícios socioeconômicos provenientes da industrialização, seja na multiplicidade de funções, na melhoria da qualidade

do ar nos centros urbanos, na redução da dependência do petróleo, na distribuição de riqueza e de bem estar (MORAES *et al.*, 2015; SATOLO; BACCHI, 2013).

Em 2017, o Brasil produziu 758,5 milhões de toneladas (t) de cana-de-açúcar, sendo o maior produtor mundial de cana-de-açúcar e açúcar e segundo maior produtor do etanol. Da produção brasileira, a Região Nordeste produziu 49,8 milhões t, enquanto que o Estado da Paraíba teve a cana-de-açúcar como a principal atividade agrícola, produzindo 5,2 milhões t, correspondendo a 4,1% do PIB, sendo o setor sucroalcooleiro o que mais emprega pessoas com baixa escolaridade no Estado (IBGE, 2017).

Para a análise regional, frequentemente utilizam indicadores para verificação da realidade socioeconômica de determinada localidade, bem como testar e validar as teorias explicativas de determinados fenômenos econômicos que ocorrem na Região. O *shift-share* é um método analítico que se baseia na análise de componentes de variação. O método compreende um conjunto de identidades que busca identificar e decompor os componentes desse crescimento analisando descritivamente sua estrutura de produção. O crescimento das culturas demonstra-se por dois elementos: o estrutural, que está associado à composição setorial das atividades da Região, e o diferencial, relacionado às vantagens locais comparativas (SANTOS; RATHMANN, 2009). A análise de regressão linear múltipla é empregada para explicar a associação entre variáveis, com essa técnica estatística torna-se possível escrever um modelo integrando uma variável dependente com outras variáveis independentes, por meio de uma função linear (KEITH, 2019).

Estudos recentes realizados no Brasil, que trouxeram uma discussão na dinâmica da cana-de-açúcar utilizando o *shift-share* foram: Alves *et al.* (2018), Caldarelli e Gilio (2018) e Defante *et al.* (2018). Alves *et al.* (2018) analisaram 35 culturas permanentes e 33 temporárias de 558 microrregiões brasileiras, no período de 1990 a 2016 e chegaram à conclusão que apenas a cana-de-açúcar e soja tiveram efeitos positivos de substituição. Caldarelli e Gilio (2018) perceberam em São Paulo, no período de 2000 a 2015, que a área cultivada de cana-de-açúcar aumentou consideravelmente em detrimento das áreas de pastagens e das culturas de arroz, feijão, milho, batata, mandioca e frutas. Defante *et al.* (2018) concluíram que no Mato Grosso do Sul a cana-de-açúcar gerou externalidades positivas agropecuária estadual, forçando a evolução da produtividade, principalmente, na pecuária.

Souza *et al.* (2017) e Bento *et al.* (2018) realizaram ensaios utilizando regressão múltipla para entender a expansão da cana-de-açúcar no Brasil. Souza *et al.* (2017)

mostraram que o aumento do cultivo de cana-de-açúcar brasileira pode reduzir cerca de 5% de emissões globais de dióxido de carbono. Em contraposição, há discussão que as expansões da cana-de-açúcar causariam impactos negativos. Bento *et al.* (2018) concluíram que a intensificação do manejo das pastagens e a conversão de pastagem em cana-de-açúcar acrescenta o fator de emissão de gases de efeito estufa estimado para a cana-de-açúcar brasileira.

A crescente demanda nacional por etanol e seus derivados, somada ao crescente interesse pelo aumento de fontes alternativas de energias renováveis capazes de minimizar a emissão de gases de efeito estufa estimulou a expansão da cana-de-açúcar. Este artigo avaliou a dinâmica e expansão da cana-de-açúcar na Paraíba (Brasil) sob uma análise dos impactos dos gases de efeito estufa.

## **4.2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.2.1 Objeto de estudo e análise de dados**

O Estado da Paraíba possui uma área de 56.468,435 km<sup>2</sup>, com densidade demográfica de 66,70 hab/km<sup>2</sup>, situado no extremo leste da Região Nordeste do Brasil. Encontra-se entre os paralelos 6°02'12" e 8°19'18"S e os meridianos de 34°45'54" e 38°45'45"W. O Estado possui quatro mesorregiões, 23 microrregiões e 223 municípios, com população estimada de 3.996.496 habitantes. O clima é caracterizado por tropical quente-úmido (As'), semiárido (BSH) e quente semiúmido (Aw') (IBGE, 2018).

Utilizou-se as principais culturas agrícolas temporárias do Estado da Paraíba disponíveis no Sistema de Recuperação Automática (SIDRA) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no período de 1990 a 2017. As variáveis em análise foram quantidade produzida (t), área colhida (ha), área plantada (ha) e rendimento médio (kg/ha) (IBGE, 2017).

Os dados de emissão de gases de efeito estufa foram extraídos do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), em toneladas (t). Os gases de efeito estufa em CO<sub>2</sub> equivalentes (CO<sub>2</sub>-eq) foram calculados conforme o *Global Warming Potential* (GWP) de acordo com o *Assessment Report* do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) (AR-2, AR4 e AR-5), no período de 2000 a 2016 (SEEG, 2018).

Avaliou a conjuntura da produção das principais culturas temporárias do Estado da Paraíba, com base na área colhida de 2017, para os anos de 1990, 1995, 2000, 2005, 2010,

2015 e 2017. Para isso, foi utilizado a Taxa Geométrica de Crescimento (TGC), como mostrado na equação 4.1.

$$TGC(\%) = \left[ \Delta t \sqrt{\frac{V_f}{V_o}} - 1 \right] * 100 \quad (4.1)$$

onde,  $V_f$  é a produção das culturas referente ao ano final, em  $t$ ;  $V_o$  refere-se aos valores da produção do ano inicial;  $\Delta t$  é a variação temporal da produção (expressa em anos). Também, avaliou a conjuntura das emissões de CO<sub>2</sub>-eq na agricultura paraibana, por tipo de cultura, para os anos de 2000, 2002, 2004, 2006, 2008, 2010, 2012, 2014 e 2016.

Para análise dos efeitos explicativos do modelo *shift-share*, foi da seguinte forma: para o efeito escala e substituição empregou no Estado da Paraíba e na mesorregião com maior representatividade da cana-de-açúcar. Para o efeito área, rendimento e localização geográfica investigou o Estado da Paraíba e os *Top* dez maiores municípios produtores da cultura canavieira de 2017. Os subperíodos analisados foram três: 1990-2017, 2000-2017 e 2010-2017.

#### 4.2.2 Método *shift-share*

O método *shift-share* tem como finalidade mostrar o comportamento da atividade agrícola através da decomposição dos fatores responsáveis pela variação da produção. Consideraram-se três efeitos explicativos: efeito área (EA); efeito rendimento (ER) e efeito localização geográfica (ELG).

O efeito área mostra as mudanças ocorridas na produção devido as alterações na área cultivada. Assim, a adição na produção é dada pela inclusão de novas áreas, apresentando uma utilização extensiva no solo. O efeito rendimento indica a variação na produção em decorrência das modificações dada produtividade, dados inalteráveis os outros efeitos. Essas transformações retratam as mudanças tecnológicas pela aplicação de novos insumos, técnicas de produção e progresso do capital humano. Enquanto que o efeito localização geográfica retrata as mudanças percebidas na produção devido as vantagens locais, isto é, derivados da modificação na localização das culturas entre os municípios estudados, mantendo-se os demais componentes constantes (ALVES *et al.*, 2018).

Também, empregou-se o modelo desenvolvido por Zockun (1978) no qual presume que a área cultivada da cultura num dado período, dentro do sistema de produção, pode ser transformada por dois efeitos: o efeito escala, que é a variação da área total das culturas

analisadas e o efeito substituição, associado à variação da participação de cada cultura dentro do sistema de produção. O efeito substituição, quando positivo, aponta que houve expansão da cultura, adquirindo área de outra cultura e somando na sua. Quando negativo, o efeito mostra que a área que era da cultura passou para outra dentro do sistema

#### 4.2.2.1 Variáveis utilizadas no modelo *shift-share*

Para facilitar a leitura, dispõe-se da notação usada no modelo de “*shift-share*” das culturas temporárias no Estado da Paraíba. O subíndice “*c*” aponta a cultura verificada e varia de 1 a *n*. O subíndice “*m*” representa o local de análise, variando de 1 a *k*. O subíndice “*t*” estabelece o período de tempo. O período inicial é simbolizado por “*i*” e o período final por “*f*”. As variáveis utilizadas são:

$Q_{ct}$  é a parcela produzida da *c*-ésima cultura no Estado, no período *t*;

$A_{cmt}$  caracteriza como a área total cultivada com a *c*-ésima cultura, no *m*-ésima local, no período *t*;

$A_{ct}$  é a área total cultivada com a *c*-ésima cultura no Estado, no período *t*;

$A_{mt}$  é a área total cultivada das culturas, em hectares, na *m*-ésima localidade do Estado, no período *t*;

$A_t$  equivale à área total cultivada com as culturas, em hectares, no Estado, no período *t*;

$R_{cmt}$  é o rendimento da *c*-ésima cultura, na *m*-ésima localidade do Estado, no período *t*;

$\gamma_{cmt}$  é a proporção da área total cultivada com a *c*-ésima cultura na *m*-ésima localidade, na área cultivada da *c*-ésima cultura no Estado ( $A_{cmt} / A_{ct}$ ), no período *t*;

$\lambda$  é o coeficiente que determina a modificação na área total cultivada das culturas entre o período inicial e final ( $A_f / A_i$ ).

#### 4.2.2.2 Decomposição da variação da produção nos efeitos área, rendimento e localização geográfica

A descrição do modelo segue os procedimentos adotados por Igreja *et al.* (1983) com adaptações. A quantidade produzida no Estado da Paraíba e dos dez municípios com maior

produção de 2017 da  $c$ -ésima cultura de cana-de-açúcar, no período  $t$ , está representada na equação 4.2.

$$Q_{ct} = \sum_{m=1}^k (A_{cmt} R_{cmt}) \quad (4.2)$$

Logo, no período inicial  $i$ , utiliza-se a equação 4.3.

$$Q_{ci} = \sum_{m=1}^k (A_{cmi} R_{cmi}) = \sum_{m=1}^k \gamma_{cmi} A_{ci} R_{cmi} \quad (4.3)$$

Enquanto que para o período final  $f$ , é determinada pela equação 4.4.

$$Q_{cf} = \sum_{m=1}^k (A_{cmf} R_{cmf}) = \sum_{m=1}^k \gamma_{cmf} A_{cf} R_{cmf} \quad (4.4)$$

Se, no período analisado, somente a área cultivada for modificada, a produção final ( $Q_{cf}^A$ ) será como apresentada na equação 4.5

$$Q_{cf}^A = \sum_{m=1}^k (\gamma_{cmi} A_{cf} R_{cmi}) \quad (4.5)$$

Contudo, se a área e o rendimento variarem, ficando constantes a localização geográfica e a composição da produção, o valor produzido no período  $f$  ( $Q_{cf}^{AR}$ ) poderá ser representado pela equação 4.6.

$$Q_{cf}^{AR} = \sum_{m=1}^k (\gamma_{cmi} A_{cf} R_{cmf}) \quad (4.6)$$

Mas, se ocorrer uma variação na localização geográfica, juntamente com a área e com o rendimento, a produção final será descrita pela equação 4.7.

$$Q_{cf}^{ARL} = \sum_{m=1}^k (\gamma_{cmf} A_{cf} R_{cmf}) = Q_{cf} \quad (4.7)$$

A mudança total da quantidade produzida da  $c$ -ésima cultura do período inicial “ $i$ ” para o período final “ $f$ ” ( $Q_{cf} - Q_{ci}$ ) é caracterizada pela equação 4.8.

$$Q_{cf} - Q_{ci} = \sum_{m=1}^k \gamma_{cmf} A_{cf} R_{cmf} - \sum_{m=1}^k \gamma_{cmi} A_{ci} R_{cmi} \quad (4.8)$$

Que também pode ser descrita conforme mostrada na equação 4.9.

$$Q_{cf} - Q_{ci} = (Q_{cf}^A - Q_{ci}) + (Q_{cf}^{AR} - Q_{cf}^A) + (Q_{cf} - Q_{cf}^{AR}) \quad (4.9)$$

onde,

$Q_{cf} - Q_{ci}$  é a variação total da produção da  $c$ -ésima cultura entre o período inicial e final;

$Q_{cf}^A - Q_{ci}$  é a variação total da quantidade produzida da  $c$ -ésima cultura entre “ $i$ ” e “ $f$ ”, alterando apenas a área cultivada, sendo chamada de efeito área;

$Q_{cf}^{AR} - Q_{cf}^A$  é a variação total da produção da  $c$ -ésima cultura entre “ $i$ ” e “ $f$ ”, quando ocorre variação no rendimento e as outras variáveis conservam-se constantes, sendo denominada de efeito rendimento;

$Q_{cf} - Q_{cf}^{AR}$  é a variação total da quantidade produzida da  $c$ -ésima cultura entre os períodos “ $i$ ” e “ $f$ ”, ocorrida pela mudança da localização geográfica, mantendo constantes as outras variáveis, sendo nomeada como efeito localização geográfica.

Com finalidade de apresentar os resultados na forma de taxas anuais de crescimento da produção foi empregado a metodologia proposta por Igreja (1987) que expõe de maneira individual como uma percentagem da mudança total na produção. Deste modo, divide-se ambos os lados da equação (4.9) por  $(Q_{cf} - Q_{ci})$ , tem-se a identidade apresentada na equação 4.10.

$$\frac{(Q_{cf}^A - Q_{ci})}{(Q_{cf} - Q_{ci})} + \frac{(Q_{cf}^{AR} - Q_{cf}^A)}{(Q_{cf} - Q_{ci})} + \frac{(Q_{cf} - Q_{cf}^{AR})}{(Q_{cf} - Q_{ci})} \quad (4.10)$$

Multiplicando-se ambos os lados da identidade (10), obtém-se a equação 4.11.

$$r = \left( \sqrt[f]{\frac{Q_{cf}}{Q_{ci}}} - 1 \right) * 100 \quad (4.11)$$

onde:  $f$  é à quantidade de anos do período da análise e  $r$  é a taxa anual média de variação da produção da  $c$ -ésima cultura, em porcentagem, para assim obter a equação 4.12.

$$r = \frac{(Q_{cf}^A - Q_{ci})}{(Q_{cf} - Q_{ci})} r + \frac{(Q_{cf}^{AR} - Q_{cf}^A)}{(Q_{cf} - Q_{ci})} r + \frac{(Q_{cf} - Q_{cf}^{AR})}{(Q_{cf} - Q_{ci})} r \quad (4.12)$$

na qual são apresentados em porcentagem as seguintes equações:

$$\frac{(Q_{cf}^A - Q_{ci})}{(Q_{cf} - Q_{ci})} r \text{ é o efeito área, representado em taxa de crescimento ao ano;}$$

$$\frac{(Q_{cf}^{AR} - Q_{cf}^A)}{(Q_{cf} - Q_{ci})} r \text{ é o efeito rendimento, explícito em taxa de crescimento ao ano;}$$

$$\frac{(Q_{cf} - Q_{cf}^{AR})}{(Q_{cf} - Q_{ci})} r \text{ é o efeito localização geográfica, expresso em taxa de crescimento ao ano.}$$

### 4.2.2.3 Decomposição do efeito área em escala e substituição

Tem-se  $\lambda$  como o coeficiente que mensura a modificação do tamanho do sistema, a variação da área ocupada do sistema pode ser decomposta no efeito escala e no efeito substituição conforme as equações 4.13 e 4.14.

$$(\lambda A_{ci} - A_{ci}) \text{ é o efeito escala (EE);} \quad (4.13)$$

$$(A_{cf} - \lambda A_{ci}) \text{ é o efeito substituição (ES).} \quad (4.14)$$

Isto é,

$$(A_{cf} - A_{ci}) = (\lambda A_{ci} - A_{ci}) + (A_{cf} - \lambda A_{ci}) \quad (4.15)$$

Averigua-se dentro do sistema de produção o efeito escala, uma vez que o somatório do efeito substituição é nulo, como apresentado na equação 4.16.

$$\sum_{c=1}^n (A_{cf} - \lambda A_{ci}) = 0 \quad (4.16)$$

O pressuposto do modelo é que as culturas que concedem área o fizeram de maneira proporcional para todas aquelas que expandiram área. Assim, determina-se a parcela de áreas transferidas (efeito substituição negativo) para as culturas que tiveram efeito substituição positivo.

### 4.2.3 Regressão linear múltipla

Para estabelecer o grau de relação entre os gases de efeito estufa e a quantidade produzida da cana-de-açúcar, foi utilizado o método de regressão múltipla. A área de estudo abrangeu o Estado da Paraíba, no período de 2000 a 2016. Segundo Hair *et al.* (2005), a finalidade desta técnica é predizer e relacionar uma única variável dependente a várias variáveis explicativas. Para Neter *et al.* (1996) nesta técnica os dados proporcionam independência espacial, ou seja, os componentes da equação de regressão não levam em consideração a estrutura espacial dos dados.

A variável dependente foi a quantidade produzida em toneladas, enquanto que as variáveis explicativas foram os gases de efeito estufa em toneladas: CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O e NO<sub>x</sub>. A equação que descreve o modelo é apresentada na equação 4.17.

$$Y_i = \alpha + \beta x_i + \gamma z_i + e_i \quad (4.17)$$

onde:  $Y$  é a variável dependente (área de cana-de-açúcar plantada);

$X$  é variável independente (gases de efeito estufa - CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O e NO<sub>x</sub>);

$\beta$  é interpretado geometricamente como o coeficiente angular do plano, na medida em que nos movimentamos na direção do eixo dos  $X$ 's, sustentando  $Z$  constante:  $\beta$  é, logo, o efeito marginal da variável  $X$  sobre  $Y$ .

$\gamma$  é o coeficiente do plano na medida em que nos deslocamos na direção do eixo dos  $Z$ 's, conservando  $X$  constante:  $\gamma$  é, deste modo, o efeito marginal da variável  $Z$  sobre  $Y$ .

Também realizou a correlação das variáveis, que pode ser medida através da Correlação de Pearson, que de acordo Hair *et al.* (2005), calcula a associação linear entre duas variáveis métricas.

Sejam  $x_i$  e  $y_i$  os valores das variáveis  $X$  e  $Y$ .  $\bar{x}$  e  $\bar{y}$  são de modo respectivo as médias dos valores  $x_i$  e  $y_i$ . A fórmula do coeficiente de correlação de Pearson é então mostrada na equação 4.18.

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4.18)$$

Os resíduos do modelo de regressão linear devem ser distribuídos normalmente, o que significa que 95% dos resíduos devem estar no intervalo [-1,96, 1,96]. Todos os valores que estão fora desse intervalo são potencialmente *outliers*, ou podem sugerir que a suposição de normalidade está errada. Foi usado o *DataFlagger* do *software* XLSTAT para mostrar os resíduos no intervalo [-1,96, 1,96]. Pode-se observar que todos os resíduos estão dentro da faixa [-1,96, 1,96].

#### 4.2.3.1 Análise de Correlação

A Análise de Correlação gera um número que aponta como duas variáveis variam conjuntamente. Proporciona a magnitude e a direção da relação linear ou não-linear entre duas variáveis, ou seja, indica a relação entre as variáveis sem que, para tal, seja necessário o ajuste de uma função matemática. A correlação de Pearson é uma medida de associação linear entre variáveis, seu valor pode variar de -1 (relação negativa) até +1 (relação positiva), sendo que 0 indica uma relação nula.

Cohen (1988) criou uma classificação para facilitar a interpretação da magnitude dos coeficientes, para ele valores entre 0,10 e 0,29 são apontados como pequenos; escores entre

0,30 e 0,49 são classificados como médios; e valores entre 0,50 e 1 podem ser vistos como grandes.

Segundo Hair *et al.* (2005), a medida da proporção da variância da variável dependente à volta de sua média é expressa pelas variáveis independentes ou preditoras. O coeficiente pode variar entre 0 e 1, quanto maior o valor do coeficiente de determinação, maior seu poder de explicação.

### 4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 4.3.1 Evolução da produção das culturas temporárias e emissões de CO<sub>2</sub>-eq na agricultura do Estado da Paraíba

A Tabela 4.1 apresenta a evolução da produção das principais culturas da Paraíba, para os anos de 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 e 2017, em toneladas (10<sup>3</sup> t).

A atividade agrícola paraibana se caracterizou com baixa diversificação, tendo a cana-de-açúcar, o abacaxi, a mandioca, o milho e o feijão, ocupando 99% das culturas temporárias produzidas na Paraíba, com base em 2017. Verificou-se que, embora apresente decréscimo em termos absolutos, essa constatação não foi a mesma, no que se refere aos termos relativos.

Tabela 4.1 - Evolução da produção das principais culturas agrícolas da Paraíba para os anos de 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 e 2017, em mil toneladas (10<sup>3</sup> t).

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2017
<b>Cana-de-açúcar</b>	8.282,78	6.522,24	3.986,82	4.975,80	5.646,15	6.801,98	5.197,15
<b>Abacaxi</b>	284,17	235,76	268,08	325,61	273,91	290,77	363,33
<b>Mandioca</b>	386,34	442,45	263,55	269,10	228,13	131,07	146,17
<b>Milho</b>	46,31	154,05	125,24	61,39	11,51	10,93	26,24
<b>Feijão</b>	47,89	87,82	91,66	53,21	10,18	7,02	20,53
<b>Outras Culturas</b>	131,21	165,40	118,47	112,84	86,27	52,55	58,61
<b>Total</b>	9178,70	7607,72	4853,82	5797,95	6256,15	7294,32	5812,03

Fonte: IBGE (2017).

Entre 1990 e 2017, a produção agrícola paraibana apresentou queda de 1,68% a.a, decrescendo de 9.178,70 10<sup>3</sup> t (1990) para 5.812,03 10<sup>3</sup> t (2017). A cana-de-açúcar se manteve como a cultura mais produzida no Estado da Paraíba, com uma produção superior a todas as outras culturas agrícolas, em todos os períodos analisados. Esse número expressivo foi em decorrência de uma conjunção de fatores, podendo ser enfatizados: ampliação da demanda e do preço do produto no mercado internacional, efeito da abertura do mercado

européu para o açúcar procedente do Brasil, da diminuição da produção indiana, do aumento do preço do petróleo e a procura e produção de energia renovável em todo o mundo (MARTINELLI; FILOSO, 2008; BORDONAL *et al.*, 2018).

Ainda, entre 1990-2017, a única cultura que apresentou crescimento foi o abacaxi (0,91% a.a.), enquanto as outras culturas apresentaram decrescimento (cana-de-açúcar - 1,71% a.a.; mandioca -3,54% a.a.; milho -2,08% a.a.; feijão -3,09% a.a.; outras culturas - 2,94% a.a.). No período estudado, observou-se uma pequena diversificação na produção agrícola paraibana entendida dentro de uma conjuntura mais ampla, pautada pela industrialização do país. O decrescimento na produção pode ser explicado pela forte oscilação da sua produção, especialmente devido as secas periódicas, que afetaram a Paraíba no decorrer do período em análise (ARIAS; CABALLERO, 2015; MARENGO; TORRES; ALVES, 2016).

Um dos efeitos mais debatidos da atividade econômica sobre o meio-ambiente e que tem tomado novas dimensões, são as mudanças climáticas, ocasionadas pela acumulação de gases de efeito estufa. De acordo com o IPCC (2014) as emissões antropogênicas globais de gases de efeito estufa (GEE) na agricultura representam 14% do total de emissões, número que vem aumentando gradativamente, devido, sobretudo, ao crescimento das expansões da produção agrícola, ampliação de renda, população e consumo de produtos agrícolas diversos, especialmente, em países em desenvolvimento. Para que ocorra uma mitigação desses gases, torna-se necessário que evite e reduza as emissões e que haja uma promoção do sequestro de carbono.

A Tabela 4.2 apresentou as emissões de CO<sub>2</sub>-eq (10<sup>3</sup> t) na agricultura do Estado da Paraíba, para os anos de 2000, 2002, 2004, 2006, 2008, 2010, 2012, 2014 e 2016. As emissões totais cresceram 0,93% a.a. no período analisado. A cana-de-açúcar foi o principal responsável pelas emissões de gases de efeito estufa. As emissões totais apresentaram um aumento de 0,92% a.a. no período de análise, ou seja, um incremento de 82,26 10<sup>3</sup> t para 95,28 10<sup>3</sup> t. Em 2000, a cana-de-açúcar foi responsável por 60% das emissões na agricultura paraibana, em 2016 chegou a 90%, ou seja, um aumento de 30% em 16 anos e um incremento 3,50% a.a.

As outras culturas analisadas tiveram uma redução significativa como o feijão (-13,32% a.a.), mandioca (-3,58% a.a.), milho (-13,34% a.a.), outras culturas (-5,65% a.a.).

Tabela 4.2 – Evolução das emissões de CO<sub>2</sub>-eq (10<sup>3</sup> t) na agricultura no Estado da Paraíba, para os anos de 2000, 2002, 2004, 2006, 2008, 2010, 2012, 2014 e 2016.

	2000	2002	2004	2006	2008	2010	2012	2014	2016
<b>Cana-de-açúcar</b>	49,40	61,76	78,85	75,07	78,02	69,95	72,67	83,77	85,60
<b>Mandioca</b>	8,93	7,35	8,77	9,16	10,15	7,73	5,35	4,58	4,98
<b>Feijão</b>	9,84	5,54	6,66	10,86	8,10	1,09	0,34	1,92	1,00
<b>Milho</b>	6,33	4,64	3,68	7,92	6,02	0,58	0,33	1,43	0,64
<b>Outras Culturas</b>	7,76	5,89	8,14	7,64	7,67	5,00	4,31	4,98	3,06
<b>Total</b>	82,26	85,18	106,10	110,65	109,96	84,35	83,00	96,68	95,28

Fonte: Elaborado pelos autores a partir do SEEG (2018).

O acúmulo de carbono no solo em sistemas agrícolas é uma estratégia para balancear os aumentos atmosféricos de dióxido de carbono, uma vez que o mecanismo de emissão de CO<sub>2</sub> do solo para a atmosfera abrange a propagação de gases de efeito estufa, que é controlada, essencialmente, pela interação entre o espaço poroso e o conteúdo de umidade do solo. (DOSSOU-YOVO *et al.*, 2016).

#### 4.3.2 Expansão e substituição das principais culturas agrícolas

A Tabela 4.3 apresenta a decomposição da variação da área, em ha, da cana-de-açúcar no Estado da Paraíba e da mesorregião Mata Paraibana, período de 1990-2017, 2000-2017, 2010-2017. No subperíodo que corresponde 1990 a 2017, não ocorreu taxas anuais de crescimento positivas. As culturas que obtiveram os maiores decréscimos de produção foram o feijão e o milho. Entre 2000 a 2017, as culturas que apresentaram variações positivas foram: abacaxi (1.910 ha) e cana-de-açúcar (4.214 ha). Considerando o mesmo período de análise, tiveram queda de produção as culturas de feijão, mandioca, milho e outras culturas. A absorção de área de outras culturas, por parte do abacaxi e da cana-de-açúcar, respondeu por 3,47% e 11,18%, respectivamente, da expansão de área destas culturas. Enquanto que no subperíodo 2010 a 2017, apenas o abacaxi (2.837 ha) apresentou uma variação positiva. Observou-se, também, um declínio na área total de plantação no Estado da Paraíba, em todos os subperíodos analisados.

O efeito escala observado na Tabela 4.3 mostra que todas as culturas obtiveram uma escala negativa de expansão nos períodos observados, ou seja, nenhuma cultura incorporou novas áreas que antes não estavam sendo usadas para cultivo. Ao mesmo tempo que foi a principal fonte explicativa da variação total, para maior parte das culturas analisadas.

Nos períodos analisados no Estado da Paraíba, o efeito substituição mostrou-se positivo para as culturas do abacaxi (8.062,37 ha; 6.626,40 ha) e a cana-de-açúcar (45.926,11

ha; 47.132,50 ha) entre 1990-2017 e 2000-2017, ou seja, obtiveram acréscimo em sua área. No período de 2010-2017, conseguiram expansão na área as culturas do abacaxi, feijão e milho. A cultura mais substituída, e que passou sua área para outra cultura foi o feijão (-24.995,35 ha; -24.103,11 ha) nos períodos de 1990-2017 e 2000-2017 e a mandioca (-5.019,08 ha) entre 2010-2017.

Tabela 4.3 - Decomposição da variação da área (efeitos escala e substituição), em ha, da cana-de-açúcar no Estado da Paraíba e da mesorregião Mata Paraibana, período de 1990-2017, 2000-2017, 2010-2017.

Culturas	Paraíba			Mata Paraibana			
	Variação Total	Efeito Escala	Efeito Substituição	Variação Total	Efeito Escala	Efeito Substituição	
1990-2017	Abacaxi	-582,00	-8.644,37	8.062,37	-2.758	-3.223,14	465,14
	Cana-de-açúcar	-630,25	-108.951,11	45.926,11	-34.633	-39.006,17	4.373,17
	Feijão	-2.523,80	-227.384,65	-24.995,35	-4.646	-1.908,05	-2.737,94
	Mandioca	-371,61	-35.779,85	-1.381,15	-1.597	-2.804,29	1.207,29
	Milho	-2.141,08	-202.931,24	-11.176,76	-4.394	-1.773,37	-2.620,63
	Outras culturas	-856,69	-69.233,78	-16.435,22	-2.171	-1.483,97	-687,03
	Total	-652.925	-652.925	-	-50.199	-50.199	-
2000-2017	Abacaxi	1.910,00	-4.716,40	6.626,40	-1.965	-477,86	-1487,13
	Cana-de-açúcar	4.214,00	-42.918,50	47.132,50	4.761	-4.309,83	9.070,83
	Feijão	-1.150,67	-90.963,89	-24.103,11	-1.368	-144,03	-1.223,97
	Mandioca	-172,80	-15.109,45	-2.170,55	-5.046	-620,41	-4.425,59
	Milho	-910,30	-80.936,12	-10.093,88	-238	-79,01	-158,99
	Outras	-461,39	-28.747,62	-17.391,37	-2.005	-229,86	-1.775,14
	Total	-263.392	-263.392	-	-5.861	-5.861	-
2010-2017	Abacaxi	2.837,00	-1.905,72	4.742,72	1.094	-1.102,51	2.196,51
	Cana-de-açúcar	-264,22	-25.348,98	-1.073,02	-23.696	-19.297,19	-4.398,81
	Feijão	-207,18	-21.083,40	365,40	-920	-411,39	-508,60
	Mandioca	-103,03	-5.283,92	-5.019,08	224	-1.214,66	1.438,66
	Milho	-144,44	-20.267,96	5.823,96	648	-118,83	766,83
	Outras	-102,61	-5.421,20	-4.839,98	77	-428,42	505,42
	Total	-79.311	-79.311	-	-22.573	-22.573	-

A variação da área da mesorregião da Mata Paraibana, apresentou no subperíodo de 1990-2017 uma totalidade de taxa anual decrescente, enquanto que em 2000-2017 apenas a cana-de-açúcar obteve efeito positivo. Em 2010-2017, apresentaram crescimento na produção: as culturas abacaxi, mandioca, milho e outras. Percebeu-se que, durante todos os subperíodos, ocorreu uma redução no total da variação, ou seja, houve diminuição da área plantada nas culturas.

No efeito escala e substituição, em nenhum subperíodo ocorreu escala no sistema de produção, porém houve substituição nas culturas, no subperíodo que corresponde a 1990-2017, as culturas abacaxi, cana-de-açúcar e mandioca substituíram outras culturas, cedidos principalmente pelo feijão (2.737,94 ha) e milho (2.620,63 ha). Em relação ao sistema entre 2000-2017 a única cultura que incrementou sua área foi a cana-de-açúcar (9.070,83 ha), todas as outras culturas transferiram área, com destaque para a mandioca (4.425,59 ha). Entre 2010-2017 marcou-se o retorno das áreas cedidas para cana-de-açúcar, observados no subperíodo anterior, assim, a cana-de-açúcar perdeu 4.398,81 hectares de área. Com exceção do feijão, as outras culturas obtiveram expansão de área, neste período de análise.

Ao estudar as fontes de crescimento no Estado de São Paulo, durante o período de 2000 a 2015, Caldarelli e Gilio (2018) observaram que a cana-de-açúcar obteve uma alta taxa de crescimento da produção. O efeito substituição foi o principal responsável por tal resultado, uma vez que os efeitos escala foram negativos em alguns subperíodos e inferiores em outros. As culturas que mais cederam área foram: arroz, feijão, milho e hortaliças. Defante *et al.* (2018) também constataram uma predominância no efeito substituição no Mato Grosso do Sul, pois outras culturas agrícolas como a soja e áreas de pastagens, foram substituídas pela cana-de-açúcar, contribuindo para sua expansão.

A Tabela 4.4 mostra os resultados obtidos com a utilização do modelo *shift-share*, para os dez municípios com maior área plantada de cana-de-açúcar, com base em 2017, do Estado da Paraíba. Observou-se que os dez municípios analisados obtiveram uma expansão da área colhida com cana-de-açúcar, em todos os subperíodos analisados. Juntos, os municípios incorporaram 79.480 das 97.269 áreas plantadas (ha) de cana-de-açúcar do Estado da Paraíba, ou seja, 81,71% do total.

A década de 1990 foi marcada por uma desregulamentação do setor sucroalcooleiro, que contribuiu para impulsionar a produção, aumentar a competitividade e pelo crescimento das exportações com a abertura econômica e imposição de modernização das unidades produtivas (MARTINS *et al.*, 2017). Muitas das empresas produtoras de açúcar e álcool no Estado da Paraíba não se adaptaram com a redução do protecionismo estatal, aumentando os problemas de endividamento, resultando em falência. Em decorrência disso, foi evidenciado os resultados modestos no subperíodo 1990-2017, cujo maior resultado foi 2,40% do ER em Juripiranga. O ER zero (Mamanguape e Mataraca) ou negativo (Cruz do Espírito Santo, Rio Tinto, Santa Rita) retrata a questão tecnológica e ratifica a desorganização setorial resultante da desregulamentação.

Tabela 4.4 - Taxa de crescimento da produção (efeitos área, rendimento e localização geográfica), em %, dos dez municípios com maior produção da cana-de-açúcar do Estado da Paraíba, período entre 1990 a 2017.

Municípios	1990-2017			2000-2017			2010-2017		
	EA	ER	ELG	EA	ER	ELG	EA	ER	ELG
<b>Cruz do Espírito Santo</b>	0,79	-0,11	0,32	0,50	0,30	0,20	0,59	-	0,40
<b>Itapororoca</b>	0,15	0,23	0,61	-	7,29	-6,29	0,21	0,30	0,48
<b>Juripiranga</b>	-1,70	2,40	0,30	0,16	0,25	0,59	-0,40	1,93	-0,53
<b>Mamanguape</b>	0,73	0	0,27	-4,46	-	5,46	4,15	-7,37	4,22
<b>Marcação</b>	-	-	-	0,44	-0,52	1,08	-0,40	1,93	-0,53
<b>Mataraca</b>	0,76	0	0,24	0,44	0,09	0,48	0,06	0,83	0,11
<b>Pedras de Fogo</b>	0,64	0,20	0,16	0,46	-0,46	0,99	0,66	-0,13	0,47
<b>Rio Tinto</b>	0,26	-0,07	0,82	0,39	0,09	0,53	0,72	-0,34	0,62
<b>Santa Rita</b>	1,10	-0,30	0,21	0,40	0,50	0,10	0,14	0,63	0,22
<b>Sapé</b>	0,20	0,13	0,67	0,46	-	0,54	-	0,93	0,06
<b>Paraíba</b>	1,02	-0,02	-	-0,04	-0,23	1,28	0,21	-0,13	0,92

Legenda: EA = Efeito Área; ER = Efeito Rendimento; ELG = Efeito da Localização geográfica

Nota: O município de Marcação não possui resultados no subperíodo 1990-2017, pois o mesmo foi criado em 1994 pela Lei Estadual nº 5.913, sendo assim, não possui dados no período que antecede esta data

Marengo, Torres e Alves (2016) apontam que entre 1997 e 1998 ocorreu uma profunda seca no Nordeste brasileiro, que afetou 57% de sua produção agrícola, ocorrendo um dano de 5% do PIB de toda a região Nordeste. A recuperação ocorreu entre 2005 e 2010 com a expansão da agroindústria sucroalcooleira – o Brasil quase dobrou a produção canavieira, com um aumento de 5% na área plantada. Essa conjuntura pode ser evidenciada na Tabela 4.4 que no subperíodo 2000-2017 e 2010-2017 os resultados mais expressivos foi obtido pelo município de Mamanguape com 5,46% e 4,22% no ELG no subperíodo de 2000-2017 e 2010-2017, respectivamente. Itapororoca também obteve destaque com 7,29% no ER. No que se refere os efeitos negativos, o município de Marcação foi o que apresentou os piores resultados (-0,40% no EA e -0,53% no ELG no subperíodo de 2010-2017 e -0,52% no subperíodo 2000-2017 para o ER). Os municípios de Cruz do Espírito Santo, Mataraca, Santa Rita e Sapé apresentaram uma taxa de crescimento positiva em todos os efeitos na produção.

Com o surgimento no mercado por cultivares mais adaptados e tecnologicamente mais avançados na década de 2000, refletiu-se profundamente nos valores do ER nos outros subperíodos analisados, que obtiveram um incremento no efeito na maioria dos municípios. O subperíodo 1990-2017 apresentou oscilações resultantes de variações na área e no rendimento, sendo que a localização geográfica apresentou resultados positivos em sua

totalidade. No EA apenas Juripiranga (-1,70%) apresentou um resultado negativo, enquanto que no ER foram os municípios de Cruz do Espírito Santo (-0,11%), Rio Tinto (-0,07%) e Santa Rita (-0,30%), como mostrada na Tabela 4.4.

Foi possível apontar a predominância do efeito localização geográfica nos dez municípios analisados, indicando uma contínua expansão canavieira e evidenciando uma vantagem comparativa dos mesmos. Este aspecto foi fortalecido pelos resultados alcançados para Estados tradicionalmente agrícolas, principalmente os mais próximos da área costeira brasileira, devido às condições edafoclimáticas. Hofsetz e Silva (2012) reiteram que o Brasil possui potencial de extensão agrícola e com a demanda do mercado internacional de biocombustíveis a propensão é de aumento de áreas canavieiras em todo país.

Nesse cenário, questões ambientais como a diminuição das emissões de gases do efeito estufa e políticas, como a redução da dependência do petróleo, originária de regiões sociais politicamente inconstantes, relacionadas à produção de energia, crescem em importância e aumentam a demanda por biocombustíveis, alterando, portanto, a dinâmica da utilização da terra (AZAR; LARSON, 2000). As políticas governamentais influenciam diretamente na dinâmica e expansão da cana-de-açúcar, que poderia ser impulsionada por uma política industrial e tecnológica setorial, deliberada localmente, para elaborar uma estrutura de estímulos, que possibilitará a integração entre os agentes desenvolvedores de tecnologia e o setor produtivo.

#### **4.3.3 Emissões geradas pela produção da cana-de-açúcar**

A Tabela 4.5 mostra os detalhes do modelo, cujas variáveis utilizadas foram: Quantidade produzida em toneladas (t) de cana-de-açúcar (variável dependente) e gases de efeito estufa – CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O e NO<sub>x</sub> – (variáveis independentes) no período de tempo entre 2000 a 2016. Os intervalos de confiança de 95% do parâmetro das variáveis explicativas foram pequenos para maioria das variáveis, com exceção do dióxido de carbono, como também o valor *p* para o parâmetro do CO<sub>2</sub> (80,71 t), foi muito maior que o CH<sub>4</sub> (0,00 t), N<sub>2</sub>O (0,01 t) e NO<sub>x</sub> (0,00 t), que também obtiveram zero ou valores negativos no intervalo de confiança. Isso indica que os efeitos da variável CO<sub>2</sub> é a mais forte.

A Tabela 4.5 mostra que ao aumentar-se em uma unidade a quantidade produzida (t) de cana-de-açúcar, as emissões de CO<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>O aumentarão 80,71 (t) e 0,01 (t), respectivamente. O Coeficiente de Determinação (R<sup>2</sup>), apresentou o valor de 100%. Assim, a variabilidade da variável dependente quantidade produzida da cana-de-açúcar foi explicada

por duas variáveis explicativas (CO<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>O). Enquanto que as variáveis CH<sub>4</sub> e NO<sub>x</sub> foram insignificantes. Gerou-se a seguinte equação no modelo:

$$\text{Produção} = 68,32 + 1,50 * N_2O + 1,18 * CH_4 + 80,71 * CO_2 \quad (4.19)$$

Tabela 4.5 - Parâmetros estimados pela análise de regressão múltipla e correlação das emissões de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O e NO<sub>x</sub> em tonelada de cana-de-açúcar no Estado da Paraíba, 2000 a 2016.

Variável	Parâmetro estimado (p)	Limite inferior (95%)	Limite superior (95%)	Erro Padrão	t	Pr> t	Correlação (R <sup>2</sup> )
<b>Intercepto</b>	68,32	-67,22	203,86	62,74	1,09	0,2960	-
<b>CH<sub>4</sub></b>	0,00	-0,01	0,01	0,00	0,25	0,8080	0,65
<b>CO<sub>2</sub></b>	80,71	80,71	80,71	0,01	85378,93	<0,0001	1,00
<b>N<sub>2</sub>O</b>	0,01	-0,01	0,01	0,01	0,32	0,7540	0,72
<b>NO<sub>x</sub></b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0000	0,65

O modelo indica que cada tonelada de cana-de-açúcar aumenta em média 80,71 (t) de dióxido de carbono e 0,01 (t) de óxido nitroso provenientes da cana-de-açúcar, no Estado da Paraíba. A Figura 4.1 mostra os residuais, ou seja, isso nos permite observar mais de perto cada um dos resíduos padronizados.

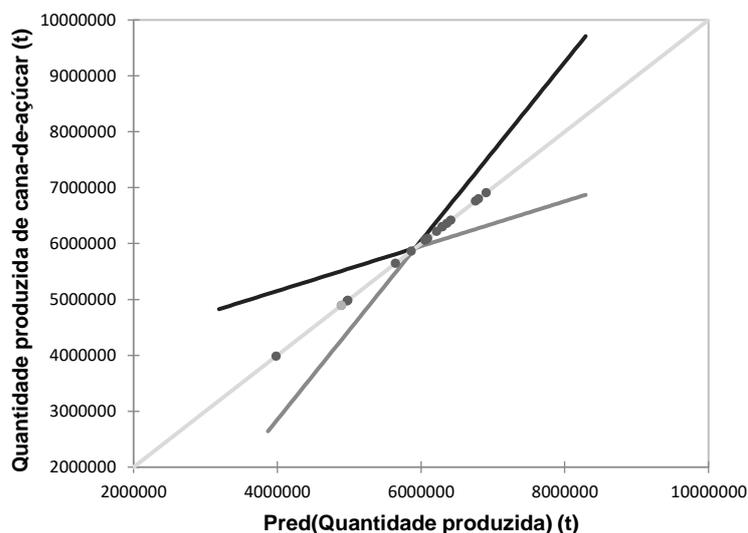


Figura 4.1 - Resíduos do modelo Pred(Quantidade produzida de cana-de-açúcar) / Quantidade produzida de cana-de-açúcar no período de 2000 a 2016 no Estado da Paraíba.

Ao realizar a correlação individual entre as variáveis quantidade produzida da cana-de-açúcar e gases de efeito estufa, constatou-se uma correlação grande, conforme o método de Cohen (1988), em todas as associações (0,65 a 1,00). Com base nos resultados, percebe-se que as variáveis são altamente correlacionadas positivamente, assim com o crescimento da produção de cana-de-açúcar também aumentará os gases de efeito estufa.

O teste de Fisher do modelo teve como resultado 5.122.147.495,55. Dado o fato de que a probabilidade correspondente ao valor F foi menor que 0,0001, isso significa que estaríamos assumindo um risco menor que 0,01%, ao assumir que a hipótese nula está errada. Portanto, podemos concluir com confiança que as variáveis trazem uma quantidade significativa de informações. Dentre as variáveis explicativas, baseado na soma de quadrados do Tipo III, a variável CO<sub>2</sub> foi a mais influente.

Usualmente no Brasil utilizam-se dois sistemas de colheita da cultura da cana-de-açúcar: o sistema manual, caracterizado pela queima prévia do canavial e o sistema mecanizado, que se distingue pelo não envolvimento do processo de queima e pela grande quantidade de resíduos vegetais largados na superfície do solo (THORBURN *et al.*, 2001).

Autores como Andrea e Merlet (2001) e Cançado *et al.* (2006) sugerem cessar a queima da cana-de-açúcar antes do corte, para facilitar a colheita manual. No Estado da Paraíba, no entanto, há uma preponderância do sistema manual, queimando a área de plantação poucos dias antes da colheita, para a extração de folhas e insetos e favorecer o corte manual. O uso do sistema manual contribui para emissões de metano (CH<sub>4</sub>), monóxido de carbono (CO), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e outros gases poluentes e particulados, provenientes da queima da cana-de-açúcar.

Além da queima, tem a sua parcela direta e indiretas de emissão conexas a cana-de-açúcar a utilização de defensivos agrícolas, fertilizantes e diesel (REICOSKY; ARHER, 2007). A utilização do sistema manual, mais a preponderância do uso da queima no Estado, colaborou para esse aumento expressivo do CO<sub>2</sub>-eq (t) no Estado. Vasconcelos *et al.* (2018) ressaltam que os gases com efeito de estufa, podem ser mitigados, melhorando ou gerindo adequadamente diferentes sistemas de produção.

Torna-se necessário, no Estado da Paraíba, a criação de uma lei, como a de São Paulo (Lei 11.241/2002) que ordena o fim da utilização do fogo como método despalhador e simplificador na cultura canavieira. Essa lei contribuiu para a redução expressiva do uso e da redução de gases de efeito estufa, além de potencializar o sequestro de carbono no solo em sistemas agrícolas (DOSSOU-YOVO *et al.*, 2016).

#### 4.4 CONCLUSÃO

A partir dos resultados apresentados, conclui-se que:

- A atividade agrícola paraibana caracteriza-se pela baixa diversificação agrícola, com a cana-de-açúcar, o abacaxi, a mandioca, o milho e o feijão, ocupando 99% da produção agrícola paraibana. Além de um forte declínio da produção agrícola da quase totalidade dos produtos, quando se considera os dois anos extremos da série 1990 a 2017.

- Nos subperíodos analisados: 1990-2017, 2000-2017, 2010-2017, a agricultura do Estado da Paraíba foi afetada por uma diminuição da dimensão de seu sistema produtivo, determinada pelo efeito escala negativo.

- A expansão da área de cana-de-açúcar implicou na substituição de outros produtos, dentro do sistema composto por todas as culturas temporárias, do Estado da Paraíba e mesorregião da Mata Paraibana. Porém, os resultados não possibilitam designar essas substituições apenas à expansão da cana-de-açúcar. Isso porque ocorreu efeito substituição também na cultura do abacaxi. O feijão foi a cultura que mais cedeu área para essas culturas.

- Ao analisar os dez municípios com maior área plantada no Estado da Paraíba, fica claro na análise que o crescimento da produção canavieira está estável. O processo de expansão do cultivo de cana-de-açúcar aconteceu de maneira heterogênea, entre os municípios analisados.

- A aplicação da regressão linear múltipla mostrou que a quantidade produzida de cana-de-açúcar apresentou correlação positiva, significativa ( $p < 0,0001$ ) e crescente com os gases de efeito estufa ( $\text{CO}_2$  e  $\text{N}_2\text{O}$ ). Assim, ao aumentar-se uma tonelada de produção da cana-de-açúcar, as emissões de  $\text{CO}_2$  e  $\text{N}_2\text{O}$  irão aumentar 80,71 t e 0,01 t, respectivamente. Para que haja diminuição nas emissões dos gases de efeito estufa é necessário que o Estado da Paraíba atue por meio de políticas públicas, que fomente a eliminação da queima da cana antes do corte, para facilitar a colheita manual.

- Essa pesquisa contribuiu na identificação das potencialidades e fragilidades do setor agrícola, com ênfase no setor sucroalcooleiro paraibano, sendo uma ferramenta auxiliar para implementação de políticas públicas específicas.

#### REFERÊNCIAS

ALVES, A.; RIBEIRO, E.; TOM, L. **Modifications in land use for agriculture in Brazil: an analysis of microregions in 1990 and 2016.** Conference, July 28-August 2, 2018,

Vancouver, British Columbia. International Association of Agricultural Economists (IAAE), 2018.

ANDREA, M. O.; MERLET, P.: Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 15, p. 955-966, 2001.

ARIAS, D.; CABALLERO, J. **Paraíba state, Brazil: Agricultural sector risk assessment**. Washington: World Bank Group, 2015.

AZAR, C.; LARSON, E. C. Bioenergy and land-use competition in Northeast Brazil. **Energy for sustainable development**, v. 4, n. 3, p. 64-71, 2000.

BENTO, C. B.; FILOSO, S.; PITOMBO, L. M.; CANTARELLA, H.; ROSSETTO, R.; MARTINELLI, L. A.; CARMO, J. B. Impacts of sugarcane agriculture expansion over low-intensity cattle ranch pasture in Brazil on greenhouse gases. **Journal of Environmental Management**, v. 206, p. 980-988, 2018.

BORDONAL, R. O.; CARVALHO, J. L. N.; LAL, R.; FIGUEIREDO, E. B.; OLIVEIRA, B. G.; LA SCALA, N. Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 38, n. 2, p. 1-23, 2018.

BÖRJESSON, P. Good or bad bioethanol from a greenhouse gas perspective – what determines this?. **Applied Energy**, v. 86, p. 589–594, 2009.

BRASIL. Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. **Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências**. Brasília, 2017.

CALDARELLI, C. E.; GILIO, L. Expansion of the sugarcane industry and its effects on land use in São Paulo: Analysis from 2000 through 2015. **Land Use Policy**, v. 76, p. 264-274.

CANÇADO, J. E. D.; SALDIVA, P. H. N.; PEREIRA, L. A. A.; LARA, L. B. L. S.; ARTAXO, P.; MARTINELLI, L. A.; ARBEX, M. A.; ZANOBETTI, A.; BRAGA, A. L. F.: The Impact of Sugar Cane–Burning Emissions on the Respiratory System of Children and the Elderly. **Environmental Health Perspectives**, v. 5, n. 114, p. 725–729, 2006.

COHEN, Jacob. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. Hillsdale: Erlbaum, 1988.

DEFANTE, L. R.; VILPOUX, O. F.; SAUER, L. Rapid expansion of sugarcane crop for biofuels and influence on food production in the first producing region of Brazil. **Food Policy**, v. 79, p. 121-131.

DOSSOU-YOVO, E. R.; BRÜGGEMANN, N.; JESSED, N.; HUATE, J.; AGO, E. E.; AGBOSSOUB, E. K. Reducing soil CO<sub>2</sub> emission and improving upland rice yield with no-tillage, straw mulch and nitrogen fertilization in northern Benin. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 156, p. 44–53, 2016.

FARGIONE, J.; HILL, J.; TILMAN, D.; POLASKY, S. HAWTHORNE, P. Land clearing and the biofuel carbon debt. **Science**, v. 319, n. 5867, p. 1235-1238, 2008.

GOLDEMBERG, J. Ethanol for a sustainable energy future. **Science**, v. 315, p. 808-810, 2007.

HAIR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. **Multivariate data analysis**. New Jersey: Prentice-Hall, 2005.

HOFSETZ, K.; SILVA, M. Aparecida. Brazilian sugarcane bagasse: Energy and non-energy consumption. **Biomass Bioenergy**, v. 46, p. 564-573, 2012.

IBGE - Brazilian Institute of Geography and Statistics. Directorate of Research, Coordination of Work and Income, National Survey by Household Sample Continuous 2016. **Synthesis of Paraíba** (Síntese Paraíba). 2018. Available in: <[www.ibge.gov.br/estadosat/perfil.php?sigla=pb](http://www.ibge.gov.br/estadosat/perfil.php?sigla=pb)>. Access in: 8 fev. 2019.

IBGE - Brazilian Institute of Geography and Statistics. **Municipal Agricultural Production 2017** (Produção Agrícola Municipal 2017). Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Available in: <<https://sidra.ibge.gov.br>>. Access in: 8 fev. 2019.

IGREJA, A. C. M. **Evolução da pecuária bovina no Estado de São Paulo no período 1969-84**. 1987. 197 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1987.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, p. 151, 2014.

JOHNSON, J. M. F.; KARLEN, D. L.; ANDREWS, S. S. Conservation considerations for sustainable bioenergy feedstock production: If, what, where, and how much. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 65, n. 4, p. 88A-91A, 2010.

KEITH, T. Z. **Multiple Regression and Beyond: An Introduction to Multiple Regression and Structural Equation Modeling**. 3 ed. Abingdon: Routledge, 2019.

MACEDO I. C.; SEABRA J. E. A.; SILVA, J. E. A. R. Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: the 2005/2006 averages and a prediction for 2020. **Biomass and Bioenergy**, v. 9, p. 582–595, 2008.

MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. **Theor Appl Climatol**, v. 129, n. 3-4, p. 1189-1200, 2016.

MORENO-PÉREZ, O. M.; MARCOSSI, G. P. C.; ORTIZ-MIRANDA, D. Taking stock of the evolution of the biodiesel industry in Brazil: Business concentration and structural traits. **Energy Policy**, v. 110, p. 525-533, 2017.

MANOCHIO, C.; ANDRADE, B. R.; RODRIGUEZ, R. P.; MORAES, B. S. Ethanol from biomass: A comparative overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 743-755, 2017.

MARTINELLI, L. A.; FILOSO, S. Expansion of sugarcane ethanol production in Brazil: environmental and social challenges. **Ecological Applications**, v. 18, n. 4, p. 885-898, 2008.

MARTINS, H. H.; SHIKIDA, P. F. A.; SESSO FILHO, U. A.; GIMENES, R. M. T.; CALVO, J. C. A. Employment generation and structural decomposition effects of the sugar and alcohol industries in Brazil. **Espacios**, v. 38, n. 11, p. 16-24, 2017.

MORAES, M. A. F. D.; OLIVEIRA, F. C.; DIAZ-CHAVEZ, R. SocioEconomic impacts of Brazilian sugarcane industry. **Environment Development**, v. 16, p. 31-43, 2015.

NASS, L. L.; PEREIRA, A.; ELLIS, D. Biofuels in Brazil: an overview. **Crop science**, v. 47, n. 6, p. 2228-2237, 2007.

NETER, J.; KUTNER, M. H.; NACHTSHEIM, C. J.; WASSERMAN, W. **Applied linear statistical models**. Chicago: Irwin, 1996.

OLIVEIRA, M. E. D.; VAUGHAN, B. E.; RYKIEL, E. J. Ethanol as fuel: energy, carbon dioxide balances, and ecological footprint. **BioScience**, v. 55, p. 593-602, 2005.

PRADO JUNIOR, C. **Formação do Brasil Contemporâneo: colônia**. São Paulo: Companhia das letras, 2011.

REICOSKY, D. C.; ARCHER, D. W. Moldboard plow tillage depth and short-term carbon dioxide release. **Soil & Tillage Research**, n. 94, p. 109-121, 2007.

RENOUF, M. A.; WEGENER, M. K.; NIELSEN, L. K. An environmental lifecycle assessment comparing Australian sugarcane with US corn and UK sugar beet as producers of sugars for fermentation. **Biomass and Bioenergy**, v. 32, p. 1144-1155, 2008.

SANTOS, O. I. B.; RATHMANN, R. Identification and analysis of local and regional impacts from the introduction of biodiesel production in the state of Piauí. **Energy Policy**, v. 37, p. 4011-4020, 2009.

SATOLO, L. F.; BACCHI, M. R. P. Impacts of the Recent Expansion of the Sugarcane Sector on Municipal per Capita Income in São Paulo State. **ISRN Economics**, v. 2013, p. 1-14, 2013.

SEEG - System for Greenhouse Gas Emissions and Removals Estimates. In: Tasso Azevedo (Org.). **Data base** (Base de dados). Brasília: Climate Observatory, 2018. Available in: <<http://seeg.eco.br/>>. Access in: 8 fev. 2019.

SOUZA, L. C.; FERNANDES, C.; NOGUEIRA, D. C. S.; MOITINHO, M. R.; BICALHO, E. S.; LA SCALA, N. Can partial cultivation of only the sugarcane row reduce carbon dioxide emissions in an Oxisol and Ultisol?. **Agronomy Journal**, Madison, v. 109, p. 1-9, 2017.

THORBURN, P. J.; PROBERT, M. E.; ROBERTSON, F.A. Modeling decomposition of sugarcane surface residues with APSIM Residue. **Field Crops Research**, v. 70, p. 223-232, 2001.

VASCONCELOS, K.; FARINHA, M.; BERNARDO, L.; LAMPERTD, V. N.; GIANEZINI, M.; COSTAB, J. S.; SOARES FILHO, A.; GENRO, T. C. M.; RUVIARO, C. F. Livestock-derived greenhouse gas emissions in a diversified grazing system in the endangered Pampa biome, Southern Brazil. **Land Use Policy**, v. 75, p. 442–448, 2018.

ZOCKUN, M. H. G. P. **A expansão da soja no Brasil**: alguns aspectos da produção. 1978. 228 f. Dissertação (Mestrado em Economia) - Faculdade de Economia e Administração, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1978.

ZUURBLER, P.; VOOREN, J. V. **Sugarcane ethanol**: Contributions to climate change mitigation and the environment. The Netherlands: Wageningen Academic, 2008.

## CAPÍTULO 5

### **ARTIGO: Pegada de carbono da fertilização no cultivo da cana-de-açúcar utilizando biossólido e fertilizante comercial**

**Resumo:** O aumento acentuado do uso do solo para a agricultura tem colaborado para a intensificação dos impactos ambientais negativos gerados, incluindo a emissão de gases de efeito estufa, o que impulsiona a busca por procedimentos que visem a mitigação desses impactos. Objetivou-se com este trabalho aplicar a metodologia da avaliação do ciclo de vida para analisar e quantificar os impactos associados ao uso de biossólido industrial e de fertilização química comercial para a produção de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.), variedade RB92579, para assim avaliar qual método de fertilização é mais viável ambientalmente. A avaliação do ciclo de vida tem sido uma das metodologias mais utilizadas, divulgadas e consolidadas para o cálculo de impactos ambientais, sendo capaz de quantificar os potenciais impactos de produtos ou sistemas, incluindo os fertilizantes. A parte experimental do estudo foi desenvolvida no município de Pedras de Fogo, no Estado da Paraíba, Brasil. O software usado para o desenvolvimento da Avaliação de Ciclo de Vida foi o SimaPro® 8.5.2.0, com bases de dados Ecoinvent e Agri-footprint, e métodos de avaliação de impactos ambientais IPCC 2013 GWP 100a e o Eco-indicator 99. As dosagens aplicadas de biossólido foram baseadas nos critérios e procedimentos contidos na Resolução Conama 375/06 e para a fertilização comercial utilizou-se ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio nas quantidades usualmente aplicadas pelos agricultores no Nordeste do Brasil. Os resultados permitiram distinguir os principais processos impactantes, sendo importantes para o biossólido o processo de calcinação e o transporte.

**Palavras-chave:** Impactos ambientais; *Saccharum officinarum* L.; biossólido industrial; fertilização química; avaliação do ciclo de vida.

**Abstract:** The sharp increase in land use for agriculture has contributed to the intensification of the negative environmental impacts generated, including the emission of greenhouse gases, which drives the search for procedures to mitigate these impacts. The objective of this work was to apply the life cycle assessment methodology to analyze and quantify the impacts associated with the use of industrial biosolids and commercial chemical fertilizers for the production of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) variety RB92579, in order to evaluate which method of fertilization is more environmentally feasible. Life cycle assessment has been one of the most widely used, published and consolidated methodologies for the calculation of environmental impacts, being able to quantify the potential impacts of products or systems, including fertilizers. The experimental part of the study was developed in the city of Pedras de Fogo, State of Paraíba, Brazil. The software used for the development of the Life Cycle Assessment was SimaPro® 8.5.2.0, with Ecoinvent and Agri-footprint databases, and environmental impact assessment methods IPCC 2013 GWP 100 and Eco-indicator 99. Dosages applied on biosolids were based on the criteria and procedures contained in Conama Resolution 375/06 and for commercial fertilization urea, simple superphosphate and potassium chloride were used in the amounts usually applied by the farmers in Northeast Brazil. The results allowed to distinguish the main impact processes, being important for the biosolid the calcination process and the transport.

**Keywords:** Environmental impacts; *Saccharum officinarum* L.; industrial biosolids; chemical fertilization; life cycle assessment.

## 5.1 INTRODUÇÃO

A agricultura é uma das atividades mais vulneráveis às mudanças climáticas e, ao mesmo tempo, uma das maiores emissoras de gases de efeito estufa. A utilização de biossólido industrial como fertilizante pode ser uma alternativa ambiental à fertilização comercial, por ser um resíduo normalmente pouco aproveitado, mas com alto potencial de uso, podendo ser transformado em um insumo agrícola.

Por conter em sua composição matéria orgânica e nutrientes, o biossólido tem grandes possibilidades de ser usado como fertilizante e condicionador do solo, sendo capaz de substituir os fertilizantes comerciais. O seu uso agrícola vem sendo estudado e testado em variadas culturas, sendo a cana-de-açúcar uma das alternativas mais promissoras (LATARE, 2014; SILVA-LEAL; MADRIÑAN-MOLINA; TORRES-LOZADA, 2016; SHARMA *et al.*, 2017). Estudos como os de Franco *et al.* (2008), Jamali *et al.* (2008) e Chen *et al.* (2011) mostram que o uso do biossólido na cultura canavieira colabora para o aumento de rendimentos, produtividade e acúmulo de nitrogênio.

A cana-de-açúcar é considerada uma importante cultura agrícola mundial, devido ao seu alto rendimento e valor econômico. É uma planta típica de clima tropical e subtropical, com ciclo vegetativo extenso, permanecendo no solo ao longo de todas as estações do ano e, em razão disso, sua produtividade torna-se muito influenciada pelas variáveis climáticas. Considera-se a cana-de-açúcar um dos principais cultivos brasileiros, uma vez que o Brasil é o maior produtor mundial (JAMES, 2004). A cana tem múltipla utilidade, podendo ser empregada *in natura* ou como matéria prima e, se adequadamente tratada, pode ser convertida em produto capaz de trazer amplos benefícios aos solos agrícolas. Diante da importância da cana-de-açúcar para a economia brasileira, a compreensão de sua pegada de carbono torna-se fundamental para a redução dos gases de efeito estufa emitidos (GOMI; SHIMADA; MATSUOKA, 2010; SINGH *et al.*, 2015).

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é a metodologia indicada para este tipo de abordagem, sendo capaz de quantificar os potenciais impactos ambientais associados a produtos ou sistemas ao longo de sua vida útil, incluindo os fertilizantes agrícolas. A ACV tem sido uma das metodologias mais utilizadas, divulgadas e consolidadas para indicar as atividades mais sustentáveis e para comparar estratégias de diminuição de impacto de diversos setores (ABRAHÃO; CARVALHO; CAUSAPÉ, 2017). No Brasil, a aplicação da

ACV está em ascensão, principalmente na área agrícola e de energia, sendo o seu uso um avanço estratégico importante para subsídio em estudos em prol da sustentabilidade ambiental e econômica (BODUNRIN *et al.*, 2018).

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo aplicar a metodologia da avaliação do ciclo de vida para analisar e quantificar os impactos ambientais associados ao uso de biossólido industrial e de fertilização química comercial para a produção de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum L.*), variedade RB92579, para assim avaliar qual método de fertilização é mais viável ambientalmente.

## 5.2 MATERIAL E MÉTODOS

### 5.2.1 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

A ACV é uma metodologia consolidada internacionalmente para a quantificação de impactos ambientais, e normatizada pela Organização Internacional para Padronização (*International Organization for Standardization*, ISO). A ACV pode ser aplicada a um produto, processo ou atividade, ao longo do seu ciclo de vida, que pode incluir as etapas de produção e uso do produto, extração das matérias-primas, produção, transporte, manutenção, uso e disposição final (Figura 5.1).

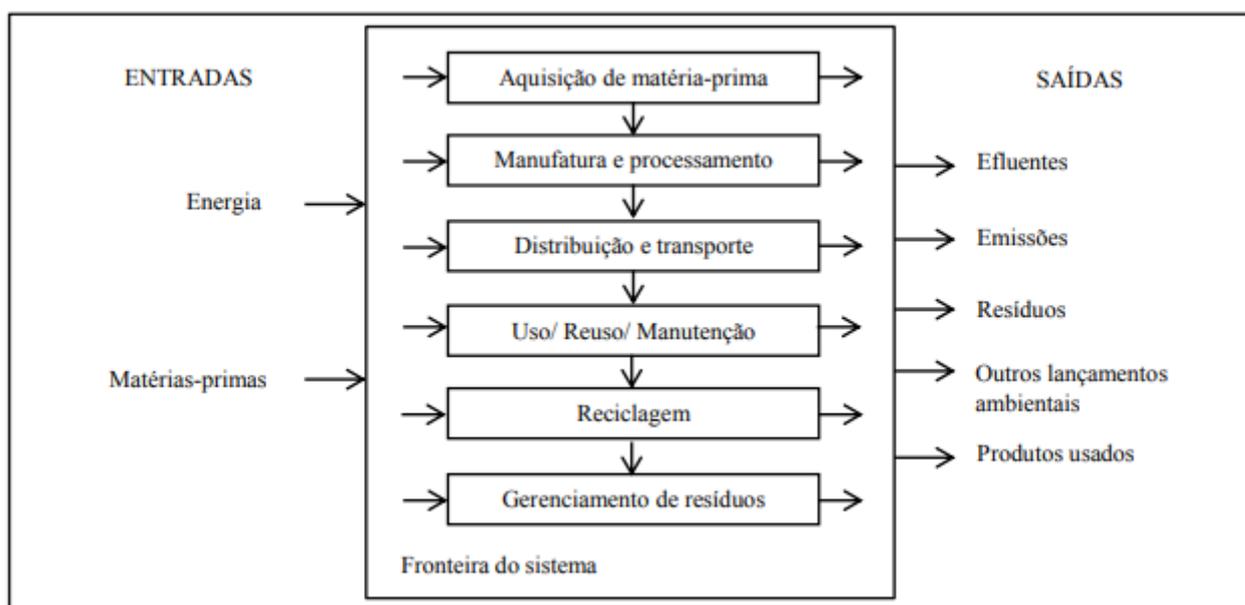


Figura 5.1 - Abrangência da Avaliação do Ciclo de Vida.

Fonte: Florindo *et al.* (2015).

A ACV possui quatro etapas (ISO 14040, 2006; ISO 14044, 2006): 1) definição dos objetivos e escopo, quando se determinam, por exemplo, as fronteiras do estudo e as categorias de impacto a serem consideradas; 2) construção de inventário, que coleta os dados que representam os fluxos de matéria e energia que entram e que saem das diversas etapas do ciclo de vida do produto, dentro das fronteiras estabelecidas na fase 1; 3) avaliação dos impactos, quando se seleciona um método de avaliação de impactos ambientais para expressar os resultados da análise, e 4) interpretação, que compreende as conclusões, limitações e as recomendações do estudo.

A etapa 3 pode ser desenvolvida utilizando-se métodos *midpoint* ou *endpoint*. Os métodos *midpoint* usam indicadores localizados ao longo do mecanismo ambiental antes de chegar ao ponto final da categoria, enquanto que os métodos *endpoint* consideram todo o mecanismo ambiental até o seu ponto final (dano específico relacionado com saúde humana, ambiente natural ou recursos naturais (MENDES; BUENO; OMETTO, 2016). As categorias *midpoint* e *endpoint*, assim como as suas relações, estão ilustradas na Figura 5.2.

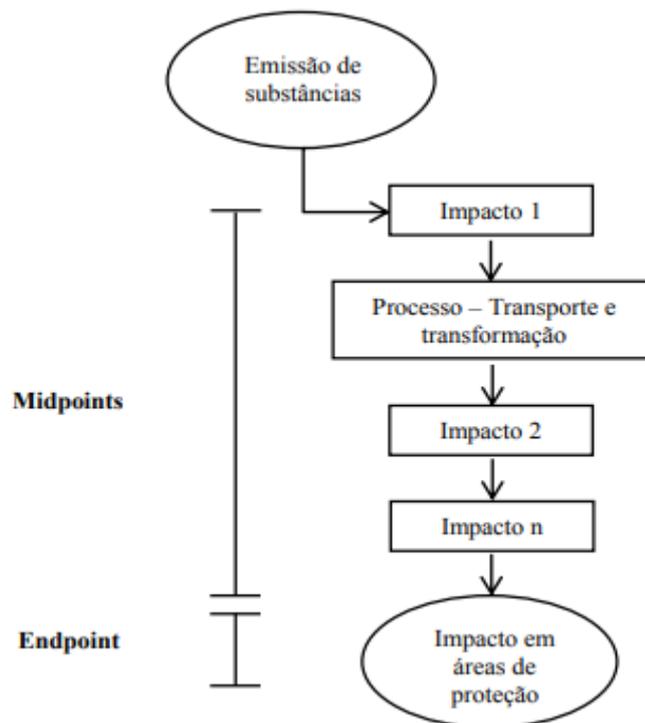


Figura 5.2 - Categorias *midpoint* e *endpoint*, assim como as suas relações em uma ACV.

Fonte: Traduzido de Finnveden *et al.* (2009).

O *software* utilizado para o desenvolvimento da ACV foi o SimaPro® 8.5.2.0 (PRÉ-CONSULTANTS, 2018), que segue os procedimentos das normas ISO 14040 (2006) e 14044 (2006), que no Brasil foram traduzidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) nas normas NBR 14040 (2014a) e NBR 14044 (2014b).

As bases de dados utilizadas foram Agri-footprint (2017) e Ecoinvent (2017). Para avaliar os impactos ambientais, os métodos escolhidos foram o IPCC 2013 GWP 100a e o Eco-indicator 99. O método IPCC 2013 GWP 100a é *midpoint*, e expressa os impactos ambientais em termo da emissão de gases de efeito estufa (GEE). Utiliza-se o GWP (*Global Warming Potential*, potencial de aquecimento global) para definir a contribuição relativa ocasionada pelas emissões atmosféricas de um kg de GEE comparando-o com a emissão de um kg de dióxido de carbono. O impacto ambiental resultante dessa análise é expresso em kg CO<sub>2</sub>-eq. (IPCC, 2013). Este método compreende a contribuição antrópica mais a variabilidade natural do sistema climático.

O método Eco-indicator 99 (EI-99) é um método *endpoint*, e inclui etapas de normalização e ponderação. O EI-99 possui 11 categorias de impacto (Figura 5.3), que são agrupadas em três categorias de dano, ponderadas e então agregadas em um índice único, que representa a carga ambiental geral em pontos. Mil pontos equivalem ao impacto ambiental de um habitante europeu médio.

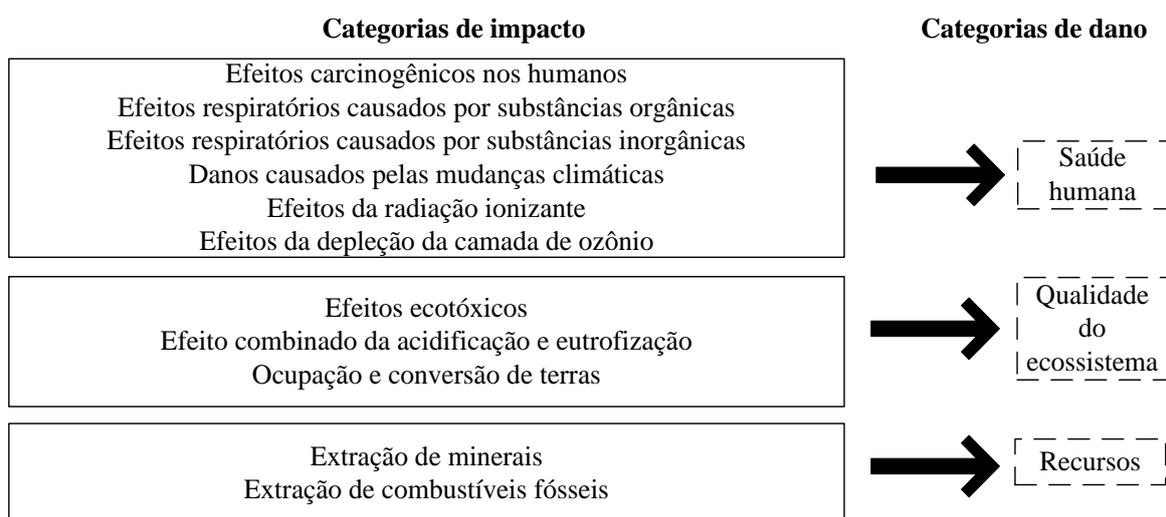


Figura 5.3 - Categorias de impacto e categorias de dano do método Eco-indicator 99.

Fonte: Traduzido de Carvalho (2011).

A etapa de normalização pode utilizar três perspectivas sociais para avaliar os impactos ambientais (GOEDKOOOP, 1999; PRÉ-CONSULTANTS, 2000): (H) hierárquico,

(I) individualista ou (E) igualitário<sup>2</sup>. A etapa de ponderação utiliza fatores para atribuir valores aos potenciais impactos ambientais, permitindo agrupar os pontos num só índice. Aqui utilizou-se a perspectiva hierárquica (H) com ponderação média (A, *average*), resultando na abordagem H/A. A Figura 5.4 mostra a contribuição relativa das 11 categorias de impacto consideradas nas três categorias de dano para o índice único, na abordagem (H/A). Mais detalhes sobre este método podem ser consultados em Carvalho, Serra e Lozano (2011).

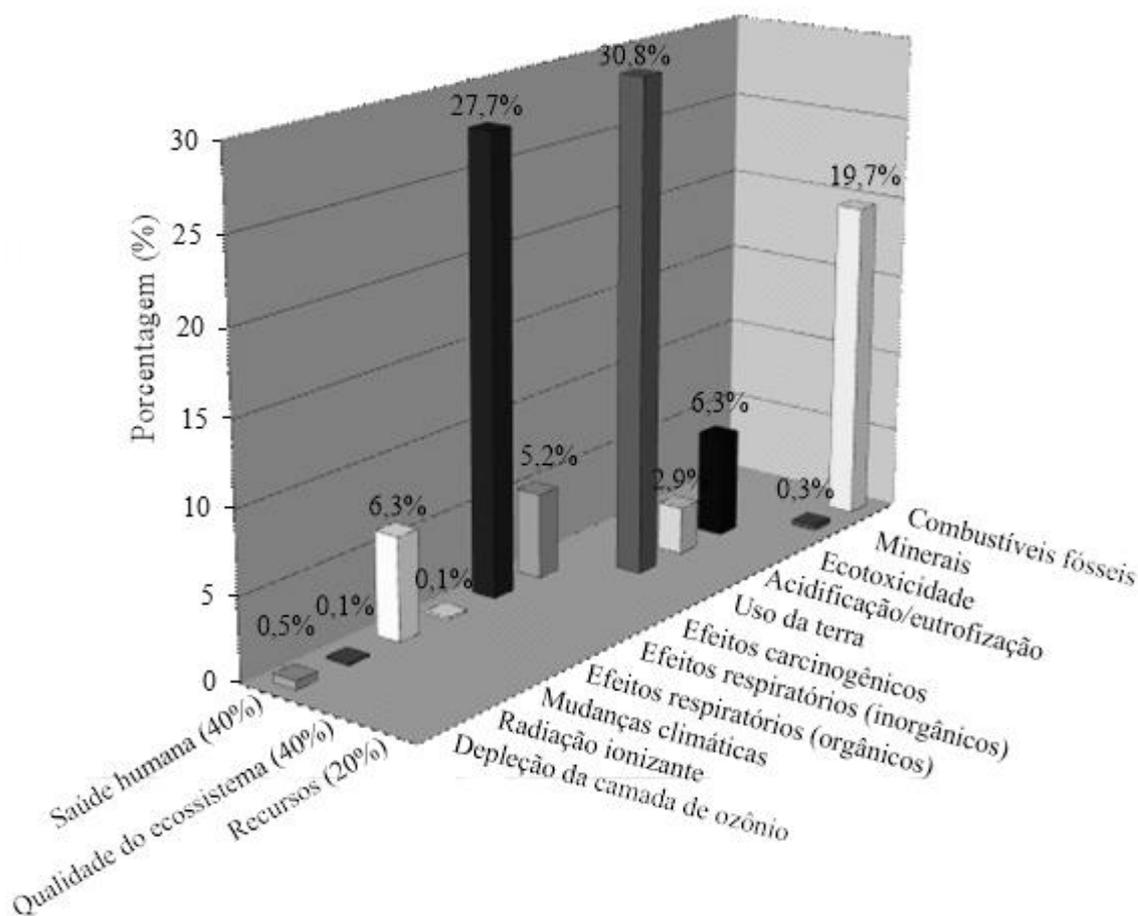


Figura 5.4 - Contribuição relativa das 11 categorias de impacto para o índice único, na abordagem (H/A).

<sup>2</sup> H: os impactos ambientais são incluídos a partir de consenso científico, I: perspectiva de curto prazo, caracterizada somente por efeitos comprovados, E: perspectiva de longo prazo, caracterizada por qualquer comprovação científica.

### 5.2.2 Área experimental

A área de estudo foi uma fazenda experimental localizada na cidade de Pedras de Fogo, Estado da Paraíba, Brasil. As estimativas de emissões foram realizadas tendo em conta um hectare de terreno cultivado de cana-de-açúcar. Consideraram-se também as experiências de manejo local para o cultivo (informações dos agricultores locais) e as recomendações técnicas identificadas na literatura pesquisada, como base para o desenvolvimento da pegada de carbono.

O experimento foi delineado em blocos casualizados, sendo três blocos para cada tratamento. Na fertilização química comercial, em sua aplicação houve dosagens de ureia (100 kg/ha.ano), superfosfato simples (80 kg/ha.ano) e cloreto de potássio (80 kg/ha.ano), seguindo o manejo local. Para a aplicação de bio sólido, as dosagens foram estabelecidas pela Resolução Conama 375/06, artigo 17 e anexo 3 (BRASIL, 2006). No “bio sólido 1x” a quantidade dosada foi de 6000 kg/ha.ano em base seca, no “bio sólido 2x” foi de 12000 kg/ha.ano, no “bio sólido 4x” foi de 24000 kg/ha.ano e no “bio sólido 8x” de 48000 kg/ha.ano. Para higienização e tratamento do bio sólido foi aplicada cal hidratada, na proporção de 30% de cal para o peso seco dosado, conforme as orientações contidas na Resolução Conama 375/06 (BRASIL, 2006). O bio sólido utilizado no experimento foi derivado de uma indústria têxtil localizada a 35 km da fazenda experimental.

Para reduzir os gastos e potencializar a produtividade da cana-de-açúcar, foi utilizada a irrigação por gotejamento. Empregou o modelo proposto por Hargreaves e Samani (1982), com a instalação de um termômetro para monitorar a temperatura máxima e mínima diária na área experimental. Para a irrigação foram usados gotejadores de 0,7 mm de espessura, vazão nominal de 1,5 L/h, com espaçamento de 0,5 m entre os gotejadores.

O inventário do ciclo de vida da fertilização química comercial aplicada está apresentado na Tabela 5.1. Os dados de entrada da esfera tecnológica correspondem às substâncias utilizadas na fertilização do solo, como os fertilizantes químicos empregados no experimento e os transportes. A origem dos dados coletados para computar as quantidades finais expostas foram da base de dados do SimaPro, com base nos estudos de Kongshaug (1998) e de Davis e Haglund (1999), os quais pesquisaram sobre a utilização de energia nos processos produtivos e emissões do transporte de matérias-primas e produtos intermediários que são utilizados na fabricação de fertilizantes, respectivamente.

Tabela 5.1 - Inventário da fertilização da cana-de-açúcar utilizando os fertilizantes químicos no experimento.

Entradas da esfera tecnológica	Quantidade
Ureia	100 kg/ha.ano
Superfosfato	80 kg/ha.ano
Cloreto de potássio	80 kg/ha.ano
Transporte - Fábrica de produção da ureia (Sousa do Amarante/RN – Pedras de Fogo/PB)	222 km
Transporte - Fábrica de produção do superfosfato (Recife/PE – Pedras de Fogo/PB)	89,5 km
Transporte - Fábrica de produção do cloreto de potássio (Recife/PE – Pedras de Fogo/PB)	89,5 km

Para o fertilizante químico comercial foram consideradas no processo produtivo as seguintes entradas da esfera tecnológica e suas especificações: ureia (amônia e dióxido de carbono como matérias-primas; o seu processamento, até a entrega do produto final em sacos de 25 kg), superfosfato (fosfato natural e ácido sulfúrico como matérias-primas; o processamento desse material, até a entrega do produto final) e cloreto de potássio (recebimento do cloreto de potássio em sua forma natural, seu processamento até a entrega do produto final). No que se refere ao transporte após a fabricação, foi computado o transporte de onde foi produzido o fertilizante até a área experimental. Deste modo, foi contado todo o consumo energético e de materiais em todos os processos.

As entradas da esfera tecnológica da fertilização por biossólido estão apresentadas na Tabela 5.2. Estabeleceram-se as quantidades dosadas de biossólido em quilograma por hectare, o transporte do local onde foi produzido o biossólido até a área experimental e a dosagem de cal hidratada para estabilização, de acordo com as normas da Resolução Conama 375/06 (BRASIL, 2006).

Os processos constituintes da base de dados do Ecoinvent (2017) foram adaptados à realidade da produção da cal utilizada no experimento, da mesma maneira que foi utilizado por Neves *et al.* (2018), que observou na base do Ecoinvent um mix de combustíveis pesado (carvão, gás de coqueria, óleo diesel e outros) no processo de produção de cal. Dado que para a cal usada no experimento foi apurado que no processo de calcinação foram empregados cavacos de madeira como fonte energética para essa etapa de produção.

Tabela 5.2 - Inventário da fertilização da cana-de-açúcar utilizando o biossólido industrial no experimento.

Entradas da esfera tecnológica	Quantidade
Biossólido 1x	6000 kg/ha.ano
Biossólido 2x	12000 kg/ha.ano
Biossólido 4x	24000 kg/ha.ano
Biossólido 8x	48000 kg/ha.ano
Cal hidratada	300 kg/t de biossólido
Transporte do biossólido até a área experimental	35 km

Ao analisarem o inventário do Ecoinvent com a realidade do Brasil, Eicker *et al.* (2010) chegaram à conclusão que essa base de dados é aplicável para a caracterização de processos brasileiros em sua forma original ou por meio de adaptações, como foi realizado por Delgado e Carvalho (2017). Os processos relacionados à energia elétrica usada para a desidratação do biossólido não foram computados, tendo em vista que esses processos teriam que ocorrer mesmo se o biossólido não fosse usado para fins agrícolas.

### 5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por meio das considerações feitas na etapa de inventário foi possível estimar os impactos ambientais associados à realização do experimento. A Tabela 5.3 mostra a pegada de carbono associada à aplicação da fertilização química comercial. O total foi de 96,5 kg CO<sub>2</sub>-eq/ha.ano, no qual 63,2%, ou seja, 61 kg CO<sub>2</sub>-eq. foram devidos aos processos de fabricação e transporte da ureia até a fazenda experimental. O superfosfato simples contribuiu com 16,4% do total e o cloreto de potássio com 20,4%.

Tabela 5.3 - Pegada de carbono associada ao uso da fertilização química comercial no cultivo da cana-de-açúcar.

Processo	Pegada de carbono (kg CO <sub>2</sub> -eq/ha.ano)
Ureia (Fabricação, Embalagem) + Transporte	59,1 + 1,9 = 61,0
Superfosfato (Fabricação, Embalagem) + Transporte	14,6 + 1,2 = 15,8
Cloreto de potássio (Fabricação, Embalagem) + Transporte	18,5 + 1,2 = 19,7
<b>TOTAL</b>	<b>96,5</b>

Neves *et al.* (2018), ao realizarem uma ACV para comparar a fertilização química e por biossólido na cultura do capim-elefante, chegaram a um total de 165,4 kg de CO<sub>2</sub>-eq/ha.ano na fertilização química comercial, sendo essa superior à da cana-de-açúcar. Abrahão *et al.* (2017), ao desenvolverem uma ACV para a cultura do milho, chegaram à conclusão que 87% dos impactos ambientais gerados do sistema eram ocasionados pelos fertilizantes, sendo a maior parte da ureia.

No que se refere à pegada de carbono associada ao uso do biossólido industrial, a Tabela 5.4 mostra que para a dosagem calculada conforme as determinações da Resolução Conama 375/06 (BRASIL, 2006), o “biossólido 1x”, emitiu 70,9 kg de CO<sub>2</sub>-eq./ha.ano, enquanto que para o “biossólido 2x” o resultado foi de 141,8 kg de CO<sub>2</sub>-eq./ha.ano, o “biossólido 4x” foi de 283,6 kg de CO<sub>2</sub>-eq./ha.ano e o “biossólido 8x” foi de 567,2 kg de CO<sub>2</sub>-eq./ha.ano. Como as dosagens de biossólido são superiores à da fertilização química comercial, o seu transporte até a área experimental exigiu um gasto energético superior, potencializando deste modo a pegada de carbono principalmente pelo transporte. Uma vez que esse processo é responsável pela maior parte das emissões, a consideração de um percurso menor em tais processos (quando possível) poderia levar a diferenças significantes nas emissões, além de também ser economicamente mais viável.

Tabela 5.4 - Pegada de carbono associada ao uso do biossólido industrial como fertilizante no cultivo da cana-de-açúcar.

Processo empregado	Pegada de carbono (kg CO <sub>2</sub> -eq./ha.ano)
Biossólido 1x + Cal + Transporte da Cal + Transporte Final	0 + 8,7 + 15,9 + 46,3 = 70,9
Biossólido 2x + Cal + Transporte da Cal + Transporte Final	0 + 17,4 + 31,8 + 92,6 = 141,8
Biossólido 4x + Cal + Transporte da Cal + Transporte Final	0 + 34,8 + 63,6 + 185,2 = 283,6
Biossólido 8x + Cal + Transporte da Cal + Transporte Final	0 + 69,6 + 127,2 + 370,4 = 567,2

Neves *et al.* (2018), calculou a ACV do capim-elefante com a utilização de dosagem de “biossólido 1x” como fertilizante, chegaram a 135,3 kg CO<sub>2</sub>-eq/ha.ano, uma redução de 18,2% em relação à fertilização química. Deste modo, a dosagem de “biossólido 1x”, calculada conforme a Resolução Conama 375/06 (BRASIL, 2006), obteve uma porcentagem aproximada a da cana-de-açúcar no presente trabalho, que foi uma redução de 26,5% de emissões de CO<sub>2</sub>-eq/ha.ano em comparação ao uso da fertilização comercial. Isto retrata 25,6

kg CO<sub>2</sub>-eq/ha.ano de emissões evitadas em relação à utilização do mix de fertilização química. Vale ressaltar que, tanto para o capim-elefante quanto para a cana-de-açúcar, os outros tratamentos com o bio sólido tiveram uma quantidade de CO<sub>2</sub>-eq. emitida superior ao tratamento com a fertilização química comercial.

Esses resultados estão de acordo com o estudo de Yoshida *et al.* (2015), que aplicaram o bio sólido na agricultura para investigar os efeitos nas emissões de gases de efeito estufa e chegaram à conclusão que a sua utilização, combinada a técnicas de estabilização, contribuiu para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>, como também, melhorar o valor do bio sólido como fertilizante.

O segundo método escolhido foi o Eco-indicator 99 que objetiva facilitar a interpretação e ponderação dos resultados da ACV através do cálculo de pontuações únicas (eco indicadores). A Tabela 5.5 mostra os impactos ambientais estimados pelo Eco-indicator 99, gerados com a aplicação da fertilização química comercial. O total de emissão foi de 14,70 pontos/ha.ano, no qual 75,6%, ou seja, 11,12 pontos, foram por meio de processos de fabricação, embalagem e transporte da ureia até a fazenda experimental. O superfosfato simples contribuiu com 12,8% do total e o cloreto de potássio com 11,6%.

Tabela 5.5 - Impactos ambientais associados ao uso da fertilização química comercial no cultivo da cana-de-açúcar calculados por meio do Eco-indicator 99 (H/A).

Processo	Emissões (pontos/ha.ano)
Ureia (Fabricação, Embalagem) + Transporte	10,87 + 0,25 = 11,12
Superfosfato (Fabricação, Embalagem) + Transporte	1,72 + 0,16 = 1,88
Cloreto de potássio (Fabricação, Embalagem) + Transporte	1,54 + 0,16 = 1,70
<b>TOTAL</b>	<b>14,70</b>

Silva *et al.* (2014) identificaram e quantificaram os principais impactos ambientais da geração da eletricidade do bagaço da cana-de-açúcar, por meio do Eco-indicator 99, identificando que as principais fontes de impacto são a queima da cana-de-açúcar antes da colheita e o uso do diesel em caminhões e tratores para colheita. Morales *et al.* (2015) realizaram uma revisão bibliográfica sobre ACV de bioetanol lignocelulósico e chegaram à conclusão que, para a maioria dos estudos revisados, o uso do bioetanol de cana-de-açúcar é energeticamente sustentável e com os menores impactos ambientais em comparação com a gasolina e outros subprodutos.

A Tabela 5.6 mostra os impactos ambientais associados ao uso do biofóssido no experimento com dosagem calculada conforme as determinações da Resolução Conama 375/06 (BRASIL, 2006), o “biofóssido 1x”, emitiu 12,42 pontos/ha.ano, enquanto que para o “biofóssido 2x” o resultado foi de 24,84 pontos/ha.ano, o “biofóssido 4x” foi de 49,68 pontos/ha.ano e o “biofóssido 8x” foi de 99,36 pontos/ha.ano. Como no indicador anterior, as dosagens de biofóssido são superiores à da fertilização química comercial, o seu transporte até a área experimental demandou um gasto energético maior, intensificando as emissões geradas.

Tabela 5.6 - Impactos ambientais associados ao uso do biofóssido industrial como fertilizante no cultivo da cana-de-açúcar calculados por meio do Eco-indicator 99 (H/A).

Processo empregado	Emissões geradas (pontos/ha.ano)
Biofóssido 1x + Cal + Transporte da Cal + Transporte Final	$0 + 4,24 + 2,09 + 6,09 = 12,42$
Biofóssido 2x + Cal + Transporte da Cal + Transporte Final	$0 + 8,48 + 4,18 + 12,18 = 24,84$
Biofóssido 4x + Cal + Transporte da Cal + Transporte Final	$0 + 16,96 + 8,36 + 24,36 = 49,68$
Biofóssido 8x + Cal + Transporte da Cal + Transporte Final	$0 + 33,92 + 16,72 + 48,72 = 99,36$

Ao comparar os danos gerados pelo biofóssido e pela fertilização química comercial, percebe-se que o biofóssido 1x se mostrou uma alternativa viável ambientalmente, uma vez que gerou 12,42 pontos/ha.ano frente aos 14,70 pontos/ha.ano da fertilização química comercial. Rigby *et al.* (2016) ressaltam que a utilização do biofóssido em solos agrícolas é uma das práticas preferidas internacionalmente, devido aos seus benefícios econômicos, ambientais e para a saúde humana.

Para avaliar os danos ambientais do biofóssido 1x e da fertilização comercial, foram apresentados resultados agrupados em três categorias de danos: saúde humana, qualidade do ecossistema e recursos, como ilustrado na Figura 5.5. Nota-se que a categoria recursos é a mais afetada pela fertilização comercial, enquanto que impactos negativos relacionados à saúde humana são os principais procedentes do biofóssido 1x. As maiores dosagens de biofóssido (2x, 4x e 8x) não foram apresentadas na Figura 5.1 porque as proporções de contribuição às categorias de dano do Eco-indicator 99 são exatamente iguais às do biofóssido 1x, somente a magnitude total do impacto é diferente.

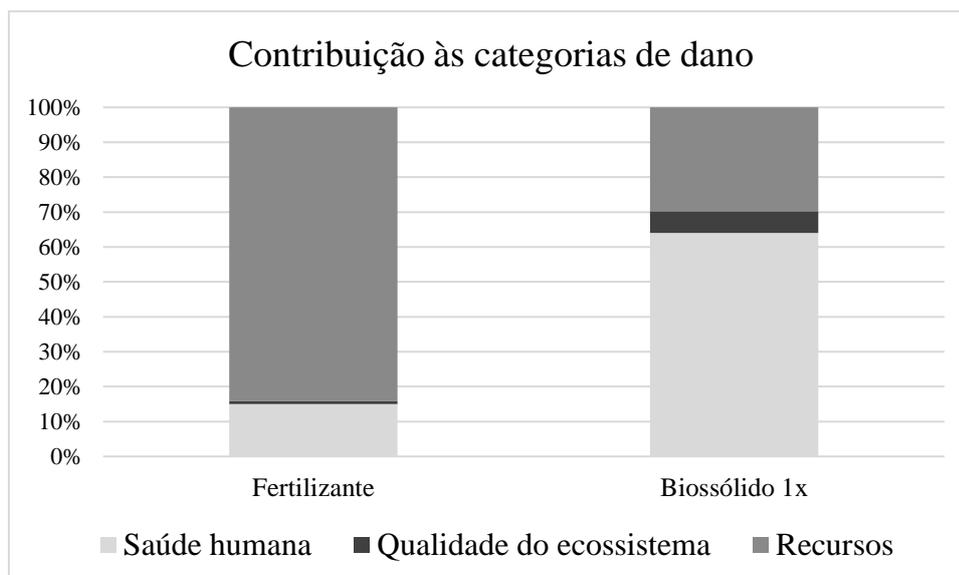


Figura 5.5 - Contribuição às categorias de dano do Eco-indicador 99 (H/A) para o fertilizante comercial e o biossólido 1x.

A cana-de-açúcar é considerada uma das culturas com maior produtividade em um único corte. Esse desempenho está relacionado principalmente ao seu perfilhamento e a fertilização impulsiona a sua produtividade. Além de entender e comparar as emissões de gases de efeito estufa e a pontuação de impacto ambiental, torna-se necessário saber a viabilidade do uso do biossólido através da produtividade. A Tabela 5.7 apresenta a produtividade da cana-de-açúcar no experimento e as emissões de CO<sub>2</sub> equivalentes e as pontuações de impacto por produção com utilização da fertilização química e do biossólido industrial. O corte ocorreu onze meses após o plantio, de acordo com o estágio de maturação determinado pelo índice de maturação.

Tabela 5.7 - Produtividade da cana-de-açúcar alcançada para cada tratamento e emissões geradas e pontuação de impacto ambiental em relação à quantidade produzida.

Tratamento	Produtividade (t/ha)	kg CO <sub>2</sub> -eq emitido/t produzida	Impacto ambiental (pontos/t produzida)
Fertilização química comercial	145,9	0,66	0,10
Biossólido 1x	203,9	0,35	0,06
Biossólido 2x	169,0	0,84	0,15
Biossólido 4x	239,5	1,18	0,21
Biossólido 8x	268,4	2,11	0,37

A produtividade total da fertilização química foi inferior em 58,0 t/ha em relação ao tratamento com “biossólido 1x”. Pode-se observar que a produtividade da fertilização química comercial foi inferior ao biossólido em todos os tratamentos. Além disso, o tratamento por “biossólido 1x” se mostrou mais favorável que a fertilização química ao analisar o CO<sub>2</sub>-eq emitido, produzindo 0,31 kg CO<sub>2</sub>-eq emitidos a menos por cada tonelada de cana-de-açúcar produzida. A fertilização comercial e o “biossólido 2x” tiveram resultados aproximados em produtividade e emissões de CO<sub>2</sub>-eq.

Ao comparar a produtividade através de pontos de danos gerados pelo Eco-indicator 99, percebe-se que o “biossólido 1x” foi o que possuiu o menor impacto ambiental em relação à quantidade produzida comparado aos outros tratamentos. Desse modo, o “biossólido 1x” apresentou 0,04 pontos a menos que a fertilização comercial, reafirmando possível colaboração na diminuição de danos ambientais.

Mayer *et al.* (2016) utilizaram o Eco-Indicador 99 em uma produção de bioetanol hidratado em pequena escala, a fertilização foi considerada uma das etapas que mais geram impacto ambiental, sendo o estágio agrícola na ACV responsável por 7 de 11 categorias de impacto ambiental (as etapas de transporte e industrial obtiveram as maiores contribuições), apontando para uma necessária atenção especial para minimizar os possíveis danos ambientais.

Ao analisarem a produtividade do biossólido na cana-de-açúcar, Silva *et al.* (1998) aplicaram três doses de biossólido oriundo de esgoto (0, 15 e 30 t/ha), com e sem complementos minerais. Seus resultados expressaram ganho de produtividade sem perdas na sua qualidade tecnológica medida pelo Brix, Pol e ATR. Franco *et al.* (2008), também analisando a produtividade da cana-de-açúcar com biossólido de esgoto, concluiu que houve maior produtividade no uso do biossólido simultaneamente com a vinhaça ou com complemento de cloreto de potássio, contribuindo com o aumento da produção de colmos e do açúcar de forma semelhante à adubação por fertilização química comercial.

Vale ressaltar que diversos autores afirmam que o uso de fertilizante químico comercial no cultivo é apontado como grande causador de outros impactos ambientais, além dos derivados das emissões de gases de efeito estufa, sendo viável procurar formas de fertilização ambientalmente menos impactantes, como o biossólido. Habitualmente, a fertilização química causa desestruturação e salinização do solo (OU *et al.*, 2009; SAVCI, 2012).

Diversas pesquisas apontam para os benefícios do uso do biofóssido como fertilizante agrícola, com melhorias significativas nas propriedades biológicas, químicas e físicas do solo. O biofóssido aumenta e conserva o nível de fertilização do solo, através da função de distribuição de nutrientes ou por intermédio de modificações dos seus atributos químicos (JACOBS; MCCREARY, 2001; BERTONCINI *et al.*, 2008; OJEDA *et al.*, 2008; TSADILAS *et al.*, 2011). Na cana-de-açúcar, a literatura tem mostrado benefícios na produtividade e maior rendimento da sacarose, além de melhorar as características nutricionais do solo e o acúmulo de nitrogênio vegetal (FRANCO *et al.*, 2008; JAMALI *et al.*, 2008).

Page *et al.* (1987), ao falarem sobre os metais pesados e substâncias tóxicas que podem ser encontradas no biofóssido, garantem que essas substâncias não afetam significativamente no sistema solo-planta, pois o biofóssido exerce juntamente papel de fonte e agente imobilizador no solo. A absorção dessas substâncias pelas culturas, em função das taxas de aplicação do resíduo, tem expressado diferentes tipos de resposta como reações próximas, lineares, efeitos negativos ou inexistentes. Para Chang *et al.* (1997), a assimilação das plantas pelos metais pesados são mínimas, independentemente da quantidade de sua absorção.

No presente trabalho, a aplicação do biofóssido industrial têxtil como fertilizante na cana-de-açúcar se mostrou uma alternativa promissora para o desenvolvimento de sistemas agrícolas mais sustentáveis e produtivos. Deste modo, a utilização do “biofóssido 1x” se mostrou mais viável ambientalmente, com maior produtividade do que a fertilização química comercial, menor emissão de gases de efeito estufa e menor pontuação de impactos ambientais negativos, contribuindo assim na mitigação dos impactos do cultivo e solucionando o problema da destinação final desse resíduo industrial.

#### **5.4 CONCLUSÃO**

A ferramenta de ACV permitiu avaliar os impactos ambientais associados aos processos de fertilização química comercial e por biofóssido industrial têxtil para a cana-de-açúcar, permitindo comparar qual tipo de fertilização é o mais viável ambientalmente. Essa análise foi condicionada a preocupações crescentes com as emissões de gases de efeito estufa e as mudanças climáticas, além de saúde humana, qualidade dos ecossistemas e disponibilidade de recursos.

Os resultados permitiram distinguir os principais processos impactantes, sendo importantes para o bio sólido o processo de calcinação e o transporte. As emissões de gases de efeito estufa geradas no cultivo da cana-de-açúcar podem ser diminuídas utilizando bio sólido como fertilizante aplicado à taxa recomendada pela Resolução Conama 375/06 (bio sólido 1x). Tais aplicações alcançam produtividades superiores em todos os tratamentos por bio sólido em comparação à fertilização química comercial, com a vantagem de uma menor pegada de carbono no tratamento “bio sólido 1x”. Além disso, o “bio sólido 1x” apresentou a menor pontuação de impacto ambiental em relação à produção de cana-de-açúcar, sendo 0,04 pontos menor que a fertilização comercial.

Recomendam-se estudos de ACV no qual sejam analisados outros indicadores de avaliação de impactos ambientais, com o intuito de fornecer subsídios para comparação, compreensão e desenvolvimento de estratégias de diminuição de outros impactos ambientais do cultivo da cana-de-açúcar, além de um estudo de viabilidade econômica sobre a rentabilidade do uso do bio sólido em comparação à fertilização comercial.

## REFERÊNCIAS

ABRAHÃO, R.; CARVALHO, M.; CAUSAPÉ, J. Carbon and water footprints of irrigated corn and non-irrigated wheat in Northeast Spain. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, p. 5647-5653, 2017.

AGRI-FOOTPRINT. **Database**, 2017. Disponível em: <<http://www.agri-footprint.com/>>. Access in: 8 fev. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Gestão Ambiental –Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e estrutura: NBR ISO 14040, Rio de Janeiro: ABNT, 2009 – versão corrigida 2014a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Gestão ambiental -Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações: NBR ISO 14044, Rio de Janeiro: ABNT, 2009 – versão corrigida 2014b.

BERTONCINI, E. I.; D’ORAZIO, V.; SENESI, N.; MATTIAZZO, M. E. Effects of sewage sludge amendment on the properties of two Brazilian oxisols and their humic acids. **Bioresource Technology**, v. 99, p. 4972–4979, 2008.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução nº 375**, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Disponível em: <[www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf](http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf)>. Acesso em: 8 fev. 2019.

BODUNRIN, M. O.; BURMAN, N. W.; CROFT, J.; ENGELBRECHT, S.; GOGA, T.; LADENIKA, A. O.; MACGREGOR, O. S.; MAEPA, M.; HARDING, K. G. The availability of life-cycle assessment, water footprinting, and carbon footprinting studies in Brazil. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 23, p. 1701–1707, 2018.

CARVALHO, M. **Thermoeconomic and environmental analyses for the synthesis of polygeneration systems in the residential-commercial sector**. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Zaragoza. Zaragoza, Espanha: UniZar, 2011.

CARVALHO, M.; SERRA, L. M.; LOZANO, M. A. Optimal synthesis of trigeneration systems subject to environmental constraints. **Energy**, v. 36, n. 6, p. 3779-3790, 2011.

CARVALHO, M.; DELGADO, D. Potential of photovoltaic solar energy to reduce the carbon footprint of the Brazilian electricity matrix. **LALCA - Revista Latino Americana em Avaliação do Ciclo de Vida**, v. 1, n. 1, p. 64-85, 2017.

CHANG, A. C.; HYUN, H.; PAGE, A. L. Cadmium uptake for swiss chard grown on composted sludge treated fields plots: Plateau or time bomb?. **Journal of Environmental Quality**, v. 26, n. 1, p. 11-19, 1997.

CHEN, X.; GUANGCUN, C.; CHEN, L.; CHEN, Y.; LEHMANN, J.; MCBRIDE, M. B.; HAY, A. G. 2011. Adsorption of copper and zinc by biochars produced from pyrolysis of hardwood and corn straw in aqueous solution. **Bioresource Technol**, v. 102, n. 19, p. 8877–8884, 2011.

DAVIS, J.; HAGLUND, C. **Life cycle inventory (LCI) of fertiliser production**. Fertiliser products used in Sweden and Western Europe. In: SIK Report No. 654. Go`teborg (Sweden): SIK, The Swedish Institute for Food and Biotechnology, 1999.

ECOINVENT. **Database**, version 3.4, 2017. Disponível em: <<http://www.ecoinvent.org/>>. Access in: 8 fev. 2019.

EICKER, M. O.; HISCHIER, R.; KULAY, L. A.; LEHMANN, M.; ZAH, R.; HURNI, H. The applicability of non-local LCI data for LCA. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 30, p. 192-199, 2010.

FINNVEDEN, G.; HAUSCHILD, M. Z.; EKVALL, T.; GUINÉE, J.; HEIJUNGS, R.; HELLWEG, S.; KOEHLER, A.; PENNINGTON, D.; SUH, S. Recent developments in life cycle assessment. **Journal of environmental management**, v. 91, n. 1, p. 1-21, 2009.

FLORINDO, T.J.; MEDEROS, G.I.B.; RUIVARO, C.F.; COSTA, J.S. Avaliação do impacto do ciclo de vida: uma discussão metodológica. **Natureza on line**, v. 13, n. 5, p. 211-219, 2015.

FRANCO, A.; MARQUES, M. O.; MELO, W. J. Sugarcane grown in an oxisol amended with sewage sludge and vinasse: nitrogen contents in soil and plant. **Scientia Agricola**, v. 65, n. 4, p. 408-414, 2008.

GOEDKOOOP, M. J. **The Eco-indicator 99**. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment Methodology Report. Amsterdam: Pre Consultants, 1999.

GOMI, K.; SHIMADA, K.; MATSUOKA, Y. A low-carbon scenario creation method for a local-scale economy and its application in Kyoto city. **Energy Policy**, v. 38, n. 9, p. 4783–4796, 2010.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Estimation of potential evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Division ASCE**, v. 108, n. 3, p. 225- 230, 1982.

JAMALI, M. K.; KAZI, T. G.; ARAIN, M. B.; AFRIDI, H. I.; MEMON, A. R.; JALBANI, N.; SHAH, A. Use of Sewage Sludge After Liming as Fertilizer for Maize Growth. **Pedosphere Volumen**, v. 18, n. 2, p. 203-213, 2008.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Revised supplementary methods and good practice guidance arising from the Kyoto protocol, 2013**. Disponível em <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/kpsg/>>. Access in: 8 fev. 2019.

ISO 14040 - International Organization for Standardization. Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. Geneva, 2006.

ISO 14044 - International Organization for Standardization. Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines, Geneva, 2006.

JACOBS, L.; MCCREARY W. D. S. **Utilizing Biosolids On Agricultural Land**. Department of Crop and Soil Sciences. Michigan State University. Extension Bulletin, 2001.

JAMALI, M. K.; KAZI, T. G.; ARAIN, M. B.; AFRIDI, H. I.; MEMON, A. R.; JALBANI, N.; SHAH, A. Use of Sewage Sludge After Liming as Fertilizer for Maize Growth. **Pedosphere**, v. 18, n. 2, p. 203-213, 2008.

JAMES, G. **Sugarcane**. 2 ed. London: Blackwell Publishing Ltd, 2004.

KONGSHAUG, G. **IFA Technical Conference**. In Energy Consumption and greenhouse gas emission in fertilizer production, 1998.

LATARE, A. M.; KUMAR, O.; SINGH, S. K.; GUPTA, A. Direct and residual effect of sewage sludge on yield, heavy metals content and soil fertility under rice – wheat system. **Ecological Engineering**, v. 69, p. 17–24, 2014.

MAYER, F. D.; BRONDANI, M.; HOFFMANN, R.; FERIS, L. A.; MARCILIO, N. R.; BALDO, V. Small-scale production of hydrous ethanol fuel: Economic and environmental assessment. **Biomass and Bioenergy**, v. 93, p. 168-179, 2016.

MENDES, N. C.; BUENO, C.; OMETTO, A.R. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. **Production**, v. 26, n. 1, 2016.

MORALES, M.; QUINTERO, J.; CONEJEROS, R.; AROCA, G. Life cycle assessment of lignocellulosic bioethanol: Environmental impacts and energy balance. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 1349-1361, 2015.

NEVES, T. I.; UYEDA, C. A.; CARVALHO, M.; ABRAHÃO, R. Environmental evaluation of the life cycle of elephant grass fertilization - *Cenchrus purpureus* (Schumach.) Morrone using chemical fertilization and biosolids. **Environmental monitoring and assessment**, v. 190, p. 30, 2018.

OJEDA, G.; ALCANIZ J. M.; LE BISSONNAIS, Y. Differences in aggregate stability due to various sewage sludge treatments on a Mediterranean calcareous soil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 125, p. 48-56, 2008.

OU, X.; ZHANG, X.; CHANG, S.; GUO, Q. Energy consumption and GHG emissions of six biofuel pathways by LCA in (the) People's Republic of China. **Applied Energy**, v. 86, p. S197-S208, 2009.

PAGE, A. L.; LOGAN, T. J.; RYAN, J. A. **Land application of sludge: food chain implications**. Chelsea: Lewis Publishers, 1987.

PRÉ-CONSULTANTS. **The Eco-indicator 99**: A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, Netherlands, 2000. Disponível em: <[https://www.pre-sustainability.com/download/EI99\\_Manual.pdf](https://www.pre-sustainability.com/download/EI99_Manual.pdf)>. Access in: 8 fev. 2019.

PRÉ-CONSULTANTS. **Website SimaPro**. 2018. Disponível em: <<https://simapro.com/>>. Access in: 8 fev. 2019.

RIGBY, H.; CLARKE, B. O.; PRITCHARD, D. L.; MEEHAN, B.; BESHAK, F.; SMITH, S. R.; PORTER, N. A. A critical review of nitrogen mineralization in biosolids-amended soil, the associated fertilizer value for crop production and potential for emissions to the environment. **Science of The Total Environment**, v. 541, p. 1310-1338, 2016.

SAVCI, S. Investigation of Effect of Chemical Fertilizers on Environment. **APCBEE Procedia**, v. 1, p. 287-292, 2012.

SILVA, F. C.; BOARETTO, A. E.; BERTON, R. S.; ZOTELLI, H. B.; PEXE, C. A.; MENDONÇA, E. Cana-de-açúcar cultivada em solo adubado com lodo de esgoto: nutrientes, metais pesados e produtividade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, n. 1, p. 1-8, 1998.

SILVA, D. A. L.; DELAI, I.; MONTES, M. L. D.; OMETTO, A. R. Life cycle assessment of the sugarcane bagasse electricity generation in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 32, p. 532-547, 2014.

SILVA-LEAL, J. A.; MADRIÑAN-MOLINA, R.; TORRES-LOZADA, P. Influence of the application of biosolids on the content of humic and fulvic acids in soil cultivated with sugar cane. **Livestock Research for Rural Development**, v. 28, n. 5, p. 1-10, 2016.

SINGH, A.; LAL, U. R.; MUKHTAR, H. M.; SINGH, P. S.; SHAH, G.; DHAWAN, R. K. Phytochemical profile of sugarcane and its potential health aspects. **Pharmacogn Rev**, v. 9, n. 17, p. 45–54, 2015.

SHARMA, B.; SARKAR, A.; SINGH, P.; SINGH, R. P. Agricultural utilization of biosolids: A review on potential effects on soil and plant grown. **Waste Management**, v. 64, p. 117-132, 2017.

TSADILAS, C.; MITSIOS, I.; GOLIA, E. Influence of biosolids application on some soil physical properties. **Soil Science Plant Analysis**, v. 36, n. 4, p. 709-716, 2011.

YOSHIDA, H.; NIELSEN, M. P.; SCHEUTZ, C.; JENSEN, L. S.; CHRISTENSEN, T. H.; NIELSEN, S.; BRUUN, S. Effects of sewage sludge stabilization on fertilizer value and greenhouse gas emissions after soil application. **Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science**, v. 65, n. 6, p. 506-516, 2015.

## CAPÍTULO 6

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

Essa dissertação apresentou os resultados de uma série de análises envolvendo aspectos econômicos, ambientais, regionais e energéticos a respeito da influência do clima na cultura canavieira do Estado da Paraíba. Sabe-se que o Brasil é o maior produtor da cana-de-açúcar, o primeiro do mundo também na produção e exportação de açúcar e o segundo maior produtor e exportador de etanol, contribuindo consideravelmente no PIB brasileiro e na economia dos Estados produtores, como a Paraíba.

Devido à dependência climática que o setor sucroalcooleiro possui na produtividade e no desenvolvimento da cana-de-açúcar, supõe-se que as mudanças climáticas causem consequências na produção de cana-de-açúcar no mundo, principalmente nos países em desenvolvimento, como o Brasil, devido à capacidade adaptativa relativamente baixa, alta vulnerabilidade a riscos naturais e sistemas de previsão e estratégias de mitigação deficientes. O grau de impacto das mudanças do clima na cana-de-açúcar está associado à localização geográfica e a capacidade adaptativa.

Nesse trabalho de dissertação foram testadas diferentes metodologias com o objetivo de conhecer quantitativamente a influência das condições climáticas e suas tendências sobre a cultura da cana-de-açúcar, no Estado da Paraíba. Fatores como precipitação, temperatura, umidade relativa do ar e concentração de dióxido de carbono atmosférico (CO<sub>2</sub>) interferem na produtividade e nas fases de crescimento da cultura canavieira.

As análises de tendências indicaram tendência de crescimento para a temperatura do ar na maioria das estações analisadas e de decréscimo para a umidade relativa do ar. Desse modo, essas tendências poderão resultar em diversos impactos negativos no cultivo da cana-de-açúcar, sendo imprescindível entendê-las para a elaboração de políticas de mitigação e adaptação climática adequadas, que são indispensáveis no Estado da Paraíba.

A modelagem econométrica evidenciou a ocorrência de impactos das variáveis climáticas na produção de cana-de-açúcar nos municípios paraibanos, sendo a precipitação uma condicionante positivamente correlacionada e a temperatura influenciando negativamente. Percebeu-se uma resposta heterogênea dos impactos para as mesorregiões, com os municípios pertencentes à Mata Paraibana possuindo maior probabilidade de produção de cana-de-açúcar em relação às outras mesorregiões.

Ao analisar as culturas agrícolas da Paraíba, o modelo shift-share apontou uma expansão heterogênea, sendo os ganhos de produtividade explicados pelo efeito área e o efeito localização geográfica, uma vez que o efeito rendimento evidenciou o baixo dinamismo agrícola da Paraíba. Os resultados mostraram que os efeitos escala e substituição das culturas da cana-de-açúcar e do abacaxi foram os que mais absorveram áreas, enquanto que o feijão foi o que mais cedeu áreas para as demais culturas.

O teste de regressão linear múltipla mostrou que a área plantada de cana-de-açúcar apresentou correlação positiva, significativa e crescente com os gases de efeito estufa ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{N}_2\text{O}$ ) com  $R^2$  de 100%. Esse resultado evidenciou que o Estado da Paraíba necessita de políticas públicas que fomentem a diminuição ou substituição da colheita manual queimada e da aplicação de fertilização comercial, além do uso de atividades de manejo dos sistemas agrícolas para sequestro de carbono no solo.

Com a aplicação da avaliação do ciclo de vida na utilização de biossólido industrial e de fertilização química comercial na produção canavieira, observou-se que a utilização do biossólido como fertilizante para a cana-de-açúcar se mostrou mais viável ambientalmente e economicamente, com maior produtividade e menor emissão de gases de efeito estufa, contribuindo, assim, na redução da pegada de carbono e solucionando o problema da destinação final desse resíduo. Constatou-se, ainda, que para o biossólido o processo de calcinação e o transporte são os principais processos impactantes.

Esse trabalho colaborou com uma visão das condições climáticas e da cana-de-açúcar na Paraíba, contribuindo para o entendimento dessas variáveis para o planejamento econômico e ambiental no Estado, com a finalidade de diminuir as perdas de produção e os impactos ambientais negativos. A partir dos resultados destacou-se que a cana-de-açúcar tem uma forte relação com a economia do Estado, tendo o clima como fator preponderante para o aumento ou diminuição da produção canavieira.

## REFERÊNCIAS DE TODA A DISSERTAÇÃO

ABRAHÃO, R.; CARVALHO, M.; CAUSAPÉ, J. Carbon and water footprints of irrigated corn and non-irrigated wheat in Northeast Spain. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, p. 5647-5653, 2017.

AESA – Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. **Resumo Estendido**. João Pessoa, 2016. Disponível em: <<http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/documentos/plano-estadual/resumo-estendido/>>. Acesso em: 8 fev. 2019.

AGRI-FOOTPRINT. **Database**, 2017. Disponível em: <<http://www.agri-footprint.com/>>. Access in: 8 fev. 2019.

ALMEIDA, E. S. Função de Produção Agropecuária Espacial. In: Congresso Brasileiro de Economia e Sociologia Rural, 2005, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: USP, CD-ROM, 2005.

ALVES, A.; RIBEIRO, E.; TOM, L. **Modifications in land use for agriculture in Brazil: an analysis of microregions in 1990 and 2016**. Conference, July 28-August 2, 2018, Vancouver, British Columbia. International Association of Agricultural Economists (IAAE), 2018.

ALVES, L. M.; MARENGO, J. Assessment of regional seasonal predictability using the PRECIS regional climate modeling system over South America. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 100, n. 3-4, p. 337-350, 2010.

AMORIM, A. L. **Função de produção agregada e crescimento econômico de longo prazo dos Estados brasileiros no período de 1980-2002**: Uma análise empírica com dados em painel. 95 f. Dissertação (Mestrado em Economia). Universidade Federal de Viçosa, 2008.

ANDREA, M. O.; MERLET, P.: Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 15, p. 955-966, 2001.

ARIAS, D.; CABALLERO, J. **Paraíba State, Brazil: Agricultural Sector Risk Assessment**. Washington: The World Bank, 2015.

ASPLAN - Associação dos Plantadores de Cana da Paraíba. **Jornal do Plantador**, Ano 10, n. 66, nov./dez. 2014.

ASSMANN, E. **The principles of forest yield study**: Studies in the organic production, structure, increment and yield of forest stands. Oxford: Pergamon Press, 1970.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Gestão Ambiental –Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e estrutura: NBR ISO 14040, Rio de Janeiro: ABNT, 2009 – versão corrigida 2014a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Gestão ambiental -Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações: NBR ISO 14044, Rio de Janeiro: ABNT, 2009 – versão corrigida 2014b.

AUFFHAMMER, M.; HSIANG, S. M.; SCHLENKER, W.; SOBEL A. Using weather data and climate model output in economic analyses of climate change. **Review of Environmental Economics and Policy**, v. 7, n. 2, p. 181-198, 2013.

AYOADE, J. O. **Introdução a climatologia para os trópicos**. 13. ed. Rio de Janeiro: Editora Bertrand Brasil. 2010.

AZAR, C.; LARSON, E. C. Bioenergy and land-use competition in Northeast Brazil. **Energy for sustainable development**, v. 4, n. 3, p. 64-71, 2000.

BACCHI, M. R. P.; CALDARELLI, C. E. Impactos socioeconômicos da expansão do setor sucroenergético no Estado de São Paulo, entre 2005 e 2009. **Nova Economia**, v. 25, n. 1, p. 209-224, 2015.

BALTAGI, B. B. **Econometric analysis of panel data**. 3. ed. New Delhi, Índia: John Wiley & Sons, 2005.

BAUMANN, H.; TILLMAN, A. M. **The hitch hiker's guide to ACV. An orientation in life cycle assessment methodology and application**. Lund: Studentlitteratur AB, 2004.

BENTO, C. B.; FILOSO, S.; PITOMBO, L. M.; CANTARELLA, H.; ROSSETTO, R.; MARTINELLI, L. A.; CARMO, J. B. Impacts of sugarcane agriculture expansion over low-intensity cattle ranch pasture in Brazil on greenhouse gases. **Journal of Environmental Management**, v. 206, p. 980-988, 2018.

BERTONCINI, E. I.; D'ORAZIO, V.; SENESI, N.; MATTIAZZO, M. E. Effects of sewage sludge amendment on the properties of two Brazilian oxisols and their humic acids. **Bioresource Technology**, v. 99, p. 4972-4979, 2008.

BIERMANN, F.; ABBOTT, K.; ANDRESEN, S.; BÄCKSTRAND, K.; BERNSTEIN, S.; BETSILL, M. M.; BULKELEY, H.; CASHORE, B.; CLAPP, J.; FOLKE, C.; GUPTA, A.; GUPTA, J.; HAAS, P. M.; JORDAN, A.; KANIE, N.; KLUVÁNKOVÁ-ORAVSKÁ, T.; LEBEL, L.; LIVERMAN, D.; MEADOWCROFT, J.; MITCHELL, R. B.; NEWELL, P.; OBERTHÜR, S.; OLSSON, L.; PATTBERG, P.; SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, R.; SCHROEDER, H.; UNDERDAL, A.; CAMARGO, S. V.; VOGEL, C.; YOUNG, R. O.; BROCK, A.; ZONDERVAN, R. Navigating the anthropocene: improving earth system governance. **Science**, v. 335, n. 6074, p. 1306-1307, 2012.

BLANCO, M.; RAMOS, F.; DOORSLAER, B. V.; MARTÍNEZ, P.; FUMAGALLI, D.; CEGLAR, A.; FERNÁNDEZ, F. J. Climate change impacts on EU agriculture: A regionalized perspective taking into account market-driven adjustments. **Agricultural Systems**, v. 156, p. 52-66, 2017.

BODUNRIN, M. O.; BURMAN, N. W.; CROFT, J.; ENGELBRECHT, S.; GOGA, T.; LADENIKA, A. O.; MACGREGOR, O. S.; MAEPA, M.; HARDING, K. G. The availability of life-cycle assessment, water footprinting, and carbon footprinting studies in Brazil. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 23, p. 1701-1707, 2018.

BORDONAL, R. O.; CARVALHO, J. L. N.; LAL, R.; FIGUEIREDO, E. B.; OLIVEIRA, B. G.; LA SCALA, N. Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 38, n. 2, p. 1-23, 2018.

BÖRJESSON, P. Good or bad bioethanol from a greenhouse gas perspective – what determines this?. **Applied Energy**, v. 86, p. 589–594, 2009.

BRASIL. Lei nº 13.576, de 26 de dezembro de 2017. **Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências**. Brasília, 2017.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia - MCT. **3ª Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**: volume 3. Brasília, DF, 2016. 336 p. Disponível em: <<http://sirene.mcti.gov.br/documents/1686653/17067d39/Volume+3.pdf/355d4a1e-9f3c-474a-982eb4a63312813b>>. Acesso em: 8 fev. 2019.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Resolução nº 375**, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Disponível em: <[www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf](http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf)>. Acesso em: 8 fev. 2019.

BURNEY, J. A.; DAVIS, S. J.; LOBELL, D. B. Greenhouse gas mitigation by agricultural intensification. **PNAS**, v. 107, p. 12052-12057, 2010.

CALDARELLI, C. E.; GILIO, L. Expansion of the sugarcane industry and its effects on land use in São Paulo: Analysis from 2000 through 2015. **Land Use Policy**, v. 76, p. 264-274.

CAMERON, A. C.; TRIVEDI, P. K. **Microeconometrics using Stata**. College Station: Stata Press, 2009.

CANÇADO, J. E. D.; SALDIVA, P. H. N.; PEREIRA, L. A. A.; LARA, L. B. L. S.; ARTAXO, P.; MARTINELLI, L. A.; ARBEX, M. A.; ZANOBETTI, A.; BRAGA, A. L. F.: The Impact of Sugar Cane–Burning Emissions on the Respiratory System of Children and the Elderly. **Environmental Health Perspectives**, v. 5, n. 114, p. 725–729, 2006.

CARDOSO, N. P.; SENTELHAS, P. C. Efeitos climáticos na maturação da cana-de-açúcar sob a influência das cultivares e da idade da cultura. **Scientia Agricola**, v. 70, n. 6, 2013.

CARR, M. K. V; KNOX, J. W. The water relations and irrigation requirements of sugarcane (*Saccharum officinarum*): A review. **Experimental Agriculture**, v. 47, n. 1, p. 1-25, 2011.

CARVALHO, A. L.; MENEZES, R. S. C.; NÓBREGA, R. S.; PINTO, A. S. OMETTO, J. P. H. B.; RANDOW, C. V.; GIAROLLA, A. Impact of climate changes on potential sugarcane yield in Pernambuco, northeastern region of Brazil. **Renewable Energy**, v. 78, p. 26-34, 2015.

CARVALHO, J. L. N.; CERRI, C. E. P.; FEIGL, B. J.; PICOLLO, M. C.; GODINHO, V. P.; CERRI, C. C. Carbon sequestration in agricultural soils in the Cerrado region of the Brazilian Amazon. **Soil and Tillage Research**, v. 103, p. 342-349, 2009.

CARVALHO, M. **Thermoeconomic and environmental analyses for the synthesis of polygeneration systems in the residential-commercial sector**. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Zaragoza. Zaragoza, Espanha: UniZar, 2011.

CARVALHO, M.; DELGADO, D. Potential of photovoltaic solar energy to reduce the carbon footprint of the Brazilian electricity matrix. **LALCA - Revista Latino Americana em Avaliação do Ciclo de Vida**, v. 1, n. 1, p. 64-85, 2017.

CARVALHO, M.; GRILO, M. M. S.; ABRAHAO, R. Comparison of greenhouse gas emissions relative to two frying processes for homemade potato chips. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, p. -, 2017.

CARVALHO, M.; SERRA, L. M.; LOZANO, M. A. Optimal synthesis of trigeneration systems subject to environmental constraints. **Energy**, v. 36, n. 6, p. 3779-3790, 2011.

CASTRO, P. R. C. Maturadores químicos em cana-de-açúcar. In: Semana da cana-de-açúcar de Piracicaba, 4., 1999, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: Saccharum, v. 1, 1999. p. 12-16.

CEPAL - Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe. **Istmo Centroamericano: Efectos del cambio climático sobre la agricultura**. México: Cepal, 2010.

CESAR, M. A. A.; DELGADO, A. A.; CAMARGO, A. P.; BISSOLI, B. M. A.; SILVA, F. C. Capacidade de fosfatos naturais e artificiais em elevar o teor de fósforo no caldo de cana-de-açúcar (cana-planta), visando o processo industrial. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v. 6, p. 32-38, 1987.

CHANG, A. C.; HYUN, H.; PAGE, A. L. Cadmium uptake for swiss chard grown on composted sludge treated fields plots: Plateau or time bomb?. **Journal of Environmental Quality**, v. 26, n. 1, p. 11-19, 1997.

CHEN, X.; GUANGCUN, C.; CHEN, L.; CHEN, Y.; LEHMANN, J.; MCBRIDE, M. B.; HAY, A. G. 2011. Adsorption of copper and zinc by biochars produced from pyrolysis of hardwood and corn straw in aqueous solution. **Bioresource Technol**, v. 102, n. 19, p. 8877–8884, 2011.

CHIBA, M. K. **Uso de lodo de esgoto em cana-de-açúcar como fonte de nitrogênio e fósforo**: parâmetros de fertilidade do solo, nutrição da planta e rendimentos da cultura. 2005. 142 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura, Piracicaba, 2005.

CNA - Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil. **Boletins**, 2017. Disponível em: <<http://www.cnabrazil.org.br/central-comunicacao/boletins>>. Acesso em: 8 fev. 2019.

COHEN, Jacob. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. Hillsdale: Erlbaum, 1988.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira da cana**, v. 3 - Safra 2016/17, n. 4 - Quarto levantamento, Brasília, p. 1-77, abril 2017.

CONCEIÇÃO, J. C. P.; CONCEIÇÃO, P. H. Z. **Agricultura**: evolução e importância para a balança comercial brasileira. Texto para discussão / Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada.- Brasília: Ipea, 2014.

COSTANZA, R.; GRAUMLICH, L.; STEFFEN, W.; CRUMLEY, C.; DEARING, J.; HIBBARD, K.; LEEMANS, R.; REDMAN, C.; SCHIMEL, D. Sustainability or collapse: what can we learn from integrating the history of humans and the rest of nature?. **Ambio**, v. 36, n. 7, p. 522-527, 2007.

CRU - University of East Anglia Climatic Research Unit. Climatic Research Unit, University of East Anglia. **Data**. Norwich: UEA, 2018. Available in: <<http://www.cru.uea.ac.uk/>>. Access in: 8 fev. 2019.

CUNHA, D. A.; COELHO, A. B.; FÉRES, J. G. Irrigation as an adaptive strategy to climate change: an economic perspective on Brazilian agriculture. **Environment and Development Economics**, v. 20, p. 57-79, 2015.

DARWICHE, T. J. **A Matriz Energética Brasileira**: Evolução da Estrutura de Oferta e Demanda. 2010. Monografia (Graduação em Economia). Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Economia. Campinas, 2010.

DAVIS, J.; HAGLUND, C. **Life cycle inventory (LCI) of fertiliser production**. Fertiliser products used in Sweden and Western Europe. In: SIK Report No. 654. Go'teborg (Sweden): SIK, The Swedish Institute for Food and Biotechnology, 1999.

DAYANA, M. L. The population dynamics of insects in sugarcane field at Aundipatti, Theni district, Tamil Nadu. **Journal of the International Association of Advanced Technology and Science**, v. 16, n. 2, p. 1-24, 2015.

DEFANTE, L. R.; VILPOUX, O. F.; SAUER, L. Rapid expansion of sugarcane crop for biofuels and influence on food production in the first producing region of Brazil. **Food Policy**, v. 79, p. 121-131.

DESCHÊNES, O.; GREENSTONE, M. The economic impacts of climate change: evidence from agricultural output and random fluctuations in weather. **The American Economic Review**, v. 97, n. 1, p. 354-385, 2007.

DIOLA, V.; SANTOS, F. A. Fisiologia. In: Santos, F.; Borém, A.; Caldas, C. (Ed.). **Canade-Açúcar: Bioenergia, Açúcar e Álcool**: Tecnologias e Perspectivas. Viçosa: UFV, 2010. p. 487-517.

DOMINGUES, E. P.; MAGALHÃES, A. S.; RUIZ, R. M. **Cenários de Mudanças Climáticas e Agricultura no Brasil: impactos econômicos na Região Nordeste**. Revista Econômica do Nordeste, v. 42, p. 229-246, 2011.

DOOREMBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979.

DOSSOU-YOVO, E. R.; BRÜGGEMANN, N.; JESSED, N.; HUATE, J.; AGO, E. E.; AGBOSSOUB, E. K. Reducing soil CO<sub>2</sub> emission and improving upland rice yield with no-tillage, straw mulch and nitrogen fertilization in northern Benin. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 156, p. 44–53, 2016.

ECOINVENT. **Database**, version 3.4, 2017. Disponível em: <<http://www.ecoinvent.org/>>. Access in: 8 fev. 2019.

EGGLESTON, G.; LEGENDRE, B.; RICHARD, C. Effect of harvest method and storage time on sugarcane deterioration I: cane quality changes. **International Sugar Journal**, v.103, n.1232, p. 331-338, 2001.

EICKER, M. O.; HISCHIER, R.; KULAY, L. A.; LEHMANN, M.; ZAH, R.; HURNI, H. The applicability of non-local LCI data for LCA. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 30, p. 192-199, 2010.

FAGERIA, N. K.; MORAIS, O. P.; SANTOS, A. B. Nitrogen use efficiency in upland rice genotypes. **Journal of Plant Nutrition**, v. 33, p. 1696-1711, 2010.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Agriculture, Forestry and Other Land Use Emissions by Sources and Removals by Sinks**. FAO, 2014. Disponível em: <<http://www.fao.org/>>. Access in: 8 fev. 2019.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Climate change and food systems: global assessments and implications for food security and trade**. Food Agriculture Organization of the United Nations, 2015.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Food for the cities**. FAO, 2011. Disponível em: <<http://www.fao.org/>>. Access in: 8 fev. 2019.

FARGIONE, J.; HILL, J.; TILMAN, D.; POLASKY, S. HAWTHORNE, P. Land clearing and the biofuel carbon debt. **Science**, v. 319, n. 5867, p. 1235-1238, 2008.

FÉRES, J.; REIS E.; SPERANZA, J. Mudanças climáticas globais e seus impactos sobre os padrões de uso do solo no Brasil. In: XXXVII Encontro Nacional de Economia, 2009, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: UNILA, 2009.

FIGUEIREDO, I. C.; MACIEL, B. F.; MARQUES, M. O. A qualidade da cana-de-açúcar como matéria-prima para produção de álcool. **Nucleus**, p. 82-92, 2008. Edição especial.

FINNVEDEN, G.; HAUSCHILD, M. Z.; EKVALL, T.; GUINÉE, J.; HEIJUNGS, R.; HELLWEG, S.; KOEHLER, A.; PENNINGTON, D.; SUH, S. Recent developments in life cycle assessment. **Journal of environmental management**, v. 91, n. 1, p. 1-21, 2009.

FLEISCHER, A.; LICHTMAN, I.; MENDELSON, R. **Climate Change, Irrigation, and Israeli Agriculture: Will Warming be Harmful?**. Policy Research Working Paper, n. 4135, Washington: Banco Mundial, 2007.

FLORINDO, T.J.; MEDEROS, G.I.B.; RUIVARO, C.F.; COSTA, J.S. Avaliação do impacto do ciclo de vida: uma discussão metodológica. **Natureza on line**, v. 13, n. 5, p. 211-219, 2015.

FRANCISCO, P. R. M.; SANTOS, D.; LIMA, E. R. V.; MORAES NETO, J. M.; TRINDADE, H. C. M. Mapping of pedological potencial of soils for cultivation of sugar cane in Paraíba state using geotechnologies. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 7, n. 5, p. 306-314, 2017.

FRANCO, A.; ABREU-JUNIOR, C.H.; PERECIN, D.; OLIVEIRA, F. C.; GRANJA, A. C. R.; BRAGA, V. S. Sewage sludges as nitrogen and phosphorus source for cane-plant and first ratoon crops. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 2, p. 553-561, 2010.

FRANCO, A.; MARQUES, M. O.; MELO, W. J. Sugarcane grown in an oxisol amended with sewage sludge and vinasse: nitrogen contents in soil and plant. **Scientia Agricola**, v. 65, n. 4, p. 408-414, 2008.

FRISCH, R. Editor's Note. **Econometrica**, v. 1, n. 1, p. 1-4, 1993.

GASCHO, G. J.; SHIH, S. F. Sugarcane. In: TEARE, I. D.; PEET, M. M. **Cropwater relations**. New York: Wiley-Interscience, 1983. p. 445-479.

GIDDENS, A. **The politics of climate change**. Cambridge: Polity Press, 2009.

GILBERT, R.A.; SHINE JUNIOR, J.M.; MILLER, J.D.; RICE, R.W.; RAINBOLT, C.R. The effect of genotype, environment and time of harvest on sugarcane yields in Florida, USA. **Field Crops Research**, [S.l.], v. 95, p. 156-170, 2006.

GOEDKOOP, M. J. **The Eco-indicator 99**. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment Methodology Report. Amsterdam: Pre Consultants, 1999.

GOLDEMBERG, J. Ethanol for a sustainable energy future. **Science**, v. 315, p. 808-810, 2007.

GOMES, A. P.; BAPTISTA, A. J. M. S. Função de Produção de Fronteira e Tomada de Decisão na Agropecuária. In: Congresso Brasileiro de Economia e Sociologia Rural, 42, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: UFMT, CD-ROM, 2004.

GOMI, K.; SHIMADA, K.; MATSUOKA, Y. A low-carbon scenario creation method for a local-scale economy and its application in Kyoto city. **Energy Policy**, v. 38, n. 9, p. 4783-4796, 2010.

GOOSSENS, C.; BERGER, A. Annual and seasonal climatic variations over the northern hemisphere and Europe during the last century. In *Annales geophysicae*. Series B. **Terrestrial and planetary physics**, v. 4, n. 4, p. 385-399, 1986.

GORNALL, J.; BETTS, R.; BURKE, E.; CLARK, R.; CAMP, J.; WILLETT, K.; WILTSHIRE, A. Implications of climate change for agricultural productivity in the early twenty-first century. **Philosophical transactions of the royal society B**, v. 365, n. 1554, p.

2973-2989, 2010.

GREENE, W. H. **Econometric Analysis**. 7. ed. New York: Person, 2012.

GUARENGHI, M. M.; WALTER, A. Assessing potential impacts of sugarcane production on water resources: A case study in Brazil. **Wiley online library**, v. 10, n. 6, p. 699-709, 2016.

GUINÉE, J. **Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002.

GUINÉE, J. **Life Cycle Assessment: An Operational Guide to the ISO Standards**. LCA in Perspective; Guide; Operational Annex to Guide. The Netherlands: Centre for Environmental Science, Leiden University, 2001.

GUJARATI, D.; PORTER, D. C. **Basic Econometrics**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2008.

GUNARATHNA, M. H. J. P.; SAKAI, K.; NAKANDAKARI, T.; MOMII, K.; ONODERA, T.; KANESHIRO, H.; UEHARA, H.; WAKASUGI, K. Optimized Subsurface Irrigation System: The Future of Sugarcane Irrigation. **Water**, v. 10, n. 3, p. 1-14, 2018.

HAIR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. **Multivariate data analysis**. New Jersey: Prentice-Hall, 2005.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Estimation of potential evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Division ASCE**, v. 108, n. 3, p. 225- 230, 1982.

HAUSCHILD, M. Z. Assessing Environmental Impacts in a Life Cycle Perspective. **Environmental Science and Technology**, v. 39, n. 4, p. 81-88, 2005.

HAUSMAN, J. A. Specification tests in econometrics. **Econometrica**, v. 46, n. 6, p. 1251-1272, 1978.

HENRY, R. J. Basic Information on the sugarcane plant. In: HENRY, R.; KOLE, C. (Ed.). **Genetics, genomics and breeding of sugarcane**. New York: CRC Press, 2010.

HILL, R. C.; GRIFFITHS, W. E.; JUDGE, G. G. **Undergraduate econometrics**. New York: John Wiley & Sons, 1997.

HOFSETZ, K.; SILVA, M. Aparecida. Brazilian sugarcane bagasse: Energy and non-energy consumption. **Biomass Bioenergy**, v. 46, p. 564-573, 2012.

HSIAO, C. **Analysis of panel data**. 3. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.

IBGE - Brazilian Institute of Geography and Statistics. Directorate of Research, Coordination of Work and Income, National Survey by Household Sample Continuous 2016. **Synthesis of Paraíba** (Síntese Paraíba). 2018. Available in: <[www.ibge.gov.br/estadosat/perfil.php?sigla=pb](http://www.ibge.gov.br/estadosat/perfil.php?sigla=pb)>. Access in: 8 fev. 2019.

IBGE - Brazilian Institute of Geography and Statistics. **Municipal Agricultural Production 2015** (Produção Agrícola Municipal 2015). Rio de Janeiro: IBGE, 2016. Available in: <[www.ibge.gov.br/estadosat/temas.php?sigla=pb&tema=lavouratemporaria2015](http://www.ibge.gov.br/estadosat/temas.php?sigla=pb&tema=lavouratemporaria2015)>. Access in: 8 fev. 2019.

IBGE - Brazilian Institute of Geography and Statistics. **Municipal Agricultural Production 2017** (Produção Agrícola Municipal 2017). Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Available in: <<https://sidra.ibge.gov.br>>. Access in: 8 fev. 2019.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Agropecuário**. Rio de Janeiro: IBGE, 2018. Disponível em: <[www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br)>. Acesso em: 8 fev. 2019.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Disponível em: <[cidades.ibge.gov.br](http://cidades.ibge.gov.br)>. Acesso em: 8 fev. 2019.

IGREJA, A. C. M. **Evolução da pecuária bovina no Estado de São Paulo no período 1969-84**. 1987. 197 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1987.

INMAN-BAMBER, N. G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, v. 89, p. 107-122, 2004.

INMAN-BAMBER, N. G.; BONNETT, G. D.; SPILLMAN, M. F.; HEWITT, M. L.; JACKSON, J. Increasing sucrose accumulation in sugarcane by manipulating leaf extension and photosynthesis with irrigation. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 59, p. 13-26, 2008.

INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, v. 92, n. 2-3, p. 185-202, 2005.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Banco de dados meteorológicos para o ensino e pesquisa**. 2018. Disponível em: <[www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep](http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep)>. Acesso em: 8 fev. 2019.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, p. 151, 2014.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. **Revised supplementary methods and good practice guidance arising from the Kyoto protocol**, 2013. Disponível em <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/kpsg/>>. Access in: 8 fev. 2019.

IPEA - Institute for Applied Economic Research. **Ipeadata Regional**. 2015. Available in: <<http://www.ipeadata.gov.br/Default.aspx>>. Access in: 8 fev. 2019.

ISO 14040 - International Organization for Standardization. Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. Geneva, 2006.

ISO 14044 - International Organization for Standardization. Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines, Geneva, 2006.

JACOBS, L.; MCCREARY W. D. S. **Utilizing Biosolids On Agricultural Land**. Department of Crop and Soil Sciences. Michigan State University. Extension Bulletin, 2001.

JAMALI, M. K.; KAZI, T. G.; ARAIN, M. B.; AFRIDI, H. I.; MEMON, A. R.; JALBANI, N.; SHAH, A. Use of Sewage Sludge After Liming as Fertilizer for Maize Growth. **Pedosphere**, v. 18, n. 2, p. 203-213, 2008.

JAMES, G. **Sugarcane**. 2 ed. London: Blackwell Publishing Ltd, 2004.

JAMES, G. The chemical ripening of sugarcane. **International Sugar Journal**, v.101, n.1211, p.560-562, 1999.

JOHNSON, J. M. F.; KARLEN, D. L.; ANDREWS, S. S. Conservation considerations for sustainable bioenergy feedstock production: If, what, where, and how much. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 65, n. 4, p. 88A-91A, 2010.

JONES, P. D.; MANN, M. E. Climate over past millennia. **Reviews of Geophysics**, v. 42, n. 2, 2004.

JUHOLA, S.; KLEIN, N.; KAYHKO, J.; NESET, T. S. S. Climate change transformations in Nordic agriculture?. **Journal of Rural Studies**, v. 51, p. 28-36, 2017.

KEITH, T. Z. **Multiple Regression and Beyond: An Introduction to Multiple Regression and Structural Equation Modeling**. 3 ed. Abingdon: Routledge, 2019.

KENDALL, M. G. **Rank Correlation Methods**. London: Charles Griffin, 1975.

KONGSHAUG, G. **IFA Technical Conference**. In Energy Consumption and greenhouse gas emission in fertilizer production, 1998.

KULIKOWSKA, D.; GUSIATIN, Z. M. Sewage sludge composting in a two-stage system: Carbon and nitrogen transformations and potential ecological risk assessment. **Waste Management**, v. 38, n. 1, p. 312-320, 2015.

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, v. 123, p. 1-22, 2004.

LATARE, A. M.; KUMAR, O.; SINGH, S. K.; GUPTA, A. Direct and residual effect of sewage sludge on yield, heavy metals content and soil fertility under rice – wheat system. **Ecological Engineering**, v. 69, p. 17–24, 2014.

MACEDO I. C.; SEABRA J. E. A.; SILVA, J. E. A. R. Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: the 2005/2006 averages and a prediction for 2020. **Biomass and Bioenergy**, v. 9, p. 582–595, 2008.

MANHÃES, C. M. C.; GARCIA, R. F.; FRANCELINO, F. M. A.; FRANCELINO, H. O.; COELHO, F. C. Factors that affect sprouting and tillering of sugar cane. **Vértices**, v. 17, p. 163-181, 2015.

MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. *Econometric*. **The econometric society**, v. 13, p. 245-259, 1945.

MANNING, W. J.; TIEDEMANN, A. V. Climate change: potential effects of increased atmospheric carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), ozone (O<sub>3</sub>), and Ultraviolet-B (UV-B) radiation on plant diseases. **Environmental Pollution**, v. 88, n. 2, p. 219-245, 1995.

MANOCHIO, C.; ANDRADE, B. R.; RODRIGUEZ, R. P.; MORAES, B. S. Ethanol from biomass: A comparative overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 743-755, 2017.

MAPA - Ministry of Agriculture, Livestock and Supply. **Sector Plan for Mitigation and Adaptation to Climate Change for the consolidation of an economy in Low Carbon Agriculture** (Plano Estadual de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura). São Paulo: Ministry of Agriculture, Livestock and Supply (MAPA); Secretariat of Agriculture and Supply, 2016.

MARENGO, J. A. Mudanças climáticas globais e regionais: avaliação do clima atual do Brasil e projeções de cenários climáticos do futuro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 16, p. 1-18, 2001.

MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. **Theor Appl Climatol**, v. 129, n. 3-4, p. 1189-1200, 2016.

MARENGO, J. A.; VALVERDE, M. C. Caracterização do clima no Século XX e Cenário de Mudanças de clima para o Brasil no Século XXI usando os modelos do IPCC-AR4. **Revista Multiciência**, v. 8, p. 5-27, 2007.

MARGULIS, S.; DUBEUX, C. B. S. **Economia da Mudança do Clima no Brasil: Custos e Oportunidades** / coordenação geral Jacques Marcovitch. – São Paulo: IBEP Gráfica, 2010.

MARIN, F. R.; JONES, J. W.; ROYCE, F.; PELLEGRINO, G. Q.; ASSAD, E.D.; Barbosa, F.J. Climate change impacts on sugarcane attainable yield in Southern Brazil. **Climatic Change**, v. 1, p. 101-110, 2012.

MARIN, F. R.; JONES, J. W.; ROYCE, F.; SUGUITANI, C.; DONZELI, J. L.; PALLONE FILHO, W. J. P.; NASSIF, D. S. P. Parameterization and evaluation of predictions of DSSAT/CANEGRO for Brazilian sugarcane. **Agronomy Journal, Madison**, v. 103, p. 100-110, 2011.

MARTINELLI, L. A.; FILOSO, S. Expansion of sugarcane ethanol production in Brazil: environmental and social challenges. **Ecological Applications**, v. 18, n. 4, p. 885-898, 2008.

MARTINS, H. H.; SHIKIDA, P. F. A.; SESSO FILHO, U. A.; GIMENES, R. M. T.; CALVO, J. C. A. Employment generation and structural decomposition effects of the sugar and alcohol industries in Brazil. **Espacios**, v. 38, n. 11, p. 16-24, 2017.

MAYER, F. D.; BRONDANI, M.; HOFFMANN, R.; FERIS, L. A.; MARCILIO, N. R.; BALDO, V. Small-scale production of hydrous ethanol fuel: Economic and environmental assessment. **Biomass and Bioenergy**, v. 93, p. 168-179, 2016.

MENDELSON, R.; NORDHAUS, W. D.; SHAW, D. The Impact of Global Warming on Agriculture: A Ricardian Analysis. **The American Economic Review**, v. 84, n. 4, p. 753-771, 1994.

MENDES, N. C.; BUENO, C.; OMETTO, A.R. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. **Production**, v. 26, n. 1, 2016.

MO, X. G.; HU, S.; LIN, Z. H.; LIU, S. X.; XIA, J. Impacts of climate change on agricultural water resources and adaptation on the North China Plain. **Advances in Climate Change Research**, v. 8, n. 2, p. 93-98, 2017.

MONTANO, D. B.; FOFONKA, L. O uso do biossólido em atividades agrárias e recuperação de áreas degradadas. *Educação ambiental em ação*, n. 37, ano 10, p. 1-, 2011.

MORAES, M. A. F. D.; OLIVEIRA, F. C.; DIAZ-CHAVEZ, R. SocioEconomic impacts of Brazilian sugarcane industry. **Environment Development**, v. 16, p. 31-43, 2015.

MORALES, M.; QUINTERO, J.; CONEJEROS, R.; AROCA, G. Life cycle assessment of lignocellulosic bioethanol: Environmental impacts and energy balance. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 1349-1361, 2015.

MORENO-PÉREZ, O. M.; MARCOSSI, G. P. C.; ORTIZ-MIRANDA, D. Taking stock of the evolution of the biodiesel industry in Brazil: Business concentration and structural traits. **Energy Policy**, v. 110, p. 525-533, 2017.

NASS, L. L.; PEREIRA, A.; ELLIS, D. Biofuels in Brazil: an overview. **Crop science**, v. 47, n. 6, p. 2228-2237, 2007.

NELSON, G. C.; VALIN, H.; SANDS, R. D.; HAVLÍK, P.; AHAMMAD, H.; DERYNG, D.; ELLIOTT, J.; FUJIMORI, S.; HASEGAWA, T.; HEYHOE, E.; KYLE, P.; VON, L. M.; LOTZE-CAMPEN, H.; MASON, D. D.; VAN, M. H.; VAN, D. M. D.; MÜLLER, C.; POPP, A.; ROBERTSON, R.; ROBINSON, S.; SCHMID, E.; SCHMITZ, C.; TABEAU, A.; WILLENBOCKEL, D. Climate change effects on agriculture: Economic responses to biophysical shocks. **PNAS**, v. 111, n. 9, p. 3274-3279, 2014.

NETER, J.; KUTNER, M. H.; NACHTSHEIM, C. J.; WASSERMAN, W. **Applied linear statistical models**. Chicago: Irwin, 1996.

NEVES, T. I.; UYEDA, C. A.; CARVALHO, M.; ABRAHÃO, R. Environmental evaluation of the life cycle of elephant grass fertilization - *Cenchrus purpureus* (Schumach.)

Morrone-using chemical fertilization and biosolids. **Environmental monitoring and assessment**, v. 190, p. 30, 2018.

NOAA - **National Oceanic and Atmospheric Administration**. Disponível em: <<https://www.ncdc.noaa.gov/sotc/>>. Access in: 8 fev. 2019.

NOBRE, C. A.; ASSAD, E. D. O aquecimento global e o impacto na Amazônia e na agricultura brasileira. **Revista do INPE**, v. 1, p. 9-13, 2005.

OJEDA, G.; ALCANIZ J. M.; LE BISSONNAIS, Y. Differences in aggregate stability due to various sewage sludge treatments on a Mediterranean calcareous soil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 125, p. 48-56, 2008.

OLESEN, J. E.; BINDI, M. Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. **European Journal of Agronomy**, v. 16, n. 4, p. 239-262, 2002.

OLIVEIRA, F. C. **Disposição de lodo de esgoto e composto de lixo urbano num Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar**. 2000. 237 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2000.

OLIVEIRA, M. E. D.; VAUGHAN, B. E.; RYKIEL, E. J. Ethanol as fuel: energy, carbon dioxide balances, and ecological footprint. **BioScience**, v. 55, p. 593-602, 2005.

OU, X.; ZHANG, X.; CHANG, S.; GUO, Q. Energy consumption and GHG emissions of six biofuel pathways by LCA in (the) People's Republic of China. **Applied Energy**, v. 86, p. S197-S208, 2009.

OYAMA, M. D.; NOBRE, C. A. A new climate-vegetation equilibrium state for Tropical South America. **Geophysical Research Letter**, v. 30, n. 23, p. 2199, 2003.

PAGE, A. L.; LOGAN, T. J.; RYAN, J. A. **Land application of sludge: food chain implications**. Chelsea: Lewis Publishers, 1987.

PARKES, M.; YAO, W. W.; MA, X. Y.; LI, J. Simulation of point source wetting pattern of subsurface drip irrigation. **Irrigation Science**, v. 29, n. 4, p. 331-339, 2010.

PEREIRA, S. W. **Análise ambiental do processo produtivo de pisos cerâmicos: aplicação de avaliação de ciclo de vida**. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em engenharia ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004, 123 p.

PINDYCK, R. S.; RUBINFELD, D. L. **Econometric Models and Economic Forecasts**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 1998.

PINTO, E. P. P.; MOUTINHO, P.; RODRIGUES, L.; FRANÇA, F. G. O.; MOREIRA, P. F.; DIETZSCH, L. **Perguntas e respostas sobre aquecimento global**. 5. ed. Belém: IPAM, 2010.

PINTO, H. S.; ASSAD, E. D. **Aquecimento Global e a nova Geografia da Produção agrícola no Brasil**. São Paulo: Embrapa, 2008.

PINTO, H. S.; ASSAD, E. D. **Global warming and the new geography of the Brazilian agriculture production** (Aquecimento Global e a nova Geografia da Produção agrícola no Brasil). São Paulo: Embrapa, 2008.

PRADO JUNIOR, C. **Formação do Brasil Contemporâneo: colônia**. São Paulo: Companhia das letras, 2011.

PRÉ-CONSULTANTS. **The Eco-indicator 99**: A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, Netherlands, 2000. Disponível em: <[https://www.pre-sustainability.com/download/EI99\\_Manual.pdf](https://www.pre-sustainability.com/download/EI99_Manual.pdf)>. Access in: 8 fev. 2019.

PRÉ-CONSULTANTS. **Website SimaPro**. 2018. Disponível em: <<https://simapro.com/>>. Access in: 8 fev. 2019.

REICOSKY, D. C.; ARCHER, D. W. Moldboard plow tillage depth and short-term carbon dioxide release. **Soil & Tillage Research**, n. 94, p. 109–121, 2007.

RENOUF, M. A.; WEGENER, M. K.; NIELSEN, L. K. An environmental lifecycle assessment comparing Australian sugarcane with US corn and UK sugar beet as producers of sugars for fermentation. **Biomass and Bioenergy**, v. 32, p. 1144-1155, 2008.

REZENDE, M. L.; RICHARDSON, J. W. Economic feasibility of sugar and ethanol production in Brazil under alternative future prices outlook. **Agricultural Systems**, v. 138, n. 1, p. 77-87, 2015.

RIGBY, H.; CLARKE, B. O.; PRITCHARD, D. L.; MEEHAN, B.; BESHAN, F.; SMITH, S. R.; PORTER, N. A. A critical review of nitrogen mineralization in biosolids-amended soil, the associated fertilizer value for crop production and potential for emissions to the environment. **Science of The Total Environment**, v. 541, p. 1310-1338, 2016.

RUDORFF, B. F. T.; AGUIAR, D.A.; SILVA, W. F.; SUGAWARA, L. M.; ADAMI, L.; MOREIRA, M. A. Studies on the Rapid Expansion of Sugarcane for Ethanol Production. in São Paulo State (Brazil) Using Landsat Data. **Remote Sensing**, v. 2, p. 1057-1076, 2010.

RUIZ DE CASTILLA, L. T. **Análisis Económico del cambio climático en la agricultura de la región Piura - Perú**. Caso: principales productos agroexportables. Piura: Cies, 2010.

SALMI, T.; MÄÄTTÄ, A.; ANTTILA, P.; RUOHO-AIROLA, T.; AMNELL, T. **Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates** - The Excel template application makesens. n. 31, Finnish Meteorological Institute: Helsinki, 2002.

SANT'ANNA, A. C.; SHANOYANB, A.; BERGTOLDC, J. S.; CALDAS, M. M.; GRANCO, G. Ethanol and sugarcane expansion in Brazil: what is fueling the ethanol industry?. **International Food and Agribusiness Management Review**, v. 19, n. 4, p. 163-

181, 2016.

SANTOS, O. I. B.; RATHMANN, R. Identification and analysis of local and regional impacts from the introduction of biodiesel production in the state of Piauí. **Energy Policy**, v. 37, p. 4011-4020, 2009.

SATOLO, L. F.; BACCHI, M. R. P. Impacts of the Recent Expansion of the Sugarcane Sector on Municipal per Capita Income in São Paulo State. **ISRN Economics**, v. 2013, p. 1-14, 2013.

SAVCI, S. Investigation of Effect of Chemical Fertilizers on Environment. **APCBEE Procedia**, v. 1, p. 287-292, 2012.

SCARPARE, F. V.; LEAL, M. R. L. V.; VICTORIA, R. L. The challenges of sugarcane ethanol in Brazil: past, present and future. In: DELLEMAND, J. F.; HILBERT, J. A.; MONFORTI, F. **Bioenergy and Water**. Milam: Luxembourg, 2013. p. 89-101.

SEEG - System for Greenhouse Gas Emissions and Removals Estimates. In: Tasso Azevedo (Org.). **Data base** (Base de dados). Brasília: Climate Observatory, 2018. Available in: <<http://seeg.eco.br/>>. Access in: 8 fev. 2019.

SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M.; MOZAMBANI, A. E. Aspectos fenológicos da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. de (Org.). **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: ESALQ, 2006. p. 19-36.

SEN, P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. **Journal of the American Statistical Association**, v. 63, p. 1379-1389, 1968.

SHARMA, B.; SARKAR, A.; SINGH, P.; SINGH, R. P. Agricultural utilization of biosolids: A review on potential effects on soil and plant grown. **Waste Management**, v. 64, p. 117-132, 2017.

SHIVA, V. **The Violence of the green revolution**: Third world agriculture, ecology and politics. United States of America: University Press of Kentucky, 2016.

SILVA, D. A. L.; DELAI, I.; MONTES, M. L. D.; OMETTO, A. R. Life cycle assessment of the sugarcane bagasse electricity generation in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 32, p. 532-547, 2014.

SILVA, F. C.; BOARETTO, A. E.; BERTON, R. S.; ZOTELLI, H. B.; PEXE, C. A.; MENDONÇA, E. Cana-de-açúcar cultivada em solo adubado com lodo de esgoto: nutrientes, metais pesados e produtividade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, n. 1, p. 1-8, 1998.

SILVA, V. P. R.; SOUSA, F. S. S.; CAVALCANTI, E. P.; SOUZA, E. P.; SILVA, B. B. Teleconnections between sea-surface temperature anomalies and air temperature in northeast Brazil. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 68, n. 7, p. 781-792, 2006.

SILVA-LEAL, J. A.; MADRIÑAN-MOLINA, R.; TORRES-LOZADA, P. Influence of the application of biosolids on the content of humic and fulvic acids in soil cultivated with sugar cane. **Livestock Research for Rural Development**, v. 28, n. 5, p. 1-10, 2016.

SINGH, A.; LAL, U. R.; MUKHTAR, H. M.; SINGH, P. S.; SHAH, G.; DHAWAN, R. K. Phytochemical profile of sugarcane and its potential health aspects. **Pharmacogn Rev**, v. 9, n. 17, p. 45–54, 2015.

SIQUEIRA, O. J. F.; FARIAS, J. R. B.; SANS, L. M. A. Potential effects of global climate change for brazilian agriculture and adaptative strategies for wheat, maize and soybean. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 2, p. 115-129, 1994.

SOUSA, L. V. C.; SOARES, T. C.; FERNANDES, E. A.; TOYOSHIMA, S. H. Elasticidade de substituição entre capital, trabalho e recursos naturais: uma análise empírica para os países da ocde. In: X ENCONTRO DA ECOECO, 10., 2013, Vitória. **Anais...** Vitória: Hotel Vitória Grand Hall, 2013.

SOUZA, L. C.; FERNANDES, C.; NOGUEIRA, D. C. S.; MOITINHO, M. R.; BICALHO, E. S.; LA SCALA, N. Can partial cultivation of only the sugarcane row reduce carbon dioxide emissions in an Oxisol and Ultisol?. **Agronomy Journal**, Madison, v. 109, p. 1–9, 2017.

SRIVASTAVA, A. K.; RAI, M. K. Sugarcane production: Impact of climate change and its mitigation. **Biodiversitas**, v. 13, n. 4, p. 213-227, 2012.

STERN, N. **The Economics of Climate Change: the Stern Review**. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.

STOTT, P. A.; STONE, D. A.; ALLEN, M. R. Human contribution to the European heatwave of 2003. **Nature**, v. 432, p. 610-613, 2004.

THORBURN, P. J.; PROBERT, M. E.; ROBERTSON, F.A. Modeling decomposition of sugarcane surface residues with APSIM Residue. **Field Crops Research**, v. 70, p. 223-232, 2001.

TINTNER, G. **Methodology of mathematical economics and econometrics**. Chicago: The University of Chicago Press, 1968.

TSADILAS, C.; MITSIOS, I.; GOLIA, E. Influence of biosolids application on some soil physical properties. **Soil Science Plant Analysis**, v. 36, n. 4, p. 709-716, 2011.

UEA - University of East. **Data**. Climatic Research Unit, University of East Anglia. Disponível em: <<http://www.cru.uea.ac.uk/data>>. Access in: 8 fev. 2019.

UNICA - Brazilian Sugarcane Industry Association. **Crop production** (Produção por safra). 2015. Available in: <<http://www.unicadata.com.br/historico-de-producao-e-moagem.php?idMn=32&tipoHistorico=4>>. Access in: 8 fev. 2019.

URBAN, R. C.; ISAAC, R. L. **Mapa de aptidão do solo para a aplicação de lodo de esgoto: Bacia dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiáí.** Revista Ambiente & Água, v. 11, n. 1, p. 125-136, 2016.

VAREJÃO-SILVA, M. A.; BARROS, A. H. C. **Zoneamento de aptidão climática do Estado de Pernambuco para três distintos cenários pluviométricos.** (Relatório Técnico). Recife: COTEC/DATA AGROS/SPRRA-PE, p. 38, 2001.

VARIAN, H. R. **Microeconomia: Uma Abordagem Moderna.** 9. ed. Rio de Janeiro: Campus, 2015.

VASCONCELOS, K.; FARINHA, M.; BERNARDO, L.; LAMPERTD, V. N.; GIANEZINI, M.; COSTAB, J. S.; SOARES FILHO, A.; GENRO, T. C. M.; RUVIARO, C. F. Livestock-derived greenhouse gas emissions in a diversified grazing system in the endangered Pampa biome, Southern Brazil. **Land Use Policy**, v. 75, p. 442–448, 2018.

VERBEEK, M. **A guide to modern econometrics.** Chichester: John Wiley & Sons, 2000.

VERHEYE, W. H. **Soils, Plant Growth and Crop Production.** Encyclopedia of life support systems. Oxford: Eolss Publishers, 2010.

WALTER, A.; GALDOS, M. V.; SCARPARE, F. V.; LEAL, M. R. L. V.; SEABRA, J. E. A.; CUNHA, M. P.; PICOLI, M. C. A.; OLIVEIRA, C. O. F. Brazilian sugarcane ethanol: developments so far and challenges for the future. **WIREs Energy Environ**, v. 3, n. 1, p. 70-92, 2014.

WATSON, R. T.; ZINYOWERA, M. C.; MOSS, R. H.; DOKKEN, D. J. **The Regional Impacts of Climate Change: An Assessment of Vulnerability.** Washington: Cambridge University, 1997.

WEIL, R. R.; BRADY, N. C. **The Nature and Properties of Soils.** 5 ed. United States of America: Pearson Education, 2016.

WILHITE, D. A. **Drought as a natural hazard: Conceptions and definitions.** In: Drought: A global assessment. Nebraska: Routledge, 2000. p. 111-120.

WMO – World Meteorological Organization. **Guide to Agricultural Meteorological Practices.** n. 134, 2012.

WONNACOTT, T. H.; WONNACOTT, R. J. **Introductory statistics for business and economics.** 4. ed. New York: John Wiley & Sons, 1990.

WOOLDRIDGE, J. M. **Introductory econometrics: A modern approach.** 5. ed. Thomson: South-Western, 2013.

YOSHIDA, H.; NIELSEN, M. P.; SCHEUTZ, C.; JENSEN, L. S.; CHRISTENSEN, T. H.; NIELSEN, S.; BRUUN, S. Effects of sewage sludge stabilization on fertilizer value and greenhouse gas emissions after soil application. **Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science**, v. 65, n. 6, p. 506-516, 2015.

YUE, P. S.; YANG, T. C.; WU, C. K. Impact of climate change on water resources in southern Taiwan. **Journal of Hydrology**, v. 260, p. 161-175, 2002.

ZHAO, D.; LI, Y. R. Climate change and sugarcane production: Potential impact and mitigation strategies. **International Journal of Agronomy**, v. 2015, p. 1-10, 2015.

ZOCKUN, M. H. G. P. **A expansão da soja no Brasil**: alguns aspectos da produção. 1978. 228 f. Dissertação (Mestrado em Economia) - Faculdade de Economia e Administração, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1978.

ZUURBLER, P.; VOOREN, J. V. **Sugarcane ethanol**: Contributions to climate change mitigation and the environment. The Netherlands: Wageningen Academic, 2008.