



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MARIANNA OLIVEIRA MOURA

**IMPACTOS NA PEGADA HÍDRICA DO CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR EM  
UM PERÍODO DE SECA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO IPOJUCA EM  
PERNAMBUCO**

Recife

2020

MARIANNA OLIVEIRA MOURA

**IMPACTOS NA PEGADA HÍDRICA DO CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR EM  
UM PERÍODO DE SECA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO IPOJUCA EM  
PERNAMBUCO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco como requisito para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

**Área de concentração:** Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos

**Orientadora:** Profa. Dra. Maria de Lourdes Florencio dos Santos

**Coorientadora:** Profa. Dra. Márcia Maria Guedes Alcoforado de Moraes

Recife

2020

Catálogo na fonte  
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

- M929i      Moura, Marianna Oliveira.  
                Impactos na pegada hídrica do cultivo da cana-de-açúcar em um período de seca na bacia hidrográfica do Ipojuca em Pernambuco / Marianna Oliveira Moura – Recife, 2020.  
                110 f.: figs., tabs., abrev. e siglas.
- Orientadora: Profa. Dra. Maria de Lourdes Florencio dos Santos.  
                Coorientadora: Profa. Dra. Márcia Maria Guedes Alcoforado de Moraes.  
                Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2020.  
                Inclui referências, apêndices e anexo.
1. Engenharia Civil. 2. Gestão hídrica. 3. Mudanças climáticas. 4. Agronegócio. 5. Sustentabilidade. I. Santos, Maria de Lourdes Florencio dos (Orientadora). II. Moraes, Márcia Maria Guedes Alcoforado de (Coorientadora). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG / 2021 – 110

MARIANNA OLIVEIRA MOURA

**IMPACTOS NA PEGADA HÍDRICA DO CULTIVO DA CANA-DE-AÇÚCAR EM  
UM PERÍODO DE SECA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO IPOJUCA EM  
PERNAMBUCO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco como requisito para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em: 27/10/2020.

**BANCA EXAMINADORA**

---

participação por videoconferência  
Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Márcia Maria Guedes Alcoforado de Moraes (coorientadora)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

participação por videoconferência  
Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Marília Regina Costa Castro Lyra (examinadora externa)  
Instituto Federal de Pernambuco

---

participação por videoconferência  
Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Maria do Carmo Martins Sobral (examinadora interna)  
Universidade Federal de Pernambuco

*“Uma sociedade cresce bem quando homens velhos plantam árvores que vão criar uma sombra na qual eles nunca sentarão.”*

Provérbio grego

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Maria José e Moura, por serem meu retorno, meu entorno e minha raiz. Por me lembrarem porque estou aqui e porque quero chegar lá.

Aos meus irmãos, Monize e Márcio, por serem minhas primeiras grandes inspirações de inteligência e análise crítica desde que me entendo por gente.

A minha orientadora, profa. Lourdinha Florêncio, pelas ideias, pelas grandes aulas ministradas, tantos ensinamentos e dedicação aos alunos.

A minha coorientadora, profa. Márcia Alcoforado, pela confiança, atenção e tamanha simpatia e entusiasmo com que me recebeu e acolheu.

Aos professores e colegas da UFPE e do LSA, em especial a Talita, que fazia meus dias mais felizes me arrancando sorrisos, e a Marcus Vinicius, por clarear meus pensamentos nos últimos minutos através da sua humildade em ensinar.

A Bárbara, que me estendeu a mão desde o início e foi parceirona. Sorrímos, choramos, cozinhamos, cantamos e nos divertimos tanto morando juntas.

Às amigas parceiras de vida de mestrado Fernanda, Shalana e Bartira, por terem sido luz, compreenderem as inquietudes, sentarem, discutirem comigo e estarem mais do que dispostas a ajudar.

A Hallison, pela companhia, pela presença em angústias e alegrias, pelas inúmeras conversas e impulsos por meio de palavras e ações.

Às firmes torcedoras Raissa, Carolina e Crislene, pelo apoio e confiança que eu finalizaria esse ciclo.

Ao IBGE, pela dobradinha exaustiva e desafiadora que me ajudou a desconstruir crenças, a respeitar meus limites e me proporcionou deliciosos encontros de vida.

À CAPES, pelo apoio à pesquisa brasileira e, em particular, pela bolsa de estudos concedida.

A Recife, por ter me proporcionado um grande encontro comigo mesma e ter me feito tão feliz por dez meses.

A Deus, pela luz incessante e pelo cuidado ao escolher, a dedo, os anjos acima. Com eles me resgato e me sinto grande e forte. Com a ajuda deles finalizo o mestrado.

## RESUMO

A cana-de-açúcar é um importante e histórico cultivo agrícola para o estado de Pernambuco, cuja alta demanda hídrica natural pode ser potencializada por eventos relacionados a mudanças climáticas, como períodos de seca. Tendo em vista o cenário de crise relacionado à água e a posição da irrigação como a finalidade de maior consumo no Brasil, urge a necessidade de investimento em alternativas de gestão da demanda do recurso, na busca por um uso cada vez mais eficiente. Nesse âmbito, o estudo aplicou o indicador Pegada Hídrica (PH) a fim de avaliar o impacto da seca de 2012 no consumo de água pela cana cultivada na bacia hidrográfica do rio Ipojuca, representativa na produção do estado através de municípios tradicionais no setor sucroalcooleiro, e alertar para possíveis mudanças nas políticas de gestão no enfrentamento a eventos extremos. Com o emprego de dados climatológicos, de solo e cultivo, calcularam-se as pegadas hídricas verde e azul do cultivo nos municípios que compõem a bacia, para os anos de 2007 a 2016, segundo a metodologia descrita pelo *Water Footprint Network*, com a evapotranspiração estimada pelo software *Cropwat*, desenvolvido pela FAO (*Food Agriculture Organization*). Confirmou-se um menor consumo hídrico por tonelada de cana na Zona da Mata, em comparação com o Agreste (229,37 m<sup>3</sup>/t e 363,59 m<sup>3</sup>/t, respectivamente), com a componente verde maior na primeira e a azul mais significativa na segunda. Em ambas as regiões, observou-se que a seca provocou o aumento da PH<sub>azul</sub> sobre a PH<sub>total</sub>, elevando a demanda por irrigação ao longo do período de 2012 a 2016. No entanto, esta mudança foi mais acentuada no Agreste, onde os parâmetros climáticos sofreram maior variação após o ano de 2012. Em termos municipais, Caruaru e Vitória de Santo Antão apresentaram as maiores pegadas hídricas totais em suas respectivas regiões, devido às suas baixas produtividades. Com a análise estatística, verificou-se que os fatores precipitação, insolação e umidade relativa do ar foram os que apresentaram forte correlação ( $r > 0,7$ ) com a PH e seus componentes. Estes resultados indicam o aumento da pressão sobre os recursos hídricos em decorrência de seca, com a consequente necessidade de incremento de irrigação para a manutenção do desenvolvimento da cultura. Portanto, visam dar suporte a estratégias de alocação de água em situações de escassez, contribuindo para a mitigação dos conflitos de uso.

Palavras-chave: Gestão hídrica. Mudanças climáticas. Agronegócio. Sustentabilidade.

## ABSTRACT

The sugarcane is an important and historical agricultural crop for the state of Pernambuco, whose natural high water demand may be potentialized by events related to climate change, such as drought periods. From the perspective of the critical scenario related to water and the position occupied by irrigation as the main use in Brazil, the investment on water demand management is urgent to achieve a more efficient consumption. In this context, this study applied the Water Footprint (WF) indicator in order to assess the impact of the drought initiated in 2012 on water consumption of the sugarcane cultivated in the Ipojuca basin, significant for the state production, considering its traditional municipalities on sugarcane agricultural sector, and alert to possible changes in the politics of management to face extreme events. By using climate, soil and crop data, green and blue water footprint of sugarcane were calculated from 2007 to 2016 for the municipalities that compose the basin according to the methodology described by the Water Footprint Network. The evapotranspiration was estimated by the Cropwat model, developed by FAO (Food Agriculture and Organization). It was observed a lower water consumption by ton of crop in Zona da Mata region in comparison with Agreste (229.37 m<sup>3</sup>/t e 363.59 m<sup>3</sup>/t, respectively). The first one had a greater green WF, while the second one presented higher values of blue WF. In both regions, the drought changed the contribution of blue water footprints to the total, which increased, augmenting irrigation demand during 2012-2016 year period. However, this change was greater in Agreste, where climate parameters vary more significantly after 2012. In terms of municipalities, Caruaru and Vitória de Santo Antão presented the highest total WF in their respective regions due to their low productivities. Statistics analysis showed that precipitation, sun hours and relative humidity of air were the parameters with stronger relation ( $r > 0.7$ ) with the WF and its components. These results indicate an increase on water pressure as an effect of drought periods, with a consequent need of intensifying irrigation in order to maintain crop development. Thus, this study aims to support water allocation strategies in case of scarcity, contributing to the mitigation of water use conflicts.

Keywords: Water management. Climate change. Agribusiness. Sustainability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Produção de cana, em milhões de toneladas, no Nordeste e seus estados.....	22
Figura 2 -	Estágios fenológicos da cana-de-açúcar. a) e b) representam a fase de emergência ou brotação, com plantio de mudas; c) fase de estabelecimento; d) e e) fase de desenvolvimento, culminando no início da maturação; f) maturação; g) colheita; h) brotação das soqueiras.....	27
Figura 3 -	Precipitação média anual da região Nordeste para o período de 2007 a 2015.*.....	37
Figura 4 -	O caráter cíclico da crise hídrica, com a região de instalação em vermelho e a continuação destacada em amarelo.....	37
Figura 5 -	Deficiência hídrica média para a cana – média histórica (1997 a 2012) e período recente (2014 a 2018).....	39
Figura 6 -	Bacias hidrográficas da área de influência indireta do Ramal do Agreste.....	41
Figura 7 -	A cadeia das Pegadas Hídricas de processos, produtos, produtores, consumidores e regiões.....	43
Figura 8 -	A bacia hidrográfica do rio Ipojuca e sua divisão por mesorregiões.....	46
Figura 9 -	Variação temporal da precipitação acumulada (mm) por região de 2007 a 2016.....	58
Figura 10 -	Variação da pegada hídrica total (m <sup>3</sup> /t) para o Agreste e a Zona da Mata do período de 2007 a 2016.....	60
Figura 11 -	Pegadas Hídricas verde e azul da cana-de-açúcar (m <sup>3</sup> /t) no Agreste (a) e Zona da Mata (b) da bacia do Ipojuca no período de 2007 a 2016.....	62
Figura 12 -	Variação dos fatores meteorológicos para as regiões Agreste e Zona da Mata no período de 2007 a 2016.....	64
Figura 13 -	Variação temporal da evapotranspiração (mm) no Agreste (a) e na Zona da Mata (b) no período de 2007 a 2016.....	65
Figura 14 -	Produtividades médias (t/ha) dos municípios das regiões Agreste (a) e Zona da Mata (b) no período de 1987 a 2016.....	68

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Produto das lavouras temporárias em Pernambuco durante o ano de 2018.....	23
Tabela 2 –	Produto da lavoura temporária cana-de-açúcar, por mesorregião e microrregião, em Pernambuco, em 2018.....	24
Tabela 3 –	Área de cana irrigada por estado, região e tipologia de irrigação.....	30
Tabela 4 –	Produção, área colhida e produtividade da cana-de-açúcar de Pernambuco a partir da safra 2011/12.....	39
Tabela 5 –	Produção, área colhida e produtividade da cana-de-açúcar do Nordeste a partir da safra 2011/12.....	39
Tabela 6 –	Municípios que compõem a bacia do Ipojuca e suas respectivas áreas drenadas.....	47
Tabela 7 –	Participação (%) do Produto Interno Bruto (PIB) e dos Valores Adicionados Brutos (VABs) dos municípios da bacia do Ipojuca nos respectivos resultados para o estado de Pernambuco em 2017*.....	49
Tabela 8 –	Variáveis de entrada no Cropwat 8.0 para cálculo da evapotranspiração.....	54
Tabela 9 –	Área de influência das estações meteorológicas de Surubim e Recife Curado nos municípios da bacia do Ipojuca.....	55
Tabela 10 –	Quantidade produzida, área colhida e produtividade por região, de 1987 a 2016.....	59
Tabela 11 –	Variação percentual da PH total nos anos pós seca para o Agreste e a Zona da Mata.....	60
Tabela 12 –	Contribuições por tipo de água (verde e azul) em relação à PH total ao longo dos anos, na região do Agreste.....	61
Tabela 13 –	Contribuições por tipo de água (verde e azul) em relação à PH total ao longo dos anos, na região da Zona da Mata.....	61
Tabela 14 –	Médias de quantidade produzida, área colhida e produtividade por município das regiões do Agreste e Zona da Mata, para trinta anos (1987 a 2016).....	68
Tabela 15 –	Pegada Hídrica total (m <sup>3</sup> /t) dos municípios pertencentes à região Agreste da bacia do Ipojuca no período de 2007 a 2016.....	69

Tabela 16 –	Pegada Hídrica total (m <sup>3</sup> /t) dos municípios pertencentes à região Zona da Mata da bacia do Ipojuca no período de 2007 a 2016.....	70
Tabela 17 –	Correlação de Pearson entre as variáveis climáticas e os componentes da Pegada Hídrica para o Agreste.....	71
Tabela 18 –	Correlação de Pearson entre as variáveis climáticas e os componentes da Pegada Hídrica para a Zona da Mata.....	72
Tabela 19 –	Volumes estimados de água requeridos para irrigação do cultivo da cana-de-açúcar no período de 2007 a 2016.....	73
Tabela 20 –	Quantidade produzida de cana-de-açúcar por volume de água requerido na bacia do Ipojuca para o período de 2007 a 2016.....	74
Tabela 21 –	Demanda hídrica da cana-de-açúcar por área na bacia do Ipojuca para o período de 2007 a 2016.....	74
Tabela 22 –	Disponibilidade virtual* e vazões outorgadas na bacia do Ipojuca para fonte superficial.....	75
Tabela 23 –	Capacidades dos principais reservatórios da bacia do Ipojuca e seus usos preponderantes.....	76

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
APAC	Agência Pernambucana de Águas e Clima
CBH	Comitê de Bacia Hidrográfica
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
DHC	Demanda Hídrica da Cultura
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETazul	Evapotranspiração azul
ETverde	Evapotranspiração verde
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>
GIRH	Gestão Integrada de Recursos Hídricos
GWP	<i>Global Water Partnership</i>
Ibama	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INSA	Instituto Nacional do Semiárido
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
ME	Ministério da Economia
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
PAM	Pesquisa Agrícola Municipal
PERH	Plano Estadual de Recursos Hídricos
PH	Pegada Hídrica
PHA	Plano Hidroambiental
PHverde	Pegada Hídrica verde
PHazul	Pegada Hídrica azul
PISF	Projeto de Integração do Rio São Francisco com as bacias hidrográficas do Nordeste Setentrional
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos

SRH	Secretaria de Recursos Hídricos
SRHE	Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos
UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
VAB	Valor Adicionado Bruto
WWAP	<i>United Nations World Water Assessment Programme</i>
ZARC	Zoneamento Agrícola de Risco Climático

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVO GERAL.....	18
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>20</b>
2.1	A CANA-DE-AÇÚCAR.....	20
<b>2.1.1</b>	<b>Histórico e importância da cana em Pernambuco.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Fisiologia da cana e as principais condições para seu desenvolvimento.....</b>	<b>25</b>
<b>2.1.3</b>	<b>A cana e a irrigação.....</b>	<b>28</b>
2.2	GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL E A GESTÃO DA DEMANDA NA AGRICULTURA.....	31
2.3	A CRISE DE 2012, EFEITOS NA CANA-DE-AÇÚCAR E POLÍTICAS PÚBLICAS.....	36
2.4	PEGADA HÍDRICA.....	42
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>46</b>
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	46
3.2	CÁLCULO DA PEGADA HÍDRICA DA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	51
<b>3.2.1</b>	<b>Pegada Hídrica Verde.....</b>	<b>51</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Pegada Hídrica Azul.....</b>	<b>52</b>
3.3	CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	53
<b>3.3.1</b>	<b>O modelo <i>Cropwat</i>.....</b>	<b>53</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Dados utilizados.....</b>	<b>54</b>
3.4	AVALIAÇÃO DO IMPACTO DOS FATORES CLIMÁTICOS NOS COMPONENTES DA PEGADA HÍDRICA.....	56
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>57</b>
4.1	EVOLUÇÃO DAS PEGADAS HÍDRICAS NA BACIA DO IPOJUCA NO PERÍODO DE 2007 A 2016.....	57
4.2	AS PEGADAS HÍDRICAS MUNICIPAIS: O AGRESTE E A ZONA DA MATA.....	67

4.3	AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DO IMPACTO DOS FATORES CLIMÁTICOS NA PEGADA HÍDRICA.....	70
4.4	A PEGADA HÍDRICA AZUL E A GESTÃO DA ÁGUA NA BACIA DO IPOJUCA.....	72
4.5	ESTRATÉGIAS PARA A REDUÇÃO DA PEGADA HÍDRICA.....	76
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>79</b>
<b>6</b>	<b>RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>81</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>82</b>
	<b>APÊNDICE A – DADOS CLIMÁTICOS PARA O AGRESTE.....</b>	<b>93</b>
	<b>APÊNDICE B – DADOS CLIMÁTICOS PARA A ZONA DA MATA.....</b>	<b>98</b>
	<b>APÊNDICE C – DADOS DE SOLO E CULTIVO PARA ENTRADA NO CROPWAT.....</b>	<b>103</b>
	<b>APÊNDICE D – DADOS DE ENTRADA PARA ANÁLISE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON.....</b>	<b>104</b>
	<b>APÊNDICE E – PEGADAS HÍDRICAS VERDE, AZUL E TOTAL PARA OS MUNICÍPIOS DO AGRESTE E DA ZONA DA MATA.....</b>	<b>105</b>
	<b>ANEXO A – CURRÍCULOS LATTES DA ALUNA, ORIENTADORA E COORIENTADORA.....</b>	<b>108</b>

## 1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

O cultivo da cana-de-açúcar tem elevada importância no cenário agrícola brasileiro, em especial na região Norte-Nordeste, responsável pela segunda maior produção do Brasil, sendo Pernambuco o segundo estado nordestino com maior quantidade produzida, em toneladas (IBGE, 2017a), com valores de produção menores apenas que os de Alagoas. No estado, a cana é cultivada tanto em regime de sequeiro, em regiões com índice pluviométrico satisfatório, como sob irrigação. A relevância do setor canavieiro no Nordeste, contudo, não se detém somente ao âmbito sócioeconômico – dada a produção de açúcar e etanol e seus impactos econômicos e sociais diretos –, mas também ao ambiental, no que tange ao uso da água e à gestão do recurso, uma vez que se trata de um cultivo que demanda uma grande quantidade hídrica para sustentar seu crescimento e desenvolvimento (MOURA, 2017). A região detém cerca de 7% da produção nacional e 10% da área total de cultivo do país, ocupando o segundo lugar após o Centro-Oeste (CARDOSO *et al.*, 2019).

Como forma de aumentar sua longevidade e a reposição devido à perda por evapotranspiração, elevou-se a disponibilidade através da irrigação, o que faz com que a cana seja a cultura com maior área irrigada no país, com cerca de 1,7 milhão de hectares, principalmente no Norte-Nordeste. O cultivo é considerado 100% irrigado em dois estados – Piauí e Maranhão –, enquanto que, para os demais, a cana irrigada ocupa pelo menos 20% das respectivas áreas totais voltadas ao cultivo (ANA, 2017a; 2019). No Nordeste, a irrigação é considerada essencial para a produção, com resultados verificados em aumentos no rendimento (HERRERA-MARTINEZ *et al.*, 2013; ANDRADE *et al.*, 2009).

As projeções do governo brasileiro apontam para um aumento substancial da produção agrícola, em um futuro próximo, para atender aos mercados nacional e internacional com alimentos e bioenergia. A previsão é de que a produção de cereais, madeira, cana de açúcar e outras fontes de biomassa aumente em pelo menos 30% até 2026 (MAPA 2016). A agricultura irrigada deve se tornar a próxima fronteira agrícola no país, levando em conta que há um enorme potencial para sua expansão e a necessidade de se aumentar a produção agrícola do país, sem a utilização de novas áreas<sup>1</sup>. Embora se tratando de uma região naturalmente com baixa disponibilidade hídrica e não estar entre uma das mais irrigadas, o Nordeste responde por cerca de 30% da produção agrícola nacional, ocupando o segundo lugar atrás do Sudeste (54%), o que demonstra o potencial de expansão da irrigação na região (IBGE, 2006).

---

<sup>1</sup> No Brasil, somente 7% da área cultivada é irrigada, o que corresponde a 16% da produção total de alimentos (FAO, 2015).

Nesse contexto, o Brasil, embora concentre 13% da água doce em seu território (MIERZWA; HESPANHOL, 2005), apresenta distribuição espacial desigual do recurso, o que agrava o desequilíbrio entre oferta e demanda. Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA), aproximadamente 80% do bem encontra-se na Região Amazônica, que, todavia, apresenta a menor densidade demográfica do país, estimada em 4,12 hab/km<sup>2</sup> (ANA, 2017). Em contrapartida, a região Nordeste, com a terceira maior densidade – 34,15 hab/km<sup>2</sup> –, naturalmente possui condições desfavoráveis em termos hídricos: alta taxa de evapotranspiração durante todo o ano, baixa precipitação e predominância de água salobra no subsolo (TUCCI *et al.*, 2001; INSA, 2012).

Em especial, Pernambuco apresenta problemas representativos dos problemas hídricos enfrentados por áreas com escassez da América Latina. O estado é um dos mais secos do Brasil, com uma disponibilidade hídrica per capita média de 1320 m<sup>3</sup>/ano, abaixo do limiar de 1500 m<sup>3</sup>/ano, que caracteriza conflito hídrico, e equivalente a 3,5% da disponibilidade nacional per capita média. Partes de Pernambuco como as sub-regiões do Sertão e do Agreste, que representam 89% de seu território, têm apenas 20% da água disponível no estado, com disponibilidade hídrica per capita variando de 400 a 800m<sup>3</sup>/ano, respectivamente (SRH, s.d.).

No âmbito deste cenário de escassez hídrica, destaca-se ainda a vulnerabilidade da região e do estado frente aos eventos extremos como as graves estiagens, como a que ocorreu entre 2012-2018, a mais severa e longa seca registrada desde o início do século passado, que afetou a maior parte do Nordeste Setentrional. Estudos realizados pelo IPCC (Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas) têm apontado que eventos relacionados a mudanças climáticas se intensificarão em magnitude e duração. Além disso, preveem aumento da diferença entre estações secas e chuvosas, da precipitação média entre regiões com menor e maior disponibilidade hídrica, além de prever o crescimento do risco de secas agrícolas em áreas que sofrem atualmente com a baixa oferta do recurso (IPCC, 2013). Tais mudanças acarretam efeitos sobre crescimento, produtividade, rendimento de cultivos agrícolas – devido ao impacto nas fases fenológicas –, além de alterações no consumo de água, com vistas ao aumento da demanda hídrica em caso de redução na precipitação.

Considerando estes cenários de aumento de temperatura, Assad *et al.* (2008) apresentaram potenciais de expansão da cana no Brasil também em áreas onde o cultivo não é favorável, como as de maior risco de geadas e as que apresentam condições mais secas, como o semiárido, prevendo intenso emprego da irrigação. Tal expansão de áreas aptas para a cana irrigada no Nordeste deve aumentar a competição pelo uso da água entre os diversos usos e vai requerer uma governança efetiva através de uma adequada gestão de demanda. Essa governança

deve ser um requisito fundamental no nosso estado, dada a sua baixa potencialidade hídrica, a menor do Brasil (REBOUÇAS, 2003), associada à importância econômica do setor sucroalcooleiro. Para isso, urge o desenvolvimento de políticas que tornem o uso da água mais eficiente e reduza as perdas.

Na vertente desta busca de aperfeiçoamento da gestão hídrica para cultivos agrícolas, a Pegada Hídrica apresenta-se como um indicador do consumo de água que permite identificar não somente o volume consumido e afetado pela poluição, mas também o tipo de água utilizada (verde, azul e cinza), além de onde e quando ocorreu o uso. Estes três tipos relacionam-se à precipitação, às águas superficiais e subterrâneas e à água necessária para diluir um contaminante, respectivamente (HOEKSTRA *et al.*, 2011). Trata-se, portanto, de um indicador importante auxiliar no âmbito da agricultura que, por considerar em seus cálculos fatores climatológicos, pode refletir os efeitos de mudanças climáticas na eficiência do consumo de água pelos cultivos.

Quando associada ao conceito de água virtual<sup>2</sup>, a Pegada Hídrica pode auxiliar na identificação de pressões sobre o uso da água decorrente de trocas econômicas. Munoz *et al.* (2017), calculando as pegadas hídricas verde, azul e cinza da produção de cana-de-açúcar e associando-as aos fluxos inter-regionais entre todos os estados do Brasil, no âmbito do atendimento às demandas domésticas, identificaram Pernambuco como o segundo maior exportador de água verde, após Alagoas, e o terceiro maior exportador de água azul, precedido novamente por Alagoas e também Goiás. Em contrapartida, Rio de Janeiro e São Paulo posicionaram-se como maiores importadores de água verde e azul, respectivamente, o que indica que estados com maior disponibilidade hídrica, considerados mais ricos, pressionam aqueles onde o recurso é mais escasso, como Pernambuco.

Dada a importância de tais resultados, o presente estudo pretende calcular os valores de pegada hídrica (verde e azul) em um nível local com dados anteriores e posteriores ao ano de 2012, um ano muito seco que iniciou uma seca que durou até 2018 e que penalizou principalmente a região do Agreste pernambucano. A bacia escolhida na região foi a bacia do Ipojuca devido ao seu destaque por sua posição estratégica de ligação entre a Região Metropolitana de Recife e o Sertão do estado, e por atravessar municípios de porte médio que atuam como polos de desenvolvimento regionais e locais. O cultivo de cana-de-açúcar na bacia é significativo, visto que esta incorpora e abastece municípios que se sobressaem entre as maiores produtividades do estado, como Vitória de Santo Antão, Sairé, Amaraji e Ipojuca

---

<sup>2</sup> Refere-se à água necessária à produção de um produto, porém relacionando-se aos fluxos de água englobados em importações e exportações de bens e serviços entre países e regiões (ALLAN, 1997).

(IBGE, 2017a). A área de cana ocupa uma área de 19,02% da bacia, sendo a segunda maior classe de uso e ocupação do solo (CONDEPE/FIDEM, 2005). Além disso, a escolha dessa área deve-se à possibilidade de expansão da cana irrigada, através do Projeto de Integração do Rio São Francisco (PISF) com as bacias do Nordeste Setentrional, que, por meio do Ramal do Agreste, aumentará a oferta hídrica na região (CRA/ENGEORPS, s.d.).

Esses valores locais a serem calculados no presente estudo pretendem medir as pegadas hídricas da cana-de-açúcar produzida na bacia do Ipojuca, durante os anos anteriores e posteriores ao início (2012) da crise hídrica ocorrida entre 2012 e 2018. Usando tais medidas, pretende-se avaliar se os produtores de cana passaram a usar a água de forma mais eficiente devido à crise. Em situações de escassez alguns agentes econômicos conseguem reduzir perdas, adotar reúso, mudar o cultivo, de forma a otimizar o uso, mas outros não.

A pesquisa justifica-se devido à grande importância econômica do setor canavieiro na região e dos grandes volumes de água requeridos pelo mesmo, em especial, durante eventos extremos. Ademais, o aumento na disponibilidade hídrica a ser ofertada pela Adutora do Agreste e a possibilidade de ampliação do setor, devido não só à nova oferta, mas também ao aumento de demanda global por bioenergia. Os valores das pegadas hídricas podem assim contribuir com a gestão de demanda através do apoio a decisão em instrumentos de gestão a ser aplicados na agricultura irrigada na bacia de estudo. Os resultados aqui propostos também poderão auxiliar no desenvolvimento econômico e social dos municípios que compõem a bacia, na medida em que ampliam a visão do formulador de políticas em relação à efetividade das estratégias analisadas na implementação do desejado desenvolvimento sustentável.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Identificar o impacto nas pegadas hídricas verde e azul da cana-de-açúcar produzida na bacia do Ipojuca, no estado de Pernambuco, durante a crise hídrica de 2012, tomando como base o período de 2007 a 2016.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Calcular e comparar as Pegadas Hídricas verde e azul da cana-de-açúcar entre as mesorregiões da bacia do Ipojuca;
- Calcular e comparar as Pegadas Hídricas verde e azul da cana-de-açúcar entre os municípios pertencentes à bacia;

- Avaliar o impacto dos fatores climáticos na Pegada Hídrica e seus componentes;
- Identificar a demanda por irrigação do cultivo da cana na bacia e a pressão sobre os recursos hídricos em termos de outorga, disponibilidade e volume de reservatórios.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este tópico será apresentado em três partes, trazendo as principais características que norteiam a temática do cultivo da cana-de-açúcar e a irrigação, a crise de 2012 e seus efeitos, e a teoria da Pegada Hídrica enquanto metodologia de gestão do uso da água.

### 2.1 A CANA-DE-AÇÚCAR

De modo a entender a importância da água para a cana, fundamenta-se seu estudo nos aspectos relativos à sua história no estado de Pernambuco, às condições mais propícias ao seu desenvolvimento e ao emprego da irrigação como ferramenta de compensação ao estresse hídrico.

#### 2.1.1 Histórico e importância da cana em Pernambuco

A cana-de-açúcar é um cultivo de grande importância para o Brasil, cuja produção, por safra, tem se consolidado em mais de 600 milhões de toneladas, com área de colheita ultrapassando 8 milhões de hectares. A região Sudeste é a principal produtora, seguida do Centro-Oeste e Nordeste. O país ocupa a posição de maior produtor mundial desta cultura e tem suas condições climáticas como grandes aliadas na escala de competitividade global. Além do seu cultivo visando à produção de açúcar – e abastecimento de indústrias alimentícia, de bebidas e farmacêutica – e de energia a partir do bagaço, a cana é cultivada para a produção do etanol. Nas últimas décadas, devido ao reconhecimento das urgentes questões ambientais em busca de alternativas aos combustíveis fósseis para minimização do aquecimento global, a demanda por etanol derivado da cana cresceu, e o Brasil tem experimentado um aumento acentuado na sua produção (CONAB, 2018). Um dos resultados desta demanda foram os incentivos à retomada do Programa Proálcool, em 2000, que ratificou a importância do etanol no setor de biocombustíveis e seu auxílio na redução das emissões dos gases do Efeito Estufa.

Para o Nordeste e, especificamente, o estado de Pernambuco, o cultivo da cana-açúcar tem importância histórica, tendo em vista que foi essencial na formação e estruturação sócioeconômica local. A atividade canavieira está intimamente ligada ao *plantation*, sistema agrícola baseado na monocultura de exportação e amplamente empregado na colonização do Brasil no século XVI. A exploração da cana neste modo iniciou-se em Pernambuco e na Bahia, levando à formação de grandes engenhos, que utilizavam massivamente mão-de-obra escrava

associada à força animal visando à produção de açúcar, rapadura e aguardente. A sociedade local estruturou-se principalmente em torno dos grandes latifundiários, dos comerciantes, pequenos proprietários e da significativa – e maior – parcela de trabalhadores escravos (ANDRADE, 2001).

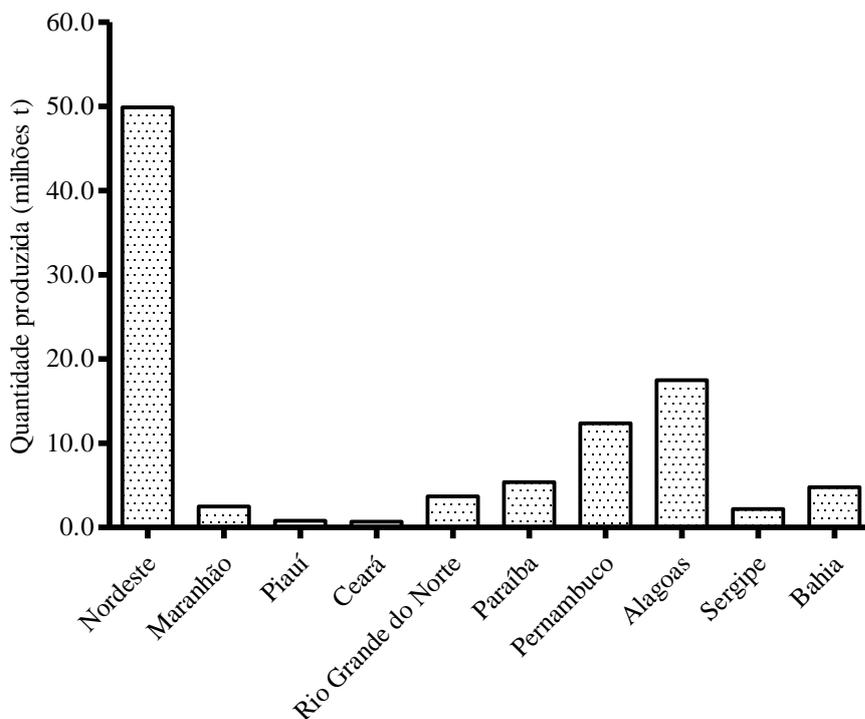
Uma combinação de condições climáticas e físicas propiciaram o sucesso de Pernambuco, que, por muitos anos, foi considerado o principal produtor de açúcar do Brasil. A cana encontrou boa fertilidade em toda a região da Zona da Mata, paralela ao litoral, cujo clima é predominantemente quente durante o ano e o solo varia entre laterítico, silicoso e argiloso, facilitando a adaptação e expansão da cana. Concomitantemente, a proximidade física com o mercado europeu foi um dos fatores que mais favoreceu o investimento da produção, visto que o mesmo era o principal receptor do produto (ANDRADE, 2001). Segundo Carvalho (2007), este favorecimento geográfico ainda é notório nos dias atuais, uma vez que o Porto de Suape foi estruturado para escoar boa parte da produção sucroalcooleira, tendo o mercado inglês como um dos maiores compradores.

Carvalho (2007) relata ainda que, após o período de mecanização forçada exigida pelo mercado internacional no século XIX e crescimento e modernização das usinas do estado, entretanto, observou-se o desenvolvimento da região Sudeste como um forte centro consumidor e produtor para a bacia do rio Prata, dada a proximidade geográfica. Os investimentos da indústria canavieira foram redirecionados para a região, que passou a empregar mais tecnologia na exploração da cana e a fazer uso da irrigação, com técnicas modernas, como forma de fomentar a produção. A partir da década de 50 a região Centro-Sul torna-se a maior produtora do país e, posteriormente, o estado de Alagoas posicionou-se em primeiro lugar da produção do Nordeste. A queda produtiva de cana agravou-se devido às secas que ocorreram entre os anos 1993-1994 e 1998-1999 e atingiram a Zona da Mata. Moura *et. al.* (2004) discutem em seu estudo sobre desempenho da indústria canavieira de Pernambuco entre os anos 1987 e 1996 que, apesar da política de subsídios concretizada pelo supracitado Programa Proálcool, o estado não obteve a mesma retomada do Centro-Sul após a extinção do programa, que experimentou expansão da produção.

Observando o contexto econômico regional, contudo, Pernambuco ainda se configura como segundo maior produtor do Nordeste, com uma produção anual de mais de 10 milhões de toneladas de cana em 2017, como apresentado na Figura 1. Moura *et. al.* (2004) enfatizam a importância do setor canavieiro para o estado, que representava, à época da realização do seu estudo, 4% do seu produto total e podia contribuir para o emprego de cerca de 6% da mão-de-obra em períodos de safra. Neste âmbito empregatício, as autoras destacam que os postos de

trabalho da mesorregião da Zona da Mata são, em sua maioria, ocupados pelo setor, fato que impacta significativamente outros setores, principalmente o comércio.

Figura 1 - Produção de cana, em milhões de toneladas, no Nordeste e seus estados durante o ano de 2017



Fonte: IBGE (2018).

A comparação realizada com outras lavouras temporárias corrobora a importância da cana na produção agrícola do estado, visto que o cultivo ocupa o primeiro lugar tanto em termos de quantidade produzida, em toneladas, quanto em área colhida, em hectares, segundo a Produção Agrícola Municipal realizada pelo IBGE em 2018 (Tabela 1). Neste mesmo ano, a área colhida total das lavouras temporárias em Pernambuco foi de 594.509 hectares, o que mostra que a cana-de-açúcar ocupa cerca de 41% da área colhida destinada aos cultivos temporários.

Tabela 1 - Produto das lavouras temporárias em Pernambuco durante o ano de 2018

Cultivo	Quantidade produzida (t)	Área colhida (ha)
<b>Cana de açúcar</b>	<b>12.586.990</b>	<b>244.645</b>
Mandioca	372.360	41.466
Melancia	97.975	3.610
Tomate	61.001	1.287
Milho (em grão)	60.400	127.577
Feijão	50.601	164.532
Cebola	44.553	1.721
Melão	43.529	1.503
Abacaxi	29.236*	1.324
Batata doce	23.356	2.502
Arroz (em casca)	3.314	556
Fava	1.191	3.368
Sorgo (em grão)	212	309
Amendoim (em casca)	103	52
Algodão herbáceo (em caroço)	40	47
Mamona	4	10

Fonte: IBGE (2019).

\*A quantidade produzida de abacaxi é expressa em mil frutos e o rendimento médio em frutos/ha.

Conforme apresentado na Tabela 2, no âmbito detalhado das meso e microrregiões do estado, constata-se a maior produção na região com domínio da Zona da Mata: a mesorregião Mata Pernambucana, que foi responsável por mais de 75% da quantidade produzida do cultivo (9.450.523 toneladas) em 2018, em relação ao total produzido pelas lavouras temporárias. Estas localidades mais ao norte, representadas pela Mata Setentrional, apresentaram a maior área colhida e quantidade produzida (90.400 hectares e 4.815.000 toneladas, respectivamente). Em seguida, tem-se a região Metropolitana do Recife como a segunda maior produtora (23,09%). É importante observar também que, embora as condições naturais sejam mais propícias ao cultivo na região mais próxima ao litoral, o interior do estado também contribui para o setor sucroalcooleiro. O Agreste produz cana em 4 das suas 6 microrregiões, contabilizando 1,69% da produção; de forma semelhante, o Sertão e a mesorregião São Francisco também contam com municípios produtores ao longo do seu território de abrangência. O Sertão respondeu por 0,09%, enquanto que o São Francisco, por aproximadamente 0,05%. Destaca-se que, na escala municipal, os três principais produtores do estado foram Sirinhaém, Itambé e Ribeirão, que, juntos, responderam por 16,25% da quantidade total produzida, em toneladas, pelas lavouras temporárias neste mesmo ano (IBGE, 2018).

Tabela 2 - Produto da lavoura temporária cana-de-açúcar, por mesorregião e microrregião, em Pernambuco, em 2018

Mesorregião	Microrregião	Área colhida (ha)	Quantidade produzida (t)
Sertão	Araripina	8	107
	Salgueiro	8	30
	Pajeú	323	11.791
	Sertão de Moxotó	-	-
Total		339	11.928
São Francisco	Petrolina	174	5.935
	Itaparica	-	-
Total		174	5.935
Agreste	Vale do Ipanema	-	-
	Vale do Ipojuca	605	27.300
	Alto Capibaribe	-	-
	Médio Capibaribe	2.470	134.644
	Garanhuns	170	4.600
	Brejo Pernambucano	900	46.000
Total		4.145	212.544
Zona da Mata	Mata Setentrional Pernambucana	90.400	4.815.000
	Vitória de Santo Antão	8.800	448.500
	Mata Meridional Pernambucana	84.949	4.187.023
Total		184.149	9.450.523
Região Metropolitana de Recife	Recife	16.200	597.764
	Suape	30.099	1.803.434
	Fernando de Noronha	*	*
Total		55.838	2.906.060

Fonte: Adaptado de IBGE (2019).

\* Dado não disponível

É importante observar a influência da cana-de-açúcar no contexto das bacias hidrográficas e sua ampla distribuição entre elas. Das 13 bacias que compõem as Unidades de Planejamento do estado<sup>3</sup>, o cultivo da cana é relevante naquelas cujas áreas permeiam locais com condições climáticas mais favoráveis, como a Zona da Mata e o Agreste, em menor grau. Nas bacias Goiana, Capibaribe, Ipojuca, Sirinhaém e Una, a cana tem desempenhado significativo papel na transformação das suas paisagens, sendo a atividade mais importante em diversas de suas sub-bacias e responsável pela criação de ambientes antropizados, com elevado grau de degradação da vegetação natural. Destaque para a bacia do rio Goiana, que abrange o

<sup>3</sup> Para atender à determinação do Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH-PE), o estado de Pernambuco foi dividido em 29 Unidades de Planejamento, composta de 13 Bacias Hidrográficas, 6 Grupos de Bacias de Pequenos Rios Litorâneos (GL1 a GL6), 9 Grupos de Bacias de Pequenos Rios Interiores (GI1 a GI9) e a bacia de pequenos rios do arquipélago de Fernando de Noronha (APAC, s.d.).

segundo município no *ranking* de produção de cana, Itambé, e para a bacia do Sirinhaém, na qual o cultivo de cana ocupa 29,3% da sua área e responde por 28,2% da produção de todo o estado. Dos 19 municípios dentro da sua área de abrangência, 16 produzem cana (APAC, 2013). O uso do solo pelo cultivo resulta em impactos sociais – exemplificado, dentre outros fatores, pela empregabilidade no setor e efeito na saúde dos trabalhadores das usinas e canaviais –, econômicos, como a competição com outras culturas agrícolas pela área de produção e influência em outros setores da agricultura e indústria, além de ambientais, decorrentes da aplicação de fertilizantes e agrotóxicos e do uso intensivo e competitivo pela água.

### 2.1.2 Fisiologia da cana e as principais condições para seu desenvolvimento

A cana-de-açúcar é uma planta semiperene, pertencente ao gênero *Saccharum* e nativa de regiões equatoriais, tropicais e subtropicais, como o Sudeste Asiático e a Índia Ocidental. Como principais características físicas, pode-se citar flores pequenas, fruto seco e caule robusto e em formato cilíndrico, chamado colmo, o qual é composto de múltiplos nós e entrenós, onde se armazena a sacarose (MOORE e NUSS, 1987<sup>4</sup> *apud* SABADIN, 2013). Sua reprodução pode ser sexuada ou assexuada, resultando a primeira em sementes que se destinam ao melhoramento genético e a segunda, nos colmos, aproveitados comercialmente (CESNIK e MIOCQUE<sup>5</sup>, 2004 *apud* HANAUER, 2011).

A cana cultivada nos dias atuais é híbrida, isto é, resultado do cruzamento de espécies do gênero, principalmente a *S. officinarum* e a *S. spontaneum*, visando aprimorar o cultivo. A primeira tem como principais características a produção abundante de sacarose, a dependência de grande quantidade de água, de condições climáticas específicas e alta fertilidade do solo. Em contrapartida, a *S. spontaneum* é forte e resistente a doenças e ao estresse (CHEAVEGATTI-GIANOTTO, 2011). Considera-se a cana como um cultivo bastante adaptável em diversos tipos de solo, no entanto os mais adequados são os que possuem textura argilosa, sendo os solos arenosos desfavoráveis (INMET, 2009).

Em relação ao sistema de cultivo, há dois tradicionais, diferenciados pela época de plantio: a “cana de ano” e a “cana de ano e meio”. No primeiro, o plantio ocorre no final do ano, de setembro a dezembro, sendo a colheita após 12 meses, enquanto que, no segundo, o

---

<sup>4</sup> MOORE, P. H.; NUSS, K. J. Flowering and flower synchronization. In: HEINZ, D. J. (Org.). *Sugarcane improvement through breeding*. Amsterdam: Elsevier, cap. 7, p. 273-311, 1987.

<sup>5</sup> CESNIK, R.; MIOCQUE, J. *Melhoramento da cana-de-açúcar*. 1 ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, v. 1, 307 p., 2004.

início do ano é o período de plantio (de janeiro a abril), com colheita após 18 meses. Ressalta-se ainda o sistema de “cana de inverno”, que foi inserido visando expandir e adaptar a cana em outras regiões com baixa oferta de água por meio de chuvas, mas que possui disponibilidade para irrigação. Neste, o plantio ocorre entre os meses de maio a agosto e a colheita, após 12 meses (SABADIN, 2013).

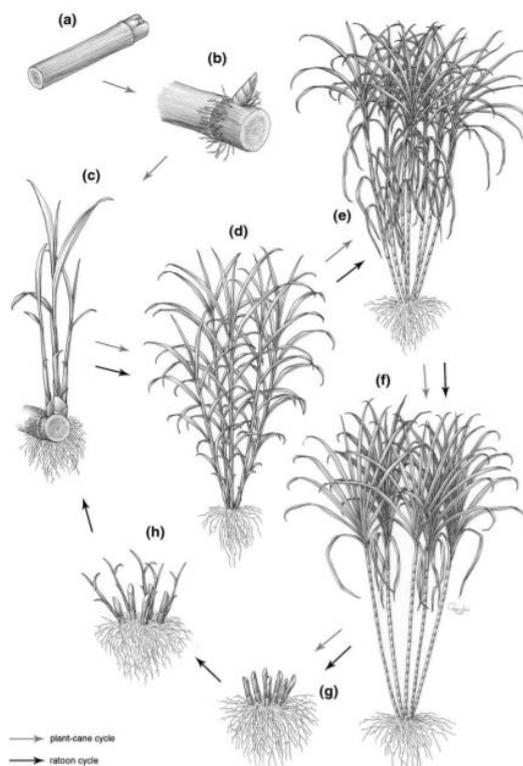
Nesses sistemas, a produção da cana é constituída de dois ciclos principais: a cana-planta, do plantio até o primeiro corte, e a cana-soca, a partir deste corte até as demais colheitas. Estes ciclos ocorrem em quatro fases principais: a emergência ou brotação, o estabelecimento, o desenvolvimento e a maturação. Todos eles possuem durações e exigências características. A primeira fase, a emergência, dura de 30 a 60 dias e é o período de ocorrência da germinação ou emergência; a segunda, o estabelecimento, varia de 60 a 90 dias e resulta na formação de raízes, folhas e no perfilhamento; a terceira, o desenvolvimento, é o período de crescimento intenso, sendo o mais longo, com duração de 180 a 210 dias, levando à alongação do colmo e ao início do acúmulo de sacarose; por fim, na última fase, a maturação (60 a 90 dias), o armazenamento do açúcar é potencializado e a formação de sementes é iniciada (INMET, 2009). A Figura 2 representa esquematicamente os ciclos da cana-planta e cana-soca.

A fim de se obter boa produtividade, os requerimentos da cultura devem ser observados durante todo o ciclo, em cada fase. Os dois principais condicionantes agrometeorológicos influenciadores do seu desenvolvimento são a disponibilidade hídrica e a temperatura. Leite e Crusciol (2008) apontam que, em geral, o amadurecimento natural da cana e a consequente produção de sacarose ocorrem em sintonia com a diminuição gradual do suprimento de água e da temperatura ao longo das fases. A combinação das condições climáticas com as fases fenológicas e seus respectivos requerimentos faz com que, em geral, a produtividade da “cana de ano e meio” seja maior que a da “cana de ano”. Uma vez que na cana de ano e meio o plantio ocorre no início do ano, a fase de ocorrência do perfilhamento e crescimento intenso dos colmos coincide com o período de maior temperatura e disponibilidade hídrica (CASTRO, 1999<sup>6</sup> *apud* SABADIN, 2013).

---

<sup>6</sup> CASTRO, P. R. C. Maturadores químicos em cana-de-açúcar. In: Semana da cana-de-açúcar de Piracicaba, 4., 1999. Piracicaba, *Anais...Saccharum*, v. 1, p. 12-16, 1999.

Figura 2 - Estágios fenológicos da cana-de-açúcar. a) e b) representam a fase de emergência ou brotação, com plantio de mudas; c) fase de estabelecimento; d) e e) fase de desenvolvimento, culminando no início da maturação; f) maturação; g) colheita; h) brotação das soqueiras



Fonte: Cheavegatti-Gianotto (2011).

A cana-de-açúcar é considerada um cultivo resistente a estresses hídricos, devido à sua variabilidade genética; no entanto, a oferta, seja por chuvas ou irrigação, deve suprir uma necessidade hídrica que está em intervalo de 1500 a 2000 mm ao longo de todo ciclo (ROCHA, 2001<sup>7</sup> *apud* ALBUQUERQUE, 2012). Inman-Bamber e Smith (2005), em seu estudo, observaram os efeitos que o déficit do insumo pode causar, como perda de rendimento na fase final, diminuição significativa do acúmulo de biomassa e produção de sacarose. Para eles, o armazenamento de biomassa e sacarose ocorrem quando os déficits se tornam maiores que 120 mm por ano e 145 mm por ano, respectivamente. Wiedenfeld (2000) aponta ainda quedas de 8,3% a 15% no rendimento se a deficiência hídrica ocorrer nas duas últimas fases do desenvolvimento. Em situação oposta, de encharcamento do solo, Gilbert *et. al.* (2008) relatam efeitos na produção dos colmos e da sacarose.

<sup>7</sup> ROCHA, F. C. S. *Avaliação da eficiência técnica e análise financeira de um plantio comercial de cana-de-açúcar, Saccharum officinarum L., microirrigado por gotejamento subsuperficial*. Fortaleza: UFC, 2001. Dissertação de Mestrado.

Outro fator crítico ao desenvolvimento da cultura é a temperatura. Identificou-se que, analisando todo o ciclo, o intervalo de 30 a 34°C possibilita uma taxa máxima de crescimento, com diminuição da mesma abaixo dos 20°C, estresse térmico acima dos 35°C e nenhum crescimento acima dos 38°C. Associado a este fator, a exposição à luz solar também possui uma faixa ótima, de 10 a 14 horas (INMET, 2009; DOMINGUES, 2010). Inman-Bamber (2004) relata as implicações de exposição a um tempo prolongado de seca – que acontece associada a escassez de precipitações e aumento de temperatura. Segundo ele, em caso de ocorrência dessa condição, a planta é prejudicada na produção de suas folhas, na captação da radiação, fotossíntese e eficiência do uso da água.

É possível observar a influência direta destes fatores climáticos no cultivo da cana no Brasil, onde o regime de sequeiro é majoritariamente empregado, ou seja, neste, o cultivo depende essencialmente das chuvas, em boa quantidade e distribuição, uma vez que não se faz uso da irrigação. Com esse sistema, a baixa oferta hídrica leva ao encurtamento do ciclo, devido à morte precoce das soqueiras (ALBUQUERQUE, 2012). Em especial, no contexto do Nordeste, região produtiva tradicional, a produção em sequeiro agrava-se devido ao regime pluvial deficiente, ocasionando baixa produtividade, em comparação com canaviais no Sudeste. Portanto, as condições climáticas são as que exigem maior atenção nas estratégias de expansão da cana-de-açúcar pelo país, dado o variável regime pluviométrico entre as regiões. Nesse sentido, no entanto, Assad *et al.* (2008) mostraram, por meio de cenários, que alterações climáticas podem ser favoráveis à expansão da cana pelo Brasil, tanto em áreas já favoráveis ao plantio, como o Nordeste, onde deve dobrar a área de cultivo, quanto sobre regiões de altas latitudes, que apresentam muitas restrições. Contudo, os autores advertem que o aumento contínuo da temperatura requererá maior volume de irrigação.

### **2.1.3 A cana e a irrigação**

A irrigação visa atender à necessidade hídrica da planta em suas fases de desenvolvimento, complementando o fornecimento do recurso através da precipitação. Na prática, é necessário considerar que há perdas no processo, como o escoamento superficial e infiltração profunda. A fim de garantir que o desenvolvimento da cultura não seja prejudicado por deficiências na suplementação hídrica, na agricultura, efetua-se o cálculo da evapotranspiração real, que possibilita a quantificação do volume de água que uma planta precisa para se desenvolver sob determinadas condições. Dispondo de dados do cultivo, do solo e do clima, calcula-se a disponibilidade hídrica no solo e a precipitação efetiva, ou seja, a

quantidade de água da chuva aproveitável pela planta. Com base nesses valores, é possível identificar, então, se o regime pluviométrico é suficiente para o bom desenvolvimento ou, em caso negativo, o quanto é necessário complementar com a irrigação (ANA, 2017b).

Tradicionalmente, a cana-de-açúcar se distribui espacialmente pelas regiões Centro-Sul e na Zona da Mata do Nordeste, dadas as condições climáticas favoráveis dos seus ambientes – por isto a produção em regime de sequeiro. No entanto, a expansão do cultivo por locais onde a oferta hídrica não é abundante tem fomentado o emprego da irrigação pelo setor sucroalcooleiro, como forma de aumentar a produtividade, além de possibilitar o reaproveitamento de efluentes industriais, como a vinhaça, apesar de provocar elevado efeito sobre os custos de produção (ANA, 2017b; TEODORO *et al.*, 2013).

O uso da irrigação para compensação do estresse hídrico pode ser visualizado, em especial, em boa parte do Nordeste, dada a distribuição irregular das chuvas na região. Em períodos secos, o armazenamento de água no solo não é satisfatório e a irrigação mostra-se como a alternativa mais adequada para contornar as quedas no crescimento e produtividade (DANTAS NETO *et al.*, 2006). Segundo a ANA (2019) (Tabela 3), no Norte-Nordeste a irrigação está presente em 38,5% dos seus canaviais, ocupando uma área estimada de 456,4 mil hectares, enquanto que, no Centro-Sul, o percentual de área irrigada se reduz para 2,9% - resultados que também apontam o maior favorecimento desta região em termos hídricos, cuja pluviosidade consegue atender melhor aos requisitos da cana. Vale destacar que os estados do Piauí e Maranhão são os únicos do Brasil que possuem irrigação em 100% das suas áreas cultivadas, dadas suas deficiências hídricas. Em seu estudo experimental realizado no Piauí, Noletto *et al.* (2011) verificou que a irrigação pode maximizar a produtividade da cana acima de 150 Mg/ha. No entanto, Barros *et al.* (2018), também em experimentos no mesmo estado, tais efeitos na produtividade são diferenciados a depender do estágio do ciclo em que ocorra o estresse hídrico, visto que a disponibilidade de água no solo pode afetar a fotossíntese da cultura, o alongamento dos colmos e o acúmulo de açúcares.

Segundo ANA (2017b), no Brasil, há três principais formas de manejo de irrigação: plena, suplementar (ou com déficit) e por salvamento. A irrigação plena é empregada em quase todo o ciclo de desenvolvimento, com o objetivo de cobrir todo o déficit hídrico da cultura, enquanto que a irrigação suplementar supre em torno de 50% do mesmo. A irrigação de salvamento, por sua vez, é aplicada em períodos específicos do desenvolvimento, principalmente na fase inicial (ANDRADE JÚNIOR *et al.*, 2017). A Tabela 3 mostra que a irrigação por salvamento é predominante entre os 17 estados produtores de cana no país, sendo

o único tipo empregado em 5 deles. O mesmo responde por cerca de 80% e 70% da irrigação dos canaviais no Norte-Nordeste e Centro-Sul, respectivamente.

Tabela 3 - Área de cana irrigada por estado, região e tipologia de irrigação

Estado/região	Irrigação por tipologia (mil ha)			Área irrigada em relação à área cultivada (%)
	Salvamento	Com déficit	Plena	
Minas Gerais	83,2	47,2	9,1	13,5
Goiás	102	32,3	-	11,7
Mato Grosso do Sul	10,5	-	-	1,2
Mato Grosso	4,3	-	-	1,8
São Paulo	2,1	-	-	0,0
Paraná	-	-	-	0,0
Rio de Janeiro	-	-	-	0,0
Espírito Santo	1,4	-	-	0,0
Alagoas	144,9	29,3	0,2	42,8
Pernambuco	72,2	-	-	20,3
Paraíba	44,4	0,7	-	30,3
Maranhão	22,9	23,2	-	100
Sergipe	29,9	3,6	-	53,2
Tocantins	15,1	4,1	-	56,3
Bahia	11,5	2,5	18,7	43,1
Rio Grande do Norte	11,4	1,2	-	20,6
Piauí	10,9	9,5	-	100
<b>Centro-Sul</b>	<b>203,8</b>	<b>79,5</b>	<b>9,1</b>	<b>2,9</b>
<b>Norte-Nordeste</b>	<b>363,2</b>	<b>74,3</b>	<b>18,9</b>	<b>38,5</b>

Fonte: Adaptado de ANA (2019).

Pernambuco é o estado do Nordeste que menos emprega irrigação em seu cultivo de cana (20,3%), com 72,2 dos seus 355,7 mil hectares sujeitos à irrigação por salvamento. A ANA (2019) aponta o município de Goiana entre os 10 que mais empregam este tipo de irrigação no país, ocupando o 7º lugar, com uma área irrigada de 10.056 hectares. É importante destacar o contexto das Unidades de Planejamento em relação à demanda por irrigação em cultivos agrícolas. As bacias hidrográficas de Goiana, Capibaribe e Pontal ocupam os três primeiros lugares em termos de áreas irrigadas (29.277,34 ha, 14.188,12 ha e 6.323,83 ha, respectivamente). Sabendo da importância da cana-de-açúcar para estas bacias, mencionada no item 2.1.1, pode-se inferir que boa parte da irrigação pode estar associada a este cultivo nas bacias do rio Goiana e do Capibaribe.

Quanto aos métodos empregados pelo setor sucroalcooleiro, estes podem ser classificados em pressurizados – sistemas por aspersão e sistemas localizados – e de superfície.

Os sistemas por aspersão são majoritariamente utilizados, devido às facilidades de manutenção e operação. Os sistemas localizados, onde a umidificação ocorre em apenas algumas partes da superfície do solo, geralmente a região onde a raiz tem maior influência, contam com o método de gotejamento enterrado, que é o mais empregado na cana por se adaptar melhor ao cultivo. Em relação ao método de superfície, considerado o mais tradicional na agricultura e com menores custos de implementação, o sistema de sulcos é o mais aplicado nos canaviais, sendo mais adequado a terrenos planos.

Vale ressaltar o emprego da fertirrigação com vinhoto, principal resíduo do processo produtivo do setor sucroalcooleiro (GERMANO *et al.*, 2010; SILVA *et al.*, 2016), após a destilação para produção de álcool. Neste tipo de irrigação, por ser rico em matéria orgânica e minerais, principalmente potássio, o efluente é aplicado nos campos produtivos diluído na água de irrigação, como forma de aumentar a produtividade. No entanto, pelo mesmo motivo, possui alto potencial poluidor aos corpos hídricos, por meio da poluição difusa, após sua lixiviação para os mananciais (MELO, 2011).

No Nordeste, a maior parte do vinhoto é utilizado nos cultivos de cana e, em Pernambuco, a fertirrigação passou a ser praticada após a proibição da disposição direta do efluente da cana nos corpos hídricos, em 1981 (GUNKEL *et al.*, 2007). A norma CPRH 2001 prevê a redução de 80% da carga orgânica não biodegradável (DQO) dos efluentes das agroindústrias antes da sua destinação no corpo hídrico, no entanto, não foi encontrada regulamentação específica à aplicação do vinhoto no solo, por meio da fertirrigação. O órgão requisita às usinas e destilarias que incorporem em seus Planos de Controle Ambiental (PCA) – documento obrigatório para a renovação da Licença Ambiental – informações acerca do aproveitamento agrícola da vinhaça, conforme a Instrução Normativa CPRH nº 06/2006, como uma forma alternativa de destinação do efluente.

## 2.2 GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL E A GESTÃO DA DEMANDA NA AGRICULTURA

A degradação quali-quantitativa e os conflitos pelo uso da água, recurso imprescindível à manutenção da vida e ao desenvolvimento econômico, mantêm-se como foco das consequências do crescimento populacional, da industrialização e da expansão da agricultura. Em outras palavras, o aumento da demanda no âmbito dos usos múltiplos – irrigação, abastecimento público, indústria, energia, dessedentação animal, navegação, recreação e

turismo – é responsável pela potencialização dos conflitos e preocupações, nos contextos atual e futuro, no que tange ao volume de água disponível e à sua qualidade.

A ideia de que a água possui valor econômico, que deve ser gerida a nível de bacia hidrográfica e que sua gestão deve envolver planejadores, gerentes e tomadores de decisão em todos os níveis, fez parte de uma importante evolução na governança. No entanto, a busca pelo desenvolvimento econômico aponta as limitações das estratégias de gestão e suscita a necessidade de inovações no âmbito da governança da água para uma forma integrada, eficiente e descentralizada, com redução de conflitos entre usos competitivos e diferentes interesses (TUNDISI, 2013).

No Brasil, o gerenciamento dos recursos hídricos alcançou um importante marco legal, o Código de Águas, em 1934, que estabelecia regras de controle do governo federal para o aproveitamento da água, com determinação dos usos múltiplos, e forneceu a base para a gestão no âmbito do saneamento. Em 1988, a Constituição regulamentou o tema e entregou ao Estado o papel de gestor do recurso, com a previsão da criação do Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos (SINGREH). O marco regulatório que implementou este sistema e trouxe um novo modelo de gestão foi estabelecido em 1997, através da Lei nº 9.433/1997, a “Lei das Águas”, que também instituiu a Política Nacional dos Recursos Hídricos (PNRH) (CASTRO, 2012).

No contexto da tomada de decisão, a PNRH prevê a participação integrada da sociedade civil, do poder público e dos usuários e baseia-se em instrumentos de comando e controle e incentivos econômicos para sua utilização, como a cobrança e as compensações financeiras. Como parte de toda a estrutura do SINGREH, estão incluídos o Conselho Nacional de Recursos Hídricos, o Ministério do Meio Ambiente (MMA), o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis (Ibama), a Agência Nacional de Águas (ANA), os conselhos estaduais, os Comitês de Bacias Hidrográficas (CBH), bem como outros órgãos e agências (CASTRO, 2012). Como forma de descentralizar a gestão, identificando as necessidades locais, e viabilizar o compartilhamento de responsabilidades entre a esfera federal, estadual e municipal, os CBHs, entre outras atribuições, aprovam os planos dos recursos hídricos das bacias hidrográficas, arbitram sobre os conflitos de uso e estabelecem os mecanismos de cobrança.

A base para o gerenciamento dos recursos hídricos é o equilíbrio entre a oferta e a demanda, na busca pelo atendimento de uma necessidade da sociedade a partir de uma disponibilidade limitada (CAMPOS e STUDART, 2003). O foco da gestão da oferta são as potencialidades hídricas como forma de aumentar as disponibilidades, o que se concretiza pela

construção de barragens, reservatórios, perfuração de poços, captação de água da chuva, entre outros meios. Trata-se de um método tradicional de resolução de conflitos de escassez que demandam grandes investimentos financeiros (CUNHA, 2014). Por outro lado, como proposta de soluções não estruturais, está a gestão da demanda, que visa a otimização do uso da água, reduzindo a pressão sobre as infraestruturas de oferta existentes e gerando benefícios para toda a bacia hidrográfica (SILVA, 2011).

Segundo Campos e Studart (2003), objetivando a otimização do uso das disponibilidades hídricas viabilizadas ou não pela oferta, a gestão da demanda considera as necessidades individuais do consumidor em paralelo os interesses da coletividade. Tratam-se de medidas com efeito na redução do consumo pelo usuário, ao passo que se mantém o mesmo nível de serviço. Os autores indicam que esse modelo de gestão pode ser implementado por meio de: medidas conjunturais, como a outorga, a cobrança e a legislação; incentivos à conservação e à realocação da água para usos de maior valor, como o estabelecimento das tarifas de água e a cobrança pela poluição; incentivos fiscais; restrições e sanções; intervenção direta do poder público para a melhora da rede de distribuição e a criação de programas.

No contexto do uso da água pela agricultura, foco do presente estudo, e considerando a irrigação como a principal finalidade do país, em termos de volume consumido (67,2%), segundo a ANA (2017)<sup>8</sup>, há que se ponderar a necessidade do aprimoramento da gestão da demanda em virtude dos impactos ambientais decorrentes do manejo inadequado da água e da lavoura. Diversos problemas são apontados no âmbito do uso ineficiente da água pelo setor agrícola, vinculados ao mal dimensionamento e manejo dos sistemas de irrigação, com elevadas perdas no processo (SILVA, 2011).

Como forma de produzir mais alimentos com menor volume de água, têm-se buscado métodos de irrigação mais eficientes, como o gotejamento e aspersores de baixa energia, ou aprimoramento do manejo do solo ou do cultivo, através de técnicas como a terraplanagem, plantio direto, mudanças nas variedades das plantas ou o conhecimento do melhor período e quantidade para irrigar (GLEICK, 2003 *apud* SILVA, 2011).

Segundo Folegatti *et al.* (2010), o gerenciamento eficiente da água de irrigação contribui para a minimização de problemas decorrentes da escassez hídrica, da produção de alimentos e da pobreza, gerando empregos, potencializando o desenvolvimento regional, garantindo a

---

<sup>8</sup> Segundo a ANA (2017), a irrigação é o maior consumidor de água – volume que não retorna diretamente aos corpos hídricos –, seguida do abastecimento animal (11,1%), da indústria (9,5%), do abastecimento urbano (8,8%) e outros usos.

segurança alimentar, aumentando e diversificando a produção, diminuindo os riscos da agricultura e melhorando a qualidade de vida.

Castro (2012) também ressalta a importância da racionalização do uso da água no setor agrícola e indica formas específicas de incentivo à gestão da demanda pelo poder público, como:

- A cobrança adequada pelo uso, considerando, para tanto, a equidade do acesso à água, uma vez que algumas culturas agrícolas são mais rentáveis que outras;
- Aplicação de taxas diferenciadas de acordo com o método de irrigação empregado, o que se chamaria de crédito de investimento para agricultura irrigada. Nesse sentido, o financiamento público seria direcionado para o uso de métodos cujos custos de operação e manutenção são mais elevados, mas que apresentam maior economia de água, como os sistemas localizados;
- Incentivos à produção de cultivos cuja demanda de água seja menor e/ou possua maior valor agregado, em substituição aos que consomem um alto volume em seu processo, o que poderia ser implementado por meio da outorga, por exemplo;
- Reuso como fonte adicional de oferta hídrica, principalmente em regiões que convivem com deficiência do recurso, como ocorre no semiárido. Sua adoção deveria fazer parte das estratégias das três esferas públicas ou dos comitês das bacias hidrográficas.

Em termos da cobrança, vale destacar o baixo preço cobrado pelo uso da água em bacias hidrográficas localizadas no semiárido (BUANAIN e GARCIA, 2015), a defasagem dos valores e a divergência em relação a outras bacias de domínio da União (ASSIS *et al.*, 2018). Quando se considera a irrigação como um dos usos de maior consumo, esta questão da precificação inadequada para fins agrícolas merece destaque, uma vez que se reflete na adoção de técnicas de irrigação menos eficientes pelos usuários e na manutenção da marginalização dos custos de oportunidade e de recuperação e da preservação dos ecossistemas. Trata-se de uma complexa tomada de decisão, uma vez que a gestão pública precisa agir no sentido do equilíbrio entre a cobrança e a viabilidade de produção, dada a presença de pequenos agricultores e a dependência da rentabilidade dos cultivos (SOUZA, 2020; KELMAN e RAMOS, 2005).

A estratégia de alocação eficiente de água no âmbito do planejamento agrícola tem sido considerada fundamental na busca pela otimização de uso do recurso em parceria com os ganhos econômicos. Locais que já enfrentam problemas com a escassez hídrica, como regiões

áridas e semiáridas, onde a expansão da irrigação deverá favorecer o aumento dos conflitos de uso da água (ASSAD, 2016), requerem atenção quanto ao emprego de novas tecnologias e melhoria da racionalização do consumo.

Diversos estudos têm abordado metodologias de alocação considerando diferentes critérios e apresentando seus benefícios. Hassan-Esfahani *et al.* (2015) desenvolveram um modelo que considera o tipo de cultivo, estágio de crescimento e sua sensibilidade ao estresse hídrico para identificar as taxas ótimas de aplicação de água. Com outro modelo, Xie *et al.* (2018) integraram as incertezas que permeiam o gerenciamento dos recursos hídricos, como a limitação quantitativa das águas superficiais e subterrâneas, a precipitação efetiva e os requerimentos hídricos imprecisos dos cultivos. Davijani *et al.* (2015), por sua vez, consideraram a relação existente entre o consumo de água e a força de trabalho nos setores agrícola e industrial, e mostraram que a alocação ótima do recurso pode maximizar a geração de empregos e, por consequência, incrementar os ganhos econômicos de uma região.

No Brasil, o estado do Ceará apresentou um plano de alocação de água destinada à irrigação do médio e baixo Jaguaribe, cujo produto, entre outros, foi a definição de critérios para a alocação em condições de restrições hídricas, por meio de indicadores. Para atingir os objetivos, o modelo associou não somente o volume consumido, como também outros fatores relacionados, como a economia e a sociedade. Dessa forma, os quesitos que norteariam a tomada de decisão para o corte hídrico, nos termos da ferramenta, foram a segurança produtiva (kg/ha), a segurança econômica (R\$/ha), a segurança social (emprego/ha) e a segurança hídrica (m<sup>3</sup>/ha) (ADECE, 2015).

Outros trabalhos também têm abordado a temática da eficiência do uso da água no âmbito da agricultura irrigada em regiões do semiárido. Souza (2020) realizou um estudo no Perímetro Irrigado Pontal Sul, na bacia do rio Pontal, em Pernambuco, cuja metodologia empregada é útil ao planejamento agrícola e ao manejo hídrico. Os principais focos foram a determinação da demanda hídrica e a geração de cenários para as culturas perenes da região, de modo a definir quais delas e em que proporções de ocupação da área poderão ser atendidas. Para isso, o autor considerou as condições climáticas locais, a disponibilidade hídrica do perímetro, bem como a capacidade de bombeamento e condução de água. Araújo *et al.* (2018) buscaram a minimização dos efeitos da seca com a proposta de um modelo de gestão para o aprimoramento da racionalização do uso da água, beneficiando famílias do sertão da Paraíba. No estudo, foi sugerida uma tecnologia social para armazenamento de água da chuva, que supriria as demandas estimadas para os cultivos locais, bem como outras atividades realizadas pelos moradores, como o abastecimento humano, a pecuária e a piscicultura.

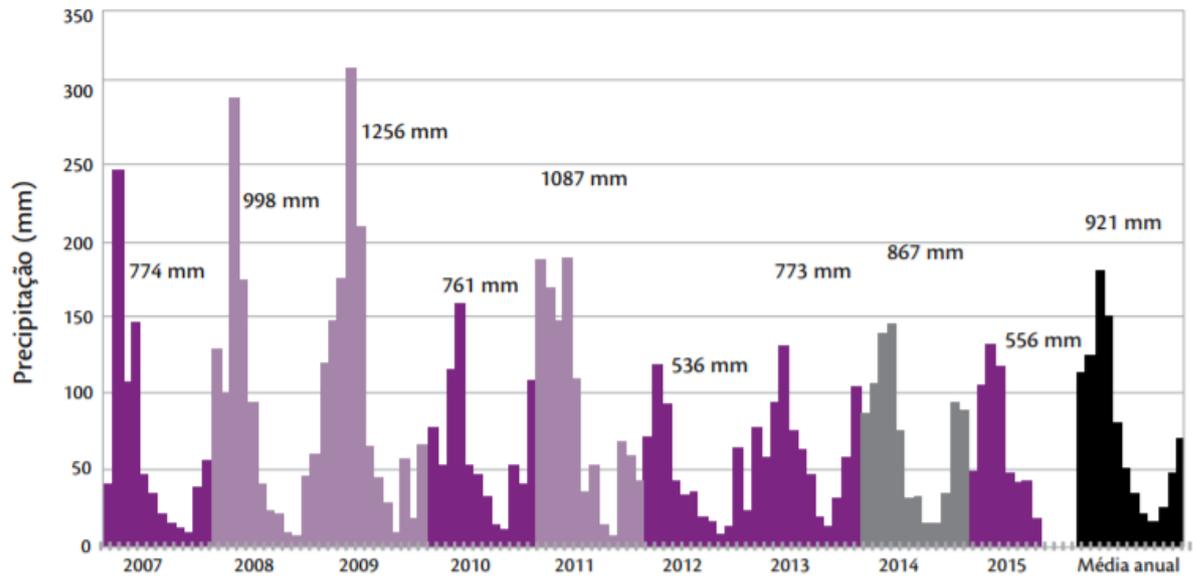
Na vertente de valoração da água, Moraes *et al.* (2018) determinaram os custos de água para a irrigação pública na região do sub-médio da bacia do Rio São Francisco utilizando um modelo integrado do uso de água e do solo à economia e considerando cenários de mudanças climáticas. Em seus resultados, sob o esperado aumento das temperaturas, demonstrou-se que os custos se elevarão em projeções com foco nos principais cultivos da região – cana-de-açúcar e frutas. O cálculo dos valores relacionados à água é uma importante contribuição para a tomada de decisão no âmbito da alocação adequada visando à mitigação de conflitos de uso.

### 2.3 A CRISE DE 2012, EFEITOS NA CANA-DE-AÇÚCAR E POLÍTICAS PÚBLICAS

O Nordeste convive com um problema natural de estresse hídrico em boa parte do seu território, potencializado na área do semiárido, desfavorecida pelo clima seco, pelo pequeno volume de água subterrânea, assim como pelas baixas amplitudes térmicas, forte insolação e alta taxa de evapotranspiração (ANA, 2017). Associado ao seu grande contingente populacional, tem-se um consequente balanço hídrico crítico na região, quando se compara a demanda com a oferta de água. Os estados nordestinos estão, portanto, sujeitos à ocorrência de prolongadas estiagens, possuindo a pior condição do país, apesar da tropicalidade brasileira.

A estiagem mais recente ocorreu entre 2012 e 2018, a mais severa e longa seca desde o início do século XX, que afetou a maior parte do Nordeste Setentrional, composto pelos estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco, que juntos possuem 87,8% do território dentro do semiárido. A Figura 3 mostra o impacto da crise na precipitação média anual do Nordeste, onde os anos 2012, 2013 e 2015 estiveram abaixo dos valores observados para um ano médio (em preto), estando apenas 2014 mais próximo à média. Trata-se de uma crise hídrica constante e cíclica no Brasil, sendo seus maiores efeitos observados em diferentes lugares do país (Figura 4). É importante observar na figura, contudo, que o Nordeste, sua região semiárida e as bacias hidrográficas que a compõem sempre estão sob constante risco ao longo dos anos (ANA, 2017).

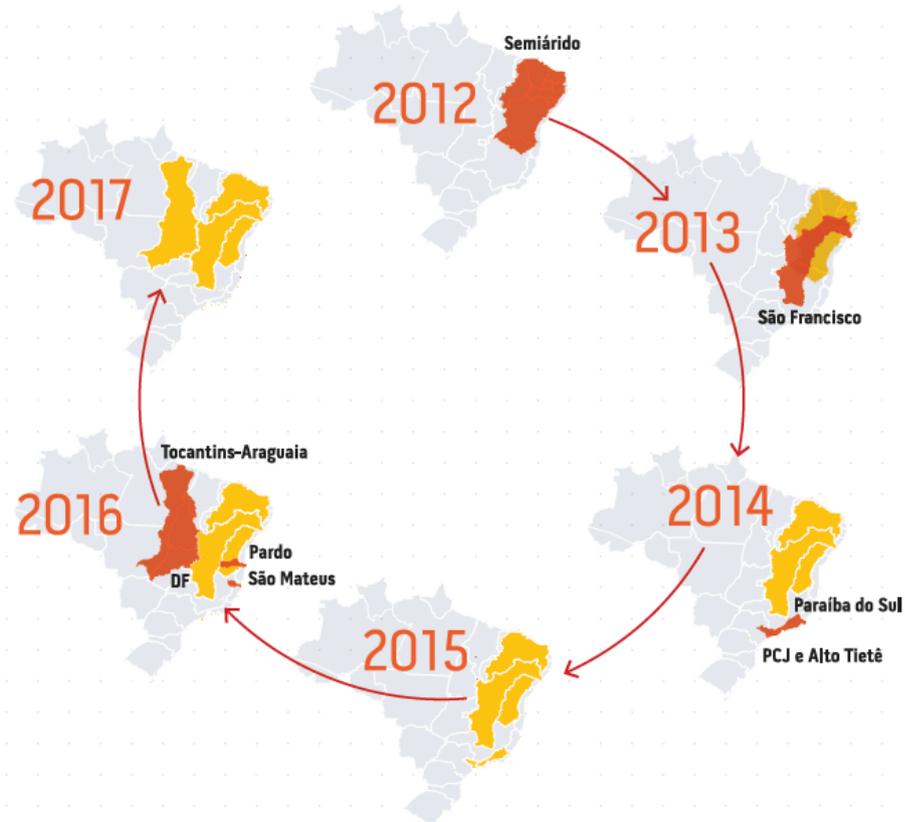
Figura 3 - Precipitação média anual da região Nordeste para o período de 2007 a 2015



Fonte: Martins e Magalhães (2015).

\* Os anos enquadrados nas categorias abaixo da média, em torno da média e acima da média foram coloridos em roxo, cinza e lilás, respectivamente.

Figura 4 - O caráter cíclico da crise hídrica, com a região de instalação em vermelho e a continuação destacada em amarelo



Fonte: ANA (2017).

Segundo a ANA (2017), dentre os usos, o abastecimento humano e a agropecuária, por serem os predominantes, são os mais afetados devido à escassez hídrica. Como reflexo da crise, 1,46 milhão de pessoas de 132 cidades do Nordeste Setentrional passaram por colapso de abastecimento em dezembro de 2016. Em relação à agropecuária, os danos são identificados na queda dos volumes dos reservatórios que abastecem a irrigação, além de prejudicar o desenvolvimento dos cultivos, com consequência nas quedas de produtividade.

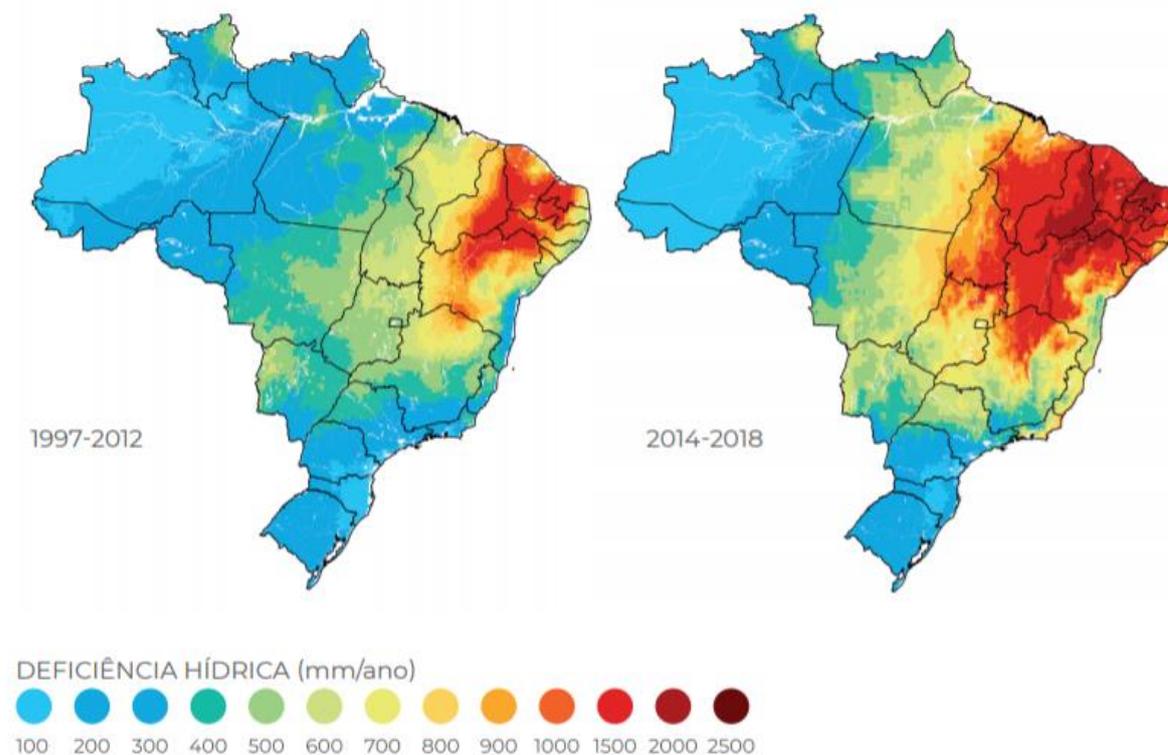
No contexto da seca, é impossível dissociar a realidade ambiental da social, caracterizada pela pobreza, não somente causada pela carência de água, mas potencializada por ela. Em seu estudo, Borges Filho (2012) aborda as ações governamentais de combate à seca ao longo dos anos e suas consequências sociais, destacando a falta de retorno eficaz dos investimentos em grandes obras para a qualidade de vida da população mais carente da região. Segundo o autor, prevalece a desigualdade na distribuição de terras e a indústria da seca, que favorece um grupo sócioeconômico formado por políticos, fazendeiros e empresários que têm forte influência na região e utilizam-se desta condição para conseguir recursos em benefício próprio, como a construção de açudes particulares. Alternativas de custo relativamente mais baixo, como as cisternas rurais, as barragens subterrâneas e barreiros trincheiras, são, portanto, apontadas como alternativas à melhoria da condição das pessoas que sofrem os efeitos das secas com mais intensidade.

Especificamente para o setor canavieiro, os dados de deficiência hídrica<sup>9</sup> (mm/ano) se mostraram bem agravados nos anos que sucederam ao início da seca (2012), como apresentado na Figura 5. Nota-se que o Nordeste foi a região produtora que observou maior avanço espacial de valores mais altos de deficiência (acima de 900 mm/ano). Esta é uma das principais causas apontadas pela ANA para a queda na produtividade nos últimos anos, juntamente com a diminuição das políticas públicas voltadas ao setor e à expansão do cultivo por áreas com condições climáticas menos favoráveis (ANA, 2019). Os dados da CONAB apresentados na Tabela 4 e Tabela 5 apontam este impacto em Pernambuco e no Nordeste principalmente na área colhida desde a safra de 2011/12, que decresce ano a ano em ambos os locais, bem como na produção, que também mostra redução.

---

<sup>9</sup> Quantidade de água que a cultura necessita para o suprimento pleno da sua demanda, sendo calculada pela diferença entre a Evapotranspiração Máxima e a Evapotranspiração Real (ANA, 2019).

Figura 5 - Deficiência hídrica média para a cana – média histórica (1997 a 2012) e período recente (2014 a 2018)



Fonte: ANA (2019).

Tabela 4 - Produção, área colhida e produtividade da cana-de-açúcar de Pernambuco a partir da safra 2011/12

Variável	Safra						
	2011/12	2012/13	2013/14	201/15	2015/16	2016/17	2017/18
Produção (mil t)	17.642,2	13.575,9	14.402,3	14.730,6	11.349,0	11.825,8	10.819,0
Área colhida (mil ha)	326,11	312,09	284,63	260,1	254,2	243,7	223,2
Produtividade (kg/ha)	54.099	43.500	50.600	56.628	44.655	48.530	48.470

Fonte: Adaptado de CONAB (s/d).

Tabela 5 - Produção, área colhida e produtividade da cana-de-açúcar do Nordeste a partir da safra 2011/12

Variável	Safra						
	2011/12	2012/13	2013/14	2014/15	2015/16	2016/17	2017/18
Produção (mil t)	63.487,8	52.972,3	53.014,6	55.662,8	45.274,8	41.437,7	41.140,5
Área colhida (mil ha)	1.114,52	1.083,22	1.030,21	979,0	916,9	866,5	842,2
Produtividade (kg/ha)	56.964	48.903	51.460	56.857	49.376	47.822	48.849

Fonte: Adaptado de CONAB (s/d).

De modo a contribuir para um melhor gerenciamento da problemática da escassez no âmbito da cana, em Pernambuco, estado alvo do presente estudo, foi aprovado pelas Portarias nº 32 e 24/2018 o Zoneamento Agrícola de Risco Climático para este cultivo, em regime de sequeiro e com irrigação de salvação, respectivamente. O instrumento teve por objetivo identificar as áreas aptas ao cultivo e os períodos de plantio com menor risco climático.

Tal deficiência na região nordeste implica numa demanda hídrica alta por irrigação para o cultivo da cana, especialmente durante eventos extremos, o que deve influenciar nos outros usos e tem o potencial para ampliar os conflitos e a necessidade urgente de adoção de princípios da Gestão Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) segundo a definição do Global Water Partnership<sup>10</sup> (GWP, 2000).

Dada a condição hídrica natural mais desfavorável do Nordeste o que vem sendo desenvolvida mais fortemente na região, desde a década de 90, é a gestão da oferta. Esta consiste de intervenções, como a construção de açudes e reservatórios, que são necessárias para atender não somente à população, mas também – dentre outros usos – à agricultura e suas práticas de irrigação, de considerável relevância para a manutenção dos cultivos, conforme mencionado no item 2.1.3. A importância dessas obras para a população e a economia da região foi demonstrada em um estudo realizado pela ANA entre 2014 e 2016 com 204 reservatórios. Mostrou-se que 198 deles atendem mais de 10 milhões de pessoas na zona rural e 51 são responsáveis pelo abastecimento de cerca de 50 mil hectares de área irrigável em 43 perímetros públicos (ANA, 2017a). No entanto, com a crise hídrica, o volume dos reservatórios ficou comprometido, uma vez que o índice de chuvas nos períodos úmidos de 2012 a 2016 foi considerado abaixo da média e, portanto, insuficiente para promover a recarga. Como consequência, em virtude da necessidade de atendimento dos usos múltiplos e essenciais da água, seus níveis encontram-se significativamente baixos (ANA, 2017). O estudo supracitado realizado pela Agência mostrou que cerca de 58% dos reservatórios analisados já apresentam problemas frequentes para abastecimento das demandas atuais ou operam no limite da sua capacidade.

Visando sanar os efeitos da sazonalidade em períodos mais longos, como décadas, na região mais recentemente vêm se investindo em grandes obras hidráulicas para transferências hídricas (INSA, 2011), como o Projeto de Integração do Rio São Francisco com as bacias hidrográficas do Nordeste Setentrional (PISF). Vale frisar, em particular, a potencialidade dos impactos do PISF para o estado de Pernambuco, através do Ramal do Agreste. Inteiramente

---

<sup>10</sup> “O processo que promove o desenvolvimento coordenado e o gerenciamento da água, do uso da terra e dos recursos relacionados a fim de maximizar o bem-estar social e econômico de uma forma equitativa, sem comprometer a sustentabilidade dos ecossistemas vitais.”

localizado neste estado (Figura 6), o ramal atravessa os municípios de Sertânia e Arcoverde, nos domínios das bacias hidrográficas dos rios Moxotó e Ipojuca e está previsto para captar 8 m<sup>3</sup>/s de água no Eixo Leste do PISF, beneficiando a região do Agreste, não somente os municípios de intervenção direta da obra, mas também aqueles de influência indireta, como Ipojuca, Moxotó, Ipanema, Goiana, Capibaribe, Sirinhaém, Mundaú, Una, Paraíba e Traipu (CRA/ENGEORPS, s.d.).

Figura 6 - Bacias Hidrográficas da área de influência indireta do Ramal do Agreste



Fonte: CRA/ENGEORPS (s.d.).

A infraestrutura hídrica visa à potencialização da oferta local, a fim de garantir o abastecimento humano, animal e industrial, a aquicultura e a irrigação até 2025. Como prognóstico ao empreendimento, por aumentar a oferta hídrica, é esperado que o mesmo forneça incentivos à expansão da agricultura. O projeto justifica-se na precariedade do suprimento de água bruta no Agreste pernambucano, em termos quali-quantitativos, visto que os corpos hídricos locais apresentam alto teor de salinidade e os reservatórios têm baixa capacidade de acumulação. Estima-se que as regiões do Agreste e Sertão, que correspondem a 90% da área do estado, representam apenas 20% do seu volume de água aproveitável (CRA/ENGEORPS, s.d.).

Essas obras de engenharia hídrica viabilizam e regularizam o suprimento do recurso, temporal e espacialmente, e constituem-se na já mencionada estratégia de gestão de oferta, extremamente necessária em Pernambuco, mas não suficiente. A baixa potencialidade hídrica do estado de Pernambuco, a menor do Brasil, impõe à gestão pública o desenvolvimento de políticas que tornem o uso da água mais eficiente, reduzam as perdas e priorizem os usos por setores econômicos que possam contribuir para um desenvolvimento social e econômico sustentável do estado numa estratégia de GIRH conhecida como gestão da demanda. Em economias de maturação da água, caracterizadas tanto pelo aumento da escassez quanto pelo aumento da quantidade de transferências de água, a gestão de demanda, através da otimização do seu uso, torna-se mais importante.

Uma mudança na disponibilidade hídrica da região Agreste, devido a melhorias na infraestrutura, pode ampliar a agricultura irrigada na região, especialmente diante de valores de cobrança para o setor, que não reflitam os custos de escassez do recurso. Por isso, é importante mensurar indicadores para os seus municípios tais como: aptidões agrícolas com irrigação e capacidades adaptativas a eventos extremos; sensibilidade social e vulnerabilidade sócioeconômica à ampliação do setor agrícola em relação ao setor de serviços, e outros.

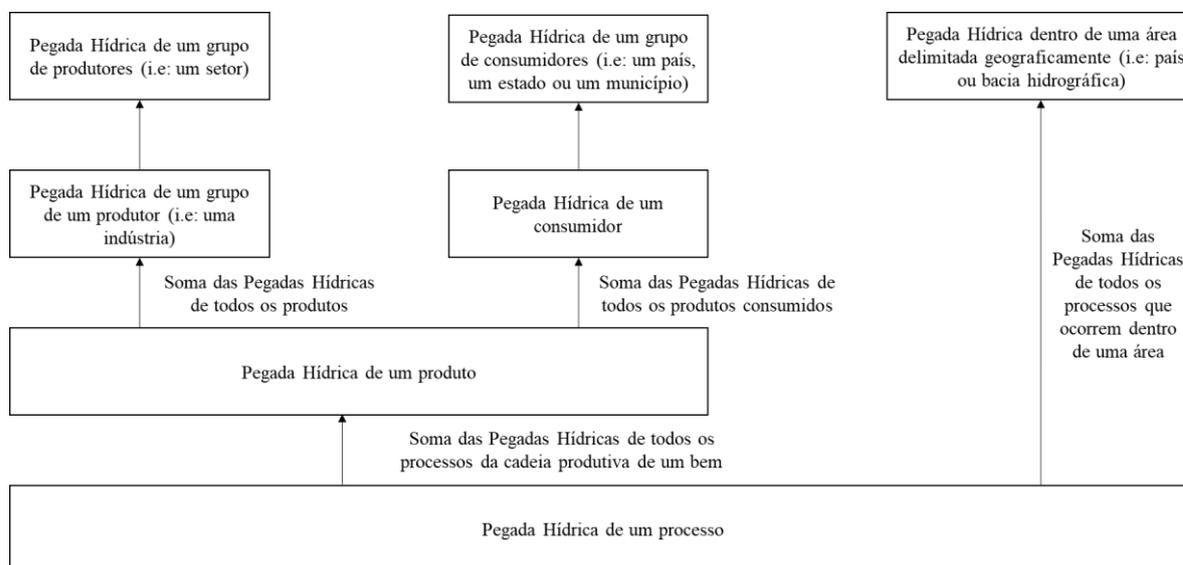
Este estudo pretende contribuir com medidas de consumo (pegada hídrica) e capacidade adaptativa a eventos extremos (mudanças no período anterior e posterior ao início da estiagem) da cana na bacia do Ipojuca e em suas diversas regiões, dado que a mesma possui importante produção da cultura, que requer os maiores volumes de água para a irrigação.

## 2.4 PEGADA HÍDRICA

O conceito da Pegada Hídrica (PH) foi desenvolvido a partir de 2002 por Arjen Hoekstra, visando introduzir um indicador de apropriação antrópica dos recursos hídricos, considerando tanto um consumo direto quanto indireto (CHAPAGAIN e HOEKSTRA, 2004). Estabelecia-se, então, uma forma simples de entender a relação entre o homem e o uso da água, de maneira abrangente, extrapolando a gestão dos recursos hídricos para um âmbito multi-regional. Define-se, portanto, Pegada Hídrica como o volume de água utilizada para produzir bens e serviços por consumidores que podem ser identificados como uma pessoa, um estado, um país, uma indústria ou uma bacia hidrográfica (HOEKSTRA *et. al.*, 2011). A pegada hídrica de cada tipo de consumidor se constitui da soma de outras pegadas hídricas. Como exemplo, a pegada hídrica de um produto pode ser entendida como a soma das pegadas hídricas dos

processos que fazem parte da produção; a de um produtor e de um consumidor, como a soma das pegadas dos produtos por ele produzidos e por ele consumidos (Figura 7).

Figura 7 - A cadeia das Pegadas Hídricas de processos, produtos, produtores, consumidores e regiões



Fonte: Hoekstra *et al.* (2011).

É importante ressaltar que, para desenvolver o conceito de Pegada Hídrica, Hoekstra, juntamente aos pesquisadores Huang e Chapagain, basearam-se no conceito de Água Virtual, apresentada em 1993 por Tony Allan. Segundo ele, a água virtual se refere à quantidade de água necessária para a produção de um certo produto; no entanto, esse uso relaciona-se fortemente aos fluxos de água embutidos nas importações e exportações de bens e serviços entre países e regiões. Allan ainda elucida que a troca de água virtual entre regiões poderia auxiliar na resolução de problemas geopolíticos ligados à escassez do recurso, proporcionando uma nova estratégia de gerenciamento (ALLAN, 1997). A diferença de abordagens também está no entendimento que o termo “pegada hídrica” é mais aplicado a consumidor e produtor, além de ser mais abrangente, visto que permite identificar não somente o volume consumido, mas também o tipo de água utilizado (azul, verde ou cinza) e onde e quando ocorreu o uso.

De acordo com a metodologia publicada no *Water Footprint Network Manual* (HOEKSTRA *et al.* 2011), a aplicação e o cálculo da Pegada Hídrica objetivam: a quantificação, no tempo e no espaço, da PH de uma área delimitada geograficamente; a análise da sustentabilidade na perspectiva ambiental, social e econômica, a partir do valor encontrado; a formulação de uma resposta estratégica, no âmbito da tomada de decisões. Os autores apresentam-na como uma ferramenta importante para esclarecer como uma atividade interage

com a escassez e a poluição das águas, os impactos causados e o que pode ser feito para evitar o uso indiscriminado do recurso.

Destaca-se a relevância da análise da pegada hídrica na agricultura, dada a grande importância do setor no consumo de água, por meio da irrigação<sup>11</sup>. Diversos estudos têm empregado esta análise para variados cultivos no Brasil. Ribeiro (2014) analisou a ferramenta para o cultivo da manga no semiárido, na região Submédio do Vale do São Francisco. Moura (2017) considerou a expansão da cana-de-açúcar destinada à produção de etanol no Cerrado e investigou seus impactos sobre os recursos hídricos. Silva (2018b) estimou a quantidade de água utilizada no cultivo de pimenta malagueta na região agreste do estado de Sergipe, dada sua importância econômica no estado. Kotsuka (2013), visando analisar o indicador como ferramenta de gestão dos recursos hídricos, em termos quali-quantitativos, conduziu um estudo de caso onde foram estimadas as pegadas hídricas da soja e seu óleo. Silva (2018a), por sua vez, aplicou a pegada hídrica ao cultivo da soja com o objetivo de verificar o impacto das mudanças climáticas sobre o uso da água neste cultivo, para diferentes cenários de médio e longo prazo.

Segundo Hoekstra *et al.* (2011), a pegada hídrica é subdividida em três categorias, de acordo com os tipos de uso da água, que são definidos como:

- (i) Água verde: consumo de água da chuva que não se torna escoamento superficial ou *run-off*;
- (ii) Água azul: consumo de água superficial ou subterrânea disponível;
- (iii) Água cinza: volume de água doce necessária para assimilar a carga de poluentes dadas as concentrações naturais do corpo hídrico e seus padrões de qualidade.

Dessa forma, a Pegada Hídrica Verde (PHverde) refere-se ao consumo da água oriunda da parcela da precipitação que, ao atingir a superfície, é aproveitada pelas plantas, sofrendo evapotranspiração, não sendo contabilizado o volume que infiltra ou escoam superficialmente. Em outras palavras, é a água da chuva que é armazenada no solo ou vegetação e é utilizada pelo cultivo em seu desenvolvimento. Este indicador é dependente, portanto, da precipitação local, da evaporação potencial e dos requisitos da cultura, sendo considerado o volume de água pluvial

---

<sup>11</sup> Segundo a WWAP (2015), a irrigação é a atividade dominante do consumo de água no mundo desde o ano 2000.

utilizado na produção. Trata-se da água da chuva evapotranspirada pelos cultivos, em termos agrícolas, ou incorporada nos produtos, em termos de processo (HOEKSTRA *et al.*, 2011).

A Pegada Hídrica Azul (PHazul), por sua vez, está relacionada à água doce superficial, como rios e lagos, ou subterrânea renovável ou subterrânea fóssil, consumida pelos seres humanos ou empregada para a produção de um bem (uso consuntivo). É o indicador da quantidade de água consumida durante um período, mas não recuperada, ou seja, a água incorporada no produto, evaporada ou que não retornou à mesma bacia hidrográfica, sendo, portanto, dependente de variáveis diretamente relacionadas ao ciclo hidrológico: precipitação, escoamento superficial, infiltração, evaporação. Pode também ser considerada a água que retorna à bacia em um período de tempo diferente, como aquela que é retirada em um período de seca e somente retorna no período de chuvas (HOEKSTRA *et. al*, 2011). Conforme os autores, em geral, a maior parcela deste uso consuntivo está ligada à evaporação.

A Pegada Hídrica Cinza (PHcinza), não avaliada neste estudo, é o indicador da contaminação resultante do processo produtivo, medindo o volume de água necessário para diluir uma certa carga de poluentes ao ponto de torná-los aceitáveis em termos da qualidade exigida por determinado corpo hídrico (HOEKSTRA *et. al*, 2011). Apesar da diluição da carga poluidora ser efetuada pela água azul dos rios, define-se água cinza por relacionar-se à poluição. É importante destacar também, no âmbito da sustentabilidade da pegada hídrica, a existência da relação direta entre a água poluída e a água responsável pela sua diluição – a água cinza (ALBUQUERQUE, 2013).

Dessa forma, somando-se os três tipos de água, obtém-se a pegada hídrica de um produto. No contexto, vale frisar que é possível obter uma análise ampliada das consequências da ação antrópica sobre os corpos hídricos quando se estabelece a essencial diferença entre as pegadas hídricas verde e azul, visto que os impactos hidrológicos, ambientais, sociais e econômicos divergem entre os dois tipos, sendo, em geral, maiores quando do uso de água azul (CHAPAGAIN e HOEKSTRA, 2004).

### 3 METODOLOGIA

Esta seção tem por objetivo apresentar as etapas que foram utilizadas para calcular a Pegada Hídrica da cana na bacia do Ipojuca, estado de Pernambuco. A princípio, o item 3.1 traz uma caracterização da área de estudo, em termos ambientais e econômicos. Posteriormente, nos itens 3.2 e 3.3, está pormenorizado o passo-a-passo para a estimativa da Pegada Hídrica dos municípios que compõem a bacia, com a descrição do modelo utilizado para o cálculo da evapotranspiração do cultivo agrícola da cana-de-açúcar. Por fim, o item 3.4 apresenta a estatística empregada para avaliação dos impactos da seca na PH.

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo selecionada foi a Bacia do Ipojuca (Figura 8), pertencente ao estado de Pernambuco e, cuja área de abrangência compreende 3.433,58 km<sup>2</sup>, tendo parte dos espaços territoriais de 24 municípios, dentre os quais 12 possuem sua sede dentro da bacia. Os quatro principais que possuem maiores porcentagens de suas áreas pertencentes à bacia são, em ordem decrescente: Sanharó (95,13%), Poção (89,40%), Primavera (81,96%) e Chã Grande (81,86%) (Tabela 6). No entanto, Pesqueira e Caruaru apresentam as maiores áreas abrangidas pela bacia – 606,79 km<sup>2</sup> e 387,62 km<sup>2</sup>, respectivamente (CONDEPE/FIDEM, 2005).

Figura 8 - A bacia hidrográfica do rio Ipojuca e sua divisão por mesorregiões



Fonte: SRHE (s.d.).

A bacia possui uma população residente estimada em 1.149.508 habitantes e tem como rio principal o Ipojuca, que nasce na Serra do Pau d'Arco, município de Arcoverde, e percorre o sentido oeste-leste do estado, dando à bacia uma posição de eixo hídrico de ligação entre a Região Metropolitana do Recife e o Sertão do estado. Este alongamento também resulta na passagem da bacia por três regiões geográficas do estado: o Sertão – através de uma pequena porção do município de Arcoverde –, o Agreste e a Zona da Mata Pernambucana, tornando-a uma bacia com diferentes características ambientais em sua extensão (CONDEPE/FIDEM, 2005).

Tabela 6 - Municípios que compõem a bacia do Ipojuca e suas respectivas áreas drenadas.

Mesorregião Geográfica	Município	Área	
		Total (km <sup>2</sup> )	Pertencente à bacia (%)
Sertão	Arcoverde	380,60	27,35
Agreste	Alagoinha	180,10	30,32
	Belo Jardim	653,60	35,33
	Bezerros	545,70	41,59
	Cachoeirinha	183,20	0,99
	Caruaru	932,00	41,59
	Gravatá	491,50	34,39
	Pesqueira	1.036,00	58,57
	Poção	212,10	89,40
	Riacho das Almas	313,90	2,61
	Sanharó	247,50	95,13
	São Bento do Una	715,90	9,80
	São Caetano	373,90	70,17
	Tacaimbó	210,90	62,50
	Venturosa	326,10	0,68
	Altinho	452,60	1,48
	Sairé	198,70	38,19
	Chã Grande	83,70	81,86
Pombos	236,10	28,17	
Zona da Mata	Vitória de Santo Antão	345,70	11,51
	Amaraji	238,80	25,50
	Escada	350,30	58,16
	Primavera	96,50	81,96
Região Metropolitana	Ipojuca	514,80	29,30

Fonte: CONDEPE/FIDEM (2005).

Em termos econômicos, a bacia drena municípios de porte médio que atuam como pólos de desenvolvimento regionais e locais, como Belo Jardim, Caruaru, Ipojuca, Primavera e Escada. A cana-de-açúcar é um cultivo representativo, principalmente na Zona da Mata,

ocupando uma área de 19,02% da bacia, uma vez que alguns municípios drenados por suas águas se sobressaem entre as maiores produções do estado, como Ipojuca, Escada e Vitória de Santo Antão, sendo esta, portanto, a segunda maior classe de uso e ocupação do solo (IBGE, 2017a; CONDEPE/FIDEM, 2005). Analisando a sua economia pelas regiões geográficas, é possível observar diferenças entre as mesmas. Na Zona da Mata e faixa litorânea o grande destaque está no Complexo Industrial e Portuário de Suape, localizado no município de Ipojuca, que, dentre as indústrias instaladas, possui a sucroalcooleira, com as Usinas Ipojuca, União e Indústria e Salgado, que parou de operar em 2011. Juntas, as três moeram cerca de 2.105.058 toneladas de cana neste mesmo ano, segundo dados do Sindaçúcar (Sindicato da Indústria do açúcar e do álcool do estado de Pernambuco). Outras atividades desta região são o turismo rural e a floricultura e fruticultura. No Agreste, a indústria de confecção de roupas, representada principalmente pelo município de Caruaru, movimenta a economia juntamente com o turismo de lazer durante períodos festivos, como o São João. A movimentação neste município impulsiona seus vizinhos, que se baseiam principalmente na exploração agrícola. Ademais, a pecuária bovina leiteira e de corte também é representativa na região, por meio dos municípios de Sanharó, Cachoeirinha, São Bento do Una e Belo Jardim. Destaque para a avicultura em Belo Jardim, cuja criação é a segunda maior do estado (IBGE, 2017b). Na porção pertencente ao Sertão, representada pelo município de Arcoverde, verifica-se a predominância da pecuária bovina e caprina de corte, além da agricultura de subsistência.

A Tabela 7 apresenta a participação do PIB dos municípios pertencentes à bacia e dos seus Valores Adicionados Brutos (VABs)<sup>12</sup>, respectivamente, no PIB e VAB estadual em 2017. Ipojuca é o de maior atuação no PIB, com 5,99%, seguido de Caruaru (3,79%) e Vitória de Santo Antão (2,03%). Em relação aos setores econômicos, São Bento do Una é o município onde a agropecuária tem a maior participação, enquanto que Ipojuca contribui em 14,69% no VAB do setor industrial e Caruaru possui a maior contribuição no setor de serviços.

---

<sup>12</sup> Segundo o IBGE, é o valor que a atividade agrega aos bens e serviços consumidos no seu processo produtivo. É a contribuição ao Produto Interno Bruto pelas diversas atividades econômicas.

Tabela 7 - Participação (%) do Produto Interno Bruto (PIB) e dos Valores Adicionados Brutos (VABs) dos municípios da bacia do Ipojuca nos respectivos resultados para o estado de Pernambuco em 2017\*

Município	Participação no PIB estadual (%)*	Participação no VAB estadual (%)		
		Agropecuária	Indústria	Serviços
Alagoinha (PE)	0,07	0,32	0,01	0,04
Altinho (PE)	0,08	0,2	0,02	0,05
Amaraji (PE)	0,12	0,73	0,02	0,07
Arcoverde (PE)	0,54	0,16	0,19	0,67
Belo Jardim (PE)	0,99	2,32	1,88	0,61
Bezerros (PE)	0,39	0,49	0,26	0,37
Cachoeirinha (PE)	0,11	0,45	0,02	0,09
Caruaru (PE)	3,79	1,6	2,45	4,74
Chã Grande (PE)	0,11	0,36	0,03	0,08
Escada (PE)	0,48	1,01	0,55	0,37
Gravatá (PE)	0,59	0,51	0,33	0,64
Ipojuca	5,99	0,53	14,69	3,86
Pesqueira (PE)	0,38	0,45	0,22	0,34
Poção (PE)	0,05	0,07	0,01	0,03
Pombos (PE)	0,2	0,45	0,12	0,18
Riacho das Almas (PE)	0,09	0,25	0,02	0,06
Sairé (PE)	0,08	0,78	0,02	0,05
Sanharó (PE)	0,11	0,32	0,02	0,07
São Bento do Una (PE)	0,52	8,37	0,13	0,19
São Caitano (PE)	0,19	0,41	0,12	0,15
Tacaimbó (PE)	0,07	0,33	0,04	0,04
Venturosa (PE)	0,11	0,32	0,17	0,06
Vitória de Santo Antão (PE)	2,03	1,26	2,82	1,94

Fonte: IBGE (2017).

\*Referência 2010.

Quanto ao consumo de água, a bacia possui uma demanda por água bruta de 92,8 milhões de metros cúbicos de água por ano, sendo 53,9% requerido pela agricultura, 25,9% por indústrias, 17,5% pelo setor de água e esgoto, 1% pela pecuária, pesca e aquicultura e 1,7% por outros fins. Especialmente acerca do requerido pela agricultura, dos 50 milhões de m<sup>3</sup>/ano requeridos, 49,5 milhões m<sup>3</sup>/ano são para a irrigação da cana-de-açúcar. Em comparação com as demais bacias com as quais é interligada – Capibaribe, Sirinhaém e Una –, é a que demanda menor volume hídrico (92,8 milhões de m<sup>3</sup>/ano). No entanto, seu setor industrial é o segundo maior requisitante entre elas, precedido pela bacia do Sirinhaém (SANTOS, 2020).

Dada a passagem por três regiões geográficas, as características climáticas da bacia são diversificadas, o que implicam em diferentes paisagens ao longo da sua extensão. Os extremos

são o Sertão, na parte superior, de clima semiárido – quente e seco –, e a Zona da Mata, na porção inferior, de clima quente e úmido. O Agreste, por posicionar-se intermediariamente, apresenta aspectos mesclados de ambas as regiões ao longo dos seus municípios. A pluviosidade se intensifica à medida que o rio se aproxima do litoral, característica cuja consequência pode ser visualizada no fluxo do rio, que é intermitente até o médio curso e torna-se perene a partir do município de Caruaru. Dessa forma, a Zona da Mata e o litoral são responsáveis pelos maiores índices de umidade, apresentando precipitações anuais médias superiores a 1000 mm e 2000 mm, respectivamente, com as chuvas concentradas entre os meses de março e agosto. A presença do Planalto da Borborema próximo aos municípios de Chã Grande e Gravatá implica as diferenças climáticas do Agreste, que, por sua vez, apresenta médias pluviométricas que podem ser inferiores a 600 mm em alguns municípios. É nesta região que se inicia o polígono das secas, que se estende no sentido do Sertão, caracterizado pela presença de longas estiagens (SALGUEIRO, 2005).

A vegetação relaciona-se diretamente às condições climáticas, observando-se a presença dos manguezais no litoral e a predominância da floresta tropical atlântica na Zona da Mata, da caatinga no sentido leste-oeste, bem como das matas serranas nas áreas de altitudes mais elevadas. Portanto, em sua maior extensão, a bacia do Ipojuca é composta de plantas xerófilas, decíduas, como cactos e bromélias (CONDEPE/FIDEM, 2005).

O relevo da bacia é crescente à medida que se adentra o estado. Na parte leste – Zona da Mata e litoral –, as altitudes não ultrapassam 100 m devido à presença da planície costeira. No entanto, o corte geográfico realizado pelo citado Planalto da Borborema resulta em altitudes entre 400 e 700 m no sentido oeste. Altitudes que variam de 800 a 1000m podem ser observadas nos municípios de Belo Jardim, Sanharó e Pesqueira, mais próximos ao Sertão. Em relação à geologia, a estrutura cristalina ocupa 97% da área da bacia (SALGUEIRO, 2005).

Quanto à pedologia, nos trechos superior, médio e sub-médio, os solos predominantes são os Planossolos, Neossolos Regolíticos, Argissolos, enquanto que no trecho inferior, além destes últimos, a composição por Latossolos é significativa. Os Planossolos representam 31,32% da bacia, com presença nos relevos mais suaves e planos, são de baixa permeabilidade e suscetíveis à erosão, com dureza excessiva, que prejudica a mecanização. Os Neossolos Regolíticos, característicos do Agreste, ocupam uma área correspondente a 20,28%, são arenosos e de profundidade média a alta. É importante frisar a presença de cultivos neste solo, apesar das suas características e fertilidade variável. Os Argissolos ocupam 26,19% da bacia e distribuem-se por toda a sua superfície. Tem como principal característica o teor de argila, que aumenta com a profundidade, a qual pode variar de baixa a alta. São ácidos e possuem baixa

fertilidade natural, o que requer adubação e calagem para a utilização agrícola. Apresentam-se predominantemente em relevo movimentado, acarretando impedimentos à mecanização e riscos à erosão; contudo, quando em relevo plano, são explorados com agricultura irrigada, devido a dificuldades na drenagem interna associada à permeabilidade. Os Latossolos estão em 4,51% da superfície da bacia, são de textura argilosa, muito profundos e, por sua vez, são considerados de excelentes condições físicas – visto que são pouco suscetíveis à erosão, por ocorrerem, em geral, em relevos planos ou pouco acidentados –, possuem boa drenagem e são macios. São, portanto, os mais aproveitados para agricultura irrigada, apesar da baixa fertilidade, o que pode ser corrigido com o emprego de fertilizantes (SANTOS, 2017; SRH, 2010; CONDEPE/FIDEM, 2005).

### 3.2 CÁLCULO DA PEGADA HÍDRICA DA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR

A metodologia utilizada para o cálculo da Pegada Hídrica da cana-de-açúcar baseou-se nas recomendações de Hoekstra *et al.* (2011) para cultivos agrícolas, descritas no *The Water Footprint Assessment Manual*.

#### 3.2.1 Pegada Hídrica Verde

Segundo os autores, a pegada hídrica verde ( $m^3/t$ ) relativa ao desenvolvimento de uma cultura é calculada através da Equação 1.

$$PH_{verde} = \frac{C_{verde}}{Y} \quad (1)$$

Onde:

$C_{verde}$  = Consumo de água verde pela cultura ( $m^3/ha$ );

$Y$  = produtividade da cultura ( $t/ha$ ).

O consumo de água verde ( $C_{verde}$ ) é função da evapotranspiração diária (ET) durante o período de crescimento completo, conforme Equação 2.

$$C_{verde} = \alpha \sum_{d=1}^{dpc} ET_{verde} \quad (2)$$

Onde:

$\alpha$  = fator de conversão<sup>13</sup>;

dpc = duração do período de crescimento (dias);

d = dia do plantio;

ETverde = evapotranspiração da água verde (mm/dia);

Dessa forma, Cverde representa a quantidade total de água pluvial evaporada da área durante todo o tempo de crescimento da cultura. O fator de conversão  $\alpha=10$  é empregado a fim de converter volumes de água por superfície terrestre em m<sup>3</sup>/ha. De modo a obter o consumo durante todo o desenvolvimento, somam-se todos os volumes resultantes de evapotranspiração desde o primeiro dia do plantio (d=1) até o dia da colheita.

### 3.2.2 Pegada Hídrica Azul

A pegada hídrica azul (m<sup>3</sup>/t) do processo de desenvolvimento de uma cultura agrícola é calculada pela Equação 3.

$$PH_{azul} = \frac{C_{azul}}{Y} \quad (3)$$

Onde:

Cazul = Consumo de água azul pela cultura (m<sup>3</sup>/ha);

Y = produtividade da cultura (t/ha).

Da mesma forma que para a pegada hídrica verde, o consumo de água azul (Cazul) também é resultado do somatório da evapotranspiração diária (ET) durante o período de crescimento completo, como mostra a Equação 4.

$$C_{azul} = \alpha \sum_{d=1}^{dpc} ET_{azul} \quad (4)$$

Onde:

$\alpha$  = fator de conversão (10);

dpc = duração do período de crescimento (dias);

---

<sup>13</sup> Fator que converte a altura da água em milímetros (mm para volume de água na superfície do solo) em metros cúbicos por hectare (m<sup>3</sup>/ha).

d = dia do plantio;

ET<sub>azul</sub> = evapotranspiração da água azul (mm/dia);

O C<sub>zul</sub> refere-se ao volume total de água evaporada proveniente de irrigação sobre uma determinada área. É importante ressaltar que esta pegada hídrica se refere somente ao crescimento da cultura, não englobando, portanto, as etapas anteriores, como o armazenamento em reservatórios e transporte de água em canais para irrigação, cujas pegadas hídricas são calculadas separadamente, segundo Hoekstra *et al.* (2011).

### 3.3 CÁLCULO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR

#### 3.3.1 O modelo *Cropwat*

Conforme as Equações 1 e 3, as pegadas hídricas verde e azul dependem diretamente da evapotranspiração da cultura. Neste âmbito, o CROPWAT 8.0 é o *software* desenvolvido pela FAO (*Food and Agriculture Organization*) que permite calcular a evapotranspiração verde e azul durante o crescimento da cultura. Para este cálculo, foi utilizada a opção “calendário de irrigação” do modelo, que calcula a evapotranspiração durante todo o período de crescimento sob condições ideais ou não-ideais, por meio da inclusão de um balanço hídrico no solo. Por esta razão, para a obtenção do resultado, são necessários também dados relativos ao solo, ao clima e ao cultivo. A segunda opção oferecida pelo modelo é a “demanda hídrica da cultura” (DHC), mais simples e menos precisa, considera condições ideais desde o plantio até a colheita, isto é, a quantidade de água suficiente para o solo é mantida através da chuva e/ou da irrigação, de modo que o crescimento da planta não seja limitado. Para o cálculo, são necessários apenas dados referentes ao clima e à cultura (HOEKSTRA *et al.*, 2011).

Este *software* é utilizado para o cálculo da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), o qual baseia-se no método de Penman-Monteith, recomendado pela FAO (ALLEN *et al.*, 1998), para o qual são necessários dados mensais de temperatura, umidade, velocidade do vento e insolação. Uma vez que considera o suprimento de chuvas durante o período de crescimento de uma determinada cultura, é um modelo desenvolvido para ser utilizado para práticas e planejamento de irrigação, visto que retorna ao usuário a quantidade de água necessária para a cultura durante todo o período de plantio (FAO, 2010).

Desta forma, de maneira geral, os dados necessários para o processamento do *software* são apresentados na Tabela 8. Aspectos climatológicos, da própria cultura e do solo onde ocorrerá o cultivo são fatores que influenciam diretamente a quantidade de água que passará para a atmosfera em forma de vapor pelo solo e pela planta, ou seja, por evapotranspiração (ETverde e ETazul), e conseqüentemente, têm efeito na quantidade de água que a cultura necessitará para seu desenvolvimento (Cverde e Cazul).

Tabela 8 - Variáveis de entrada no Cropwat 8.0 para cálculo da evapotranspiração.

<b>Componente</b>	<b>Variável</b>
Clima	Temperatura máxima e mínima (°C)
	Umidade relativa (%)
	Velocidade do vento (m/s)
	Insolação (horas)
	Precipitação (mm)
Cultura	Data de plantio
	Coefficiente de cultura (kc)
	Duração dos estágios de crescimento (dias)
	Profundidade da raiz (m)
	Índice de esgotamento
	Fator de resposta
Solo	Altura de crescimento (m)
	Capacidade de água disponível (mm/m)
	Taxa máxima de infiltração (mm/dia)
	Profundidade máxima da raiz (cm)
Irrigação	Depleção inicial da umidade do solo (%)
	Início do plantio
	Eficiência de irrigação (%)
	Momento (quando atinge o índice de depleção crítico)
	Forma de aplicação (umedecer até a capacidade de campo)

Fonte: A autora, 2020.

### 3.3.2 Dados utilizados

Neste estudo, foram calculadas as pegadas hídricas verde e azul dos 13 municípios da bacia do Ipojuca produtores de cana-de-açúcar, segundo dados da Produção Agrícola Municipal de 2017 do IBGE, os quais pertencem às mesorregiões Agreste e Zona da Mata, sendo eles: Amaraji, Bezerros, Caruaru, Chã Grande, Escada, Gravatá, Ipojuca, Pombos, Primavera, Riacho das Almas, Sairé, São Caetano e Vitória de Santo Antão. Visando realizar uma análise temporal da seca de 2012 e seus impactos sobre as pegadas hídricas da cultura na bacia, os cálculos foram realizados para o período 2007 a 2016.

Os dados climáticos, descritos nos Apêndices A e B, foram provenientes de duas estações meteorológicas do INMET mais próximas aos municípios analisados, localizadas em Surubim, no Agreste, e em Recife, na Zona Metropolitana, que representou os municípios da Zona da Mata. Esta escolha permitiu propiciar mais fidedignidade ao modelo, dadas as condições climatológicas peculiares de cada mesorregião e, por conseguinte, dos municípios inseridos em cada uma delas. As características de cada estação, bem como a divisão dos municípios entre elas, para fins de entrada de dados no Cropwat, estão apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 - Área de influência das estações meteorológicas de Surubim e Recife Curado nos municípios da bacia do Ipojuca.

<b>Estação meteorológica</b>	<b>Município</b>
<b>SURUBUM – PE</b> - Código: OMM 82797 - Mesorregião: Agreste - Latitude (graus): -7,83 - Longitude (graus): - 35,71 - Altitude (metros): 418,32	Bezerros Caruaru Chã Grande Gravatá Pombos Riacho das Almas Sairé São Caetano
<b>RECIFE CURADO – PE</b> - Código: OMM 82900 - Mesorregião: Zona da Mata - Latitude (graus): -8,05 - Longitude (graus): -34,95 - Altitude (metros): 10	Amaraji Escada Ipojuca Primavera Vitória de Santo Antão

Fonte: A autora, 2020.

Em relação ao cultivo, considerou-se a cana soca com ciclo de 320 dias, com início de ciclo em 01 de outubro. Os dados para este componente, relacionados na Tabela 8, são apresentados no Apêndice C e foram provenientes da literatura, por meio de Silva (2013), Silva (2012), Allen *et al.* (1998) e Sabadin (2013). Considerou-se o método de irrigação por sulcos abertos, mais tradicional, com eficiência mínima de 65% (ANA, 2013). Quanto à estratégia de irrigação, assumiu-se que a mesma ocorreria quando o índice de depleção fosse crítico e que o solo seria umedecido até a capacidade de campo. Desse modo, presume-se que a irrigação ‘ideal’ é que ocorre em intervalos máximos, ao mesmo tempo em que evita qualquer estresse da cultura (HOEKSTRA *et al.*, 2011).

Para os dados de solo, descritos no Apêndice C, utilizou-se como base o Mapa de Solos do Plano Hidroambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca (SRH, 2010a) para a definição

da predominância do tipo de solo nas mesorregiões Agreste e Zona da Mata, a Portaria nº 24, de 23 de abril de 2018<sup>14</sup>, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 2018) e dados provenientes do Cropwat. Assumiu-se, portanto, que os dados de entrada deste componente para os municípios inseridos no Agreste correspondem ao de um solo médio (Tipo 2) e a um de textura argilosa (Tipo 3) para os pertencentes à Zona da Mata, segundo a referida Portaria.

Para as produtividades, obteve-se um valor médio para cada região – 46,42 t/ha e 50,83 t/ha para o Agreste e a Zona da Mata, respectivamente –, calculado a partir dos dados da Pesquisa Agrícola Municipal realizada pelo IBGE para o período de trinta anos de 1987 a 2016. Portanto, foi utilizada esta constante (a média) para o referido parâmetro ao longo dos dez anos, para os quais foram obtidas as estimativas de pegada hídrica. Dessa forma, o denominador utilizado na pegada hídrica procurou representar o potencial produtivo médio (t/ha) de cada região usando todos os anos em que havia dados (1987-2016), procurando assim torná-lo mais imune a condições específicas de manejo em cada ano. Já o numerador, que mensura a demanda hídrica da planta em função das condições climáticas e do método de irrigação usou os dados ano a ano no período estudado (2007-2016).

#### 3.4 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DOS FATORES CLIMÁTICOS NOS COMPONENTES DA PEGADA HÍDRICA

De modo a identificar o impacto dos fatores climáticos na Pegada Hídrica da cana-de-açúcar, foi realizada a análise de correlação de Pearson para os dois conjuntos de dados presentes no Apêndice D, previamente calculados para o intervalo de 10 anos, de 2007 a 2016, do Agreste e da Zona da Mata. A avaliação estatística foi efetuada por meio do *software* Statistica 7.0, com nível de confiança de 95%, onde os coeficientes de correlação  $r$  foram calculados entre os fatores precipitação, temperatura máxima, temperatura mínima, insolação, umidade relativa, velocidade do vento e os componentes ETverde, ETazul, ETcultivo, PHverde e PHazul. A classificação quanto à força de correlação obedeceu aos seguintes intervalos:

- $r \leq 0,3$ : correlação fraca;
- $0,3 < r < 0,7$ : correlação moderada;
- $r \geq 0,7$ : correlação forte.

---

<sup>14</sup> Aprova o Zoneamento Agrícola de Risco Climático para a cultura de cana-de-açúcar, com irrigação de salvação, no Estado de Pernambuco.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados os principais resultados obtidos neste estudo e as contribuições pertinentes.

### 4.1 EVOLUÇÃO DAS PEGADAS HÍDRICAS NA BACIA DO IPOJUCA NO PERÍODO DE 2007 A 2016

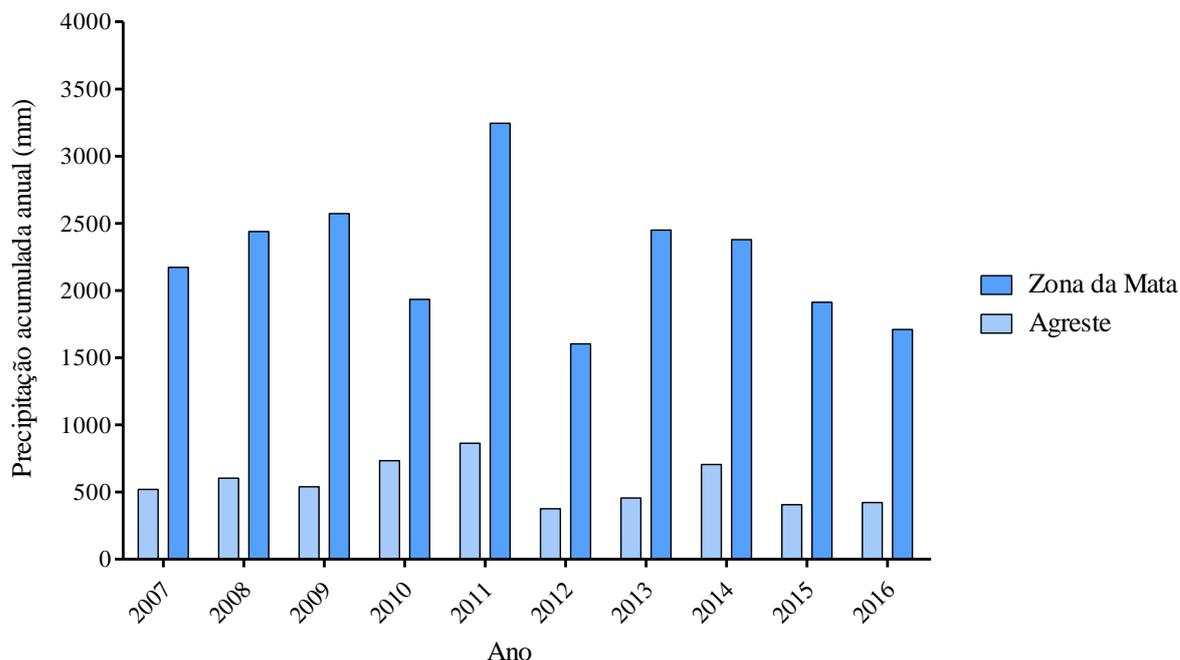
Os resultados para os dez anos estudados (2007-2016) mostraram que a pegada hídrica total estimada dos municípios pertencentes ao Agreste tende a ser sempre maior que a dos que compõem a Zona da Mata (média de 363,59 m<sup>3</sup>/t e 229,37 m<sup>3</sup>/t, respectivamente). Esta menor água demandada indica as melhores condições edafoclimáticas da Zona da Mata para o cultivo da cana, em termos hídricos. Sendo essa cultura altamente demandante de água – entre 1500 a 2000 mm ao longo de todo ciclo (ROCHA, 2001<sup>15</sup> *apud* ALBUQUERQUE, 2012) –, pode-se inferir que esta diferença deve-se a uma maior umidade na Zona da Mata (Figura 9), o que diminui a evapotranspiração e a necessidade de irrigação para atender a elevada exigência de água pela cana-de-açúcar. Considera-se também, na mesorregião da Zona da Mata, a predominância de solos de textura média a argilosa, como os latossolos (SRH, 2010), com suas características de maior profundidade e drenagem, que favorecem o desenvolvimento da cultura.

É possível notar, pela Tabela 10, que o menor favorecimento à cultura em regiões mais interiores da bacia do Ipojuca (Agreste) também reflete-se na produção, em toneladas, assim como na área colhida, em hectares, ou seja, nas produtividades, que se diferenciam significativamente das obtidas na Zona da Mata, região bem mais produtiva, segundo dados do IBGE. Em um período de 30 anos, segundo dados desse instituto, a média calculada para o Agreste foi 345.079 toneladas em 7.544 hectares, enquanto que a Zona da Mata produziu 2.466.677 toneladas em 48.232 hectares.

---

<sup>15</sup> ROCHA, F. C. S. *Avaliação da eficiência técnica e análise financeira de um plantio comercial de cana-de-açúcar, Saccharum officinarum L., microirrigado por gotejamento subsuperficial*. Fortaleza: UFC, 2001. Dissertação de Mestrado.

Figura 9 - Variação temporal da precipitação acumulada (mm) por região de 2007 a 2016.



Fonte: INMET, 2020.

Conforme a Tabela 11, em termos gerais, a pegada hídrica total das regiões pertencentes ao Agreste e à Zona da Mata não sofreu grandes variações após o início da crise hídrica, em 2012. Considerando os dois períodos, de 2007 a 2011 e de 2012 a 2016, a PH<sub>total</sub> aumentou em ambas as regiões – 2,16% no Agreste e 0,8% na Zona da Mata. Analisando os dez anos estudados, no Agreste, o valor da pegada hídrica total teve o seu mínimo (336,6 m<sup>3</sup>/t) em 2011, que foi o ano mais chuvoso no período estudado, e o máximo em 2012, o ano do início da seca, quando foi estimada em 379,9 m<sup>3</sup>/t, um aumento de cerca de 12,8% em um ano. Paralelamente, para a Zona da Mata, o menor requerimento também ocorreu em 2011 (215,51 m<sup>3</sup>/t), com um pico de 238,46 m<sup>3</sup>/t em 2015. A Figura 10 apresenta o comportamento da PH<sub>total</sub> ao longo dos anos nas duas regiões.

Tabela 10 - Quantidade produzida, área colhida e produtividade por região, de 1987 a 2016

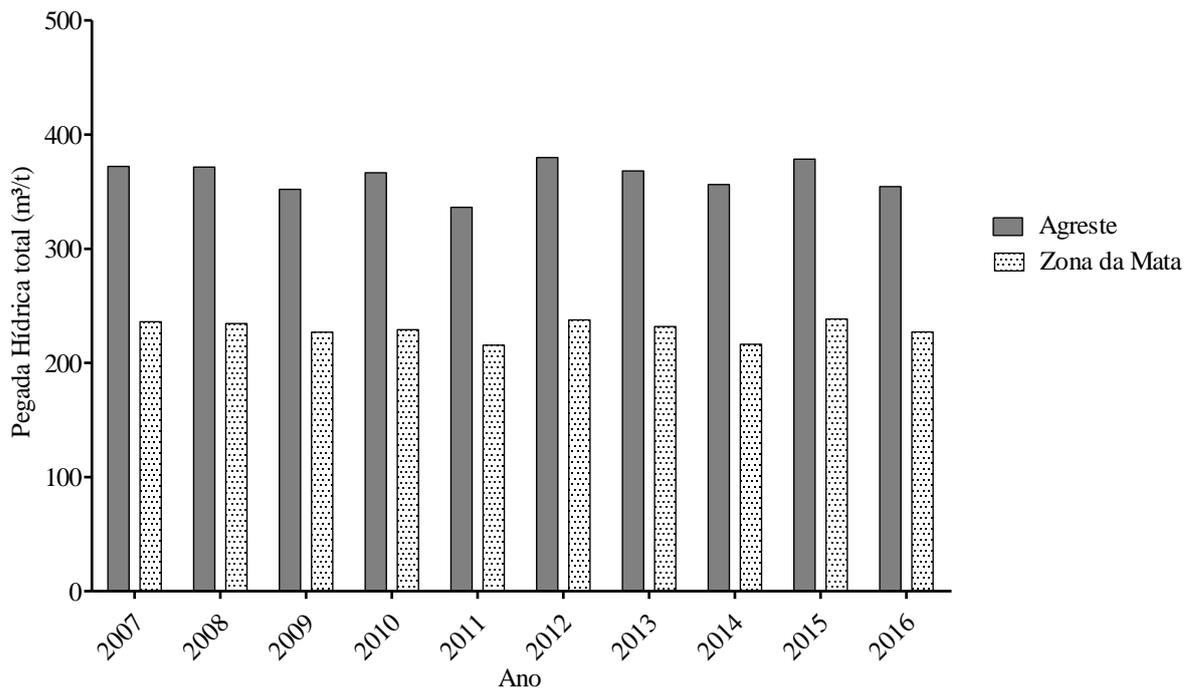
Ano	Agreste			Zona da Mata		
	Quantidade produzida (t)	Área colhida (ha)	Produtividade (t/ha)	Quantidade produzida (t)	Área colhida (ha)	Produtividade (t/ha)
1987	447.100	10.705	41,77	3.006.030	52.525	57,23
1988	391.740	9.306	42,10	3.309.400	59.050	56,04
1989	512.180	10.304	49,71	3.641.630	62.640	58,14
1990	492.180	9.904	49,70	3.856.080	65.490	58,88
1991	510.287	10.302	49,53	3.940.000	64.500	61,09
1992	512.225	10.305	49,71	4.162.000	67.600	61,57
1993	190.724	8.305	22,96	1.731.430	52.100	33,23
1994	279.400	6.250	44,70	2.604.744	53.440	48,74
1995	476.550	10.030	47,51	2.757.560	56.700	48,63
1996	445.750	9.040	49,31	3.227.649	62.943	51,28
1997	406.770	9.310	43,69	2.809.600	59.100	47,54
1998	382.980	8.760	43,72	2.309.600	49.500	46,66
1999	345.480	7.260	47,59	1.998.400	42.500	47,02
2000	355.000	4.600	77,17	2.484.000	48.930	50,77
2001	188.018	4.601	40,86	2.040.000	57.000	35,79
2002	216.518	4.821	44,91	2.760.000	53.800	51,30
2003	209.780	4.672	44,90	2.907.500	56.800	51,19
2004	146.690	3.144	46,66	2.686.560	52.072	51,59
2005	142.445	2.893	49,24	2.576.556	51.754	49,78
2006	124.325	2.523	49,28	1.840.800	34.600	53,20
2007	124.325	2.523	49,28	1.840.800	34.600	53,20
2008	86.370	1.826	47,30	2.206.800	43.400	50,85
2009	86.370	1.826	47,30	1.893.408	35.696	53,04
2010	529.778	11.622	45,58	1.689.408	33.696	50,14
2011	506.722	10.963	46,22	1.209.660	22.272	54,31
2012	491.283	10.121	48,54	1.453.490	31.148	46,66
2013	431.755	9.723	44,41	1.675.990	34.518	48,55
2014	446.765	10.223	43,70	1.597.500	33.500	47,69
2015	446.755	10.223	43,70	1.782.500	35.000	50,93
2016	426.100	10.220	41,69	2.001.200	40.100	49,91
<b>Média</b>	<b>345.079</b>	<b>7.544</b>	<b>46,42</b>	<b>2.466.677</b>	<b>48.232</b>	<b>50,83</b>

Fonte: Adaptado da Pesquisa Agrícola Municipal (IBGE).

Tabela 11 - Variação percentual da PH total nos anos pós seca para o Agreste e a Zona da Mata

Período (anos)	PH total (m <sup>3</sup> /t)	
	Agreste	Zona da Mata
2007-2011	359,7	228,4
2012-2016	367,5	230,3
<b>Variação</b>	<b>+2,16%</b>	<b>+0,8%</b>

Fonte: A autora, 2020.

Figura 10 - Variação da pegada hídrica total (m<sup>3</sup>/t) para o Agreste e a Zona da Mata do período de 2007 a 2016

Fonte: A autora, 2020.

A análise específica para cada tipo de pegada hídrica neste estudo demonstra uma alteração mais significativa ao longo dos anos nas regiões, identificada mais facilmente através das contribuições individuais das águas verde e azul sobre a pegada hídrica total. Para o Agreste (Tabela 12), a PHverde respondia por 31,8% da PHtotal no período 2007-2011. A partir de 2012, sua participação apresentou um decréscimo em quatro dos cinco anos, com um mínimo em 2012 (18,7%) e um pico em 2014 (32,9%), tendo sido estes os anos de menor e maior pluviosidade acumulada entre 2012 e 2016 (376,9 mm e 704,4 mm, respectivamente), conforme pode ser visualizado na Figura 9. Em oposição, a PHazul teve sua maior participação em 2012 e a menor em 2014. Em comparação ao período anterior a 2012 (68,2%), observa-se que a necessidade do uso de água azul aumentou.

Tabela 12 - Contribuições por tipo de água (verde e azul) em relação à PH total ao longo dos anos, na região do Agreste

Ano	PH total (m <sup>3</sup> /t)	PH verde (m <sup>3</sup> /t)	Participação na PH total	PH azul (m <sup>3</sup> /t)	Participação na PH total
<b>2007 - 2011</b>	<b>359,7</b>	<b>114,3</b>	<b>31,8%</b>	<b>245,5</b>	<b>68,2%</b>
2012	379,9	70,9	18,7%	309,03	81,3%
2013	368,2	87,4	23,7%	280,76	76,3%
2014	356,2	117,2	32,9%	239,01	67,1%
2015	378,6	81,6	21,6%	296,94	78,4%
2016	354,4	80,2	22,6%	274,15	77,4%

Fonte: A autora, 2020.

Para a Zona da Mata (Tabela 13), o comportamento das pegadas hídricas foi semelhante, no entanto, em dois anos apenas, 2014 e 2015, a PHverde atingiu picos (contribuições de 88,3% e 88,7%, respectivamente) e a PHazul decresceu, em consequência (11,7% e 11,3%, respectivamente). Em outras palavras, PHverde, que respondia por 81,1% da PHtotal decresceu em três dos cinco anos, enquanto que a PHazul, que contribuía com 18,9%, aumentou nos mesmos anos. Identifica-se, nesse sentido, que a resposta das pegadas hídricas foi diferente para o Agreste e a Zona da Mata, possivelmente devido à divergência do efeito da seca entre as regiões, discutida adiante, refletida nos fatores climáticos e no impacto dos mesmos sobre as pegadas, hipótese abordada no item 4.3.

Tabela 13 - Contribuições por tipo de água (verde e azul) em relação à PH total ao longo dos anos, na região da Zona da Mata.

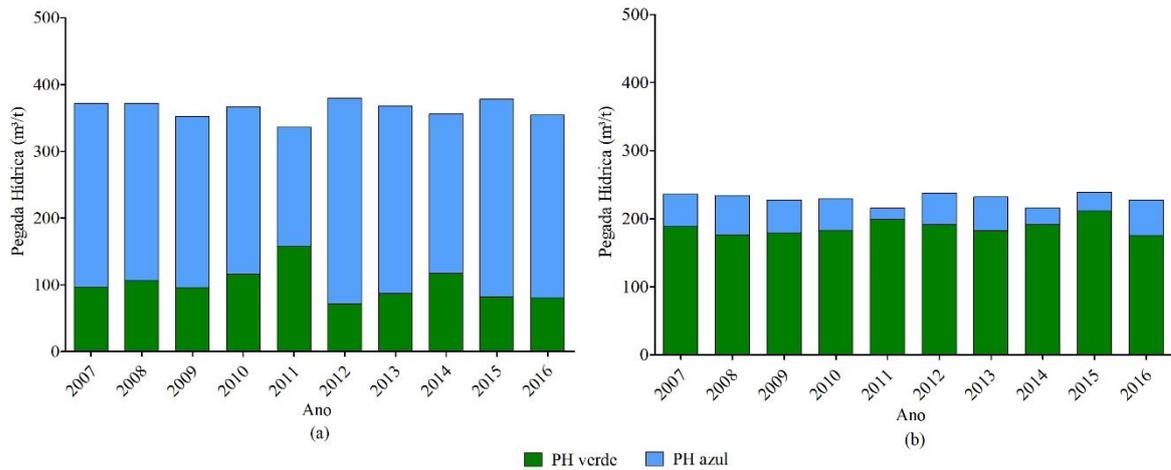
Ano	PH total	PH verde	Participação na PH total	PH azul	Participação na PH total
<b>2007 - 2011</b>	<b>228,43</b>	<b>185,234</b>	<b>81,1%</b>	<b>43,196</b>	<b>18,9%</b>
2012	237,63	191,44	80,6%	46,19	19,4%
2013	231,89	182,49	78,7%	49,40	21,3%
2014	216,43	191,07	88,3%	25,36	11,7%
2015	238,46	211,43	88,7%	27,03	11,3%
2016	227,17	175,43	77,2%	51,74	22,8%

Fonte: A autora, 2020.

A Figura 11 apresenta visualmente a modificação das pegadas hídricas verde e azul em cada região, ao longo dos dez anos e ressalta a diferença de participação das pegadas hídricas nas duas regiões. Considerando os dez anos, observou-se que o Agreste é a região onde a PHverde é menor e a PHazul é maior (cerca de 100,9 m<sup>3</sup>/t e 262,7 m<sup>3</sup>/t, respectivamente), enquanto que, na Zona da Mata, o comportamento é o oposto – 187,8 m<sup>3</sup>/t para a PHverde e 41,57 m<sup>3</sup>/t para a PHazul. Uma vez que o presente estudo considera uma situação ideal de

suprimento completo da necessidade hídrica da cultura, os resultados no Agreste mostram a importância da irrigação (água azul) para o desenvolvimento pleno da cana. Conforme mencionado anteriormente e verificado na Figura 9, a água pluvial é mais abundante na Zona da Mata e atende boa parcela da demanda.

Figura 11 - Pegadas Hídricas verde e azul da cana-de-açúcar ( $m^3/t$ ) no Agreste (a) e Zona da Mata (b) da bacia do Ipojuca no período de 2007 a 2016



Fonte: A autora, 2020.

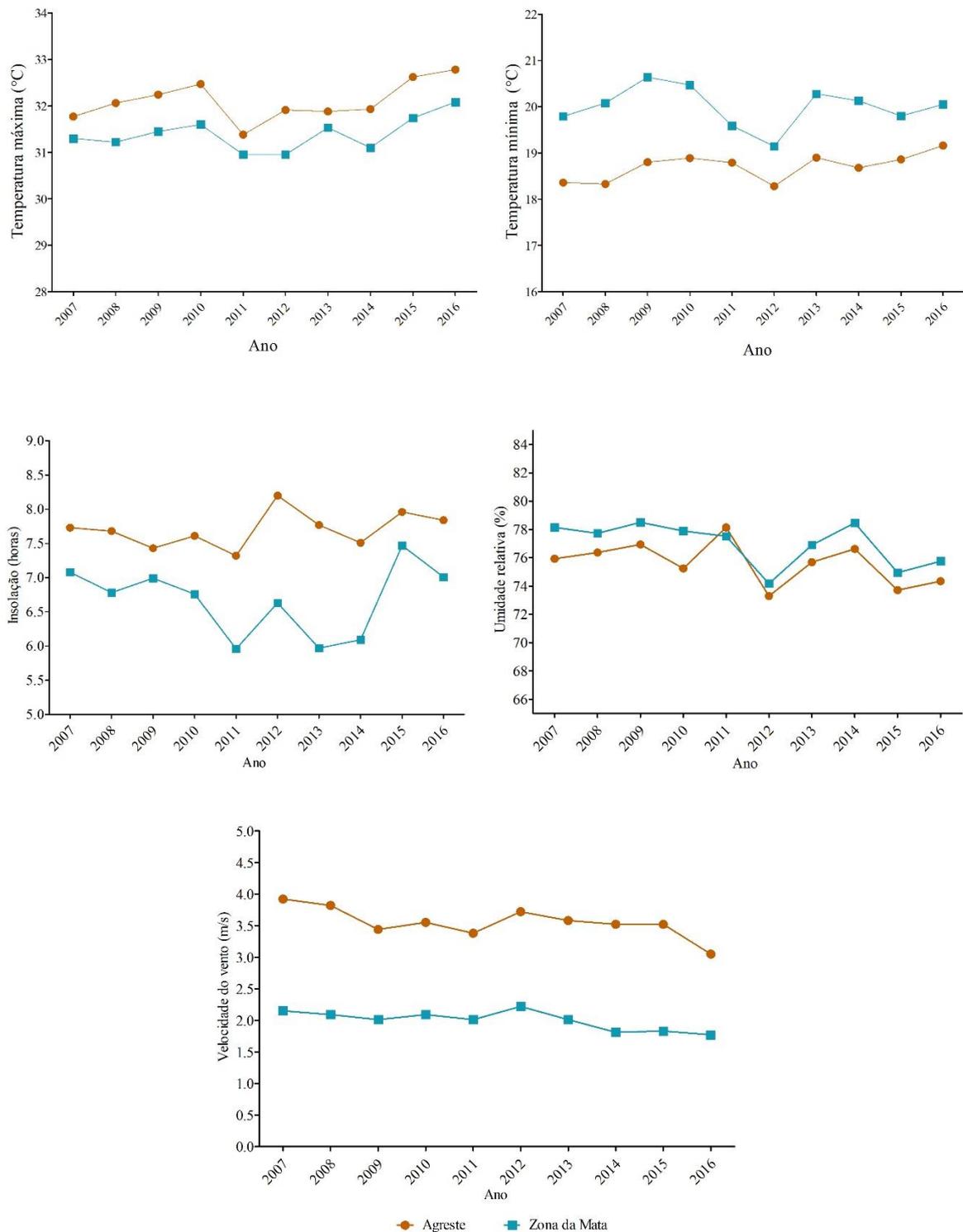
Ressalta-se que os valores encontrados neste estudo são maiores que os estimados por Mekonnen e Hoekstra (2011) ao analisarem a pegada hídrica da cana-de-açúcar para o Brasil, cujo valor total obtido foi de  $137 m^3/t$  ( $122 m^3/t$  para a PHverde e  $5 m^3/t$  para a PHazul). Esperava-se mesmo obter uma diferença, uma vez que os dados climáticos, de cultivo e solo utilizados pelos autores citados envolveram uma base de dados, reflexo de uma condição nacional. Em contrapartida, Moura (2017) obteve valores mais próximos ao desta dissertação ao calcular a PHtotal da cana nos municípios de Jitaí e Quirinópolis, no estado de Goiás –  $238m^3/t$ , sendo  $142m^3/t$  relativa à PHverde e  $96 m^3/t$ , à PHazul.

Para o entendimento das variações nas pegadas hídricas, é importante frisar os dois valores envolvidos no seu cálculo: a evapotranspiração e a produtividade. Uma vez que este trabalho considerou uma produtividade constante ao longo dos dez anos, baseada nos valores observados em trinta anos pelo IBGE (Tabela 10), foi possível observar a influência dos fatores climatológicos, que provocam impactos relevantes no requerimento por recursos hídricos. Para isso, inicialmente foi analisado o comportamento destes fatores, em ambas as regiões, após a seca de 2012 como auxílio ao entendimento dos resultados na evapotranspiração da cultura e, por consequência, das pegadas hídricas. A Figura 12 apresenta a variação das temperaturas

máxima e mínima, insolação, umidade relativa e velocidade do vento, fatores de entrada para o cálculo de evapotranspiração no Cropwat.

Verifica-se que o Agreste é responsável pelos maiores valores de temperatura máxima, insolação, umidade relativa e velocidade do vento, enquanto que é contemplado por temperaturas mínimas menores que a Zona da Mata. Ao longo dos anos, observa-se que tais parâmetros variaram de forma diferente em cada região. Comparando os dez anos, tem-se 2012 como atípico, com destaque para a queda nas temperaturas mínimas e na umidade relativa em ambas as localidades, e aumento na insolação e na velocidade do vento especialmente no Agreste. Através da análise da precipitação, em total acumulado anual (mm) (Figura 9), identifica-se também uma diferença na pluviosidade das regiões. O ano de 2012 foi o menor em volume de chuvas para ambas, no entanto o Agreste tem experimentado menor pluviosidade anual desde o início da seca (2012), em relação ao período anterior (2007 a 2011), com a ocorrência de um mais chuvoso em 2014. Por sua vez, para a Zona da Mata, a comparação entre os dois períodos não produziu uma divergência tão acentuada, pois a região conviveu com dois anos de maiores chuvas (2013 e 2014) após 2012. Ou seja, o comportamento diferenciado dos fatores climáticos demonstra que os impactos da seca foram diferentes para as regiões, com indicação de maior força no Agreste, devido às mudanças mais acentuadas desses fatores em seu território.

Figura 12 - Variação dos fatores meteorológicos para as regiões Agreste e Zona da Mata no período de 2007 a 2016.

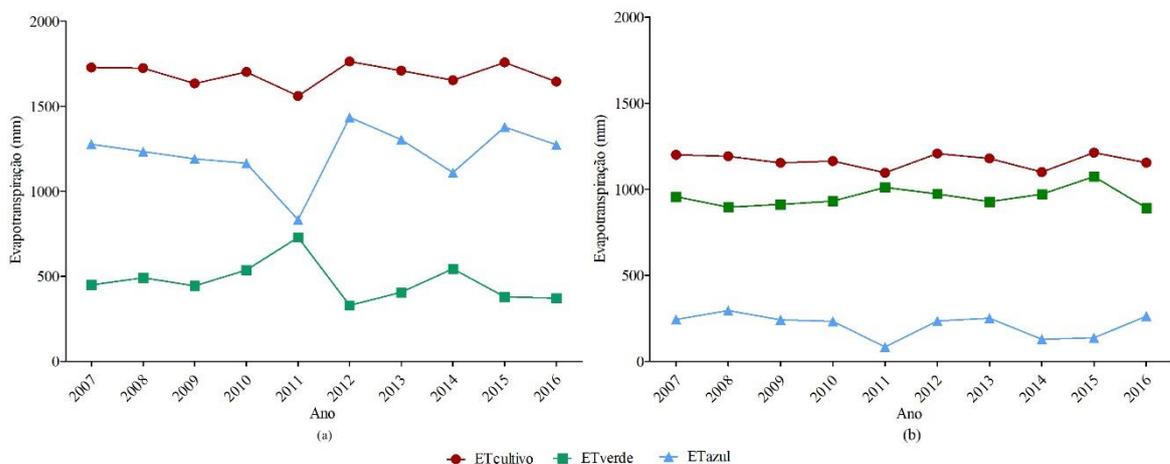


Fonte: A autora, 2020.

Como resultado, têm-se modificações semelhantes nas evapotranspirações verde e azul. A Figura 13 mostra que as oscilações neste parâmetro foram maiores no Agreste, com destaque

para a queda na ETverde em 2012 e consequente aumento na ETazul. Nesta região, identifica-se uma diminuição na ETverde nos anos posteriores à seca, o que corrobora com o supracitado comportamento da precipitação no local. As evapotranspirações na Zona da Mata não sofreram grandes modificações entre os dois períodos, fato também condizente com o comportamento dos seus fatores climáticos. É importante ressaltar os maiores valores de evapotranspiração total no Agreste (ETcultivo), situação que ajuda a explicar os maiores resultados de PHtotal quando comparado com os da Zona da Mata. Uma vez que a água que chega à planta evapora mais rápido no Agreste, é necessário um maior volume para atender ao desenvolvimento do cultivo. No contexto dos resultados das pegadas hídricas, a observação do clima permite entender as menores pegadas hídricas verdes no Agreste – onde as condições são mais secas que na Zona da Mata. Como este componente (PHverde) se relaciona à evapotranspiração (ETverde) e é decorrente do abastecimento pelas águas pluviais, compreende-se a queda mais relevante nos seus valores após 2012.

Figura 13 - Variação temporal da evapotranspiração (mm) no Agreste (a) e na Zona da Mata (b) no período de 2007 a 2016



Fonte: A autora, 2020.

Analisando, em particular, a produtividade e sua relação com as pegadas hídricas, observa-se que uma menor média de produção por hectare contabilizada como dado de entrada para o Agreste (46,42 t/ha) contribui para valores mais elevados nas pegadas hídricas em relação à Zona da Mata, cuja produtividade considerada foi 50,83 t/ha. Vale destacar que, analisando os dados do IBGE para o período 2012 a 2016 (Tabela 10), a produtividade na Zona da Mata sofreu pouca alteração, o que pode indicar que, na realidade, o requerimento de água pela cana na região deve ter sido em grande parte atendido pela precipitação e irrigação.

Em termos gerais, os resultados do presente estudo mostraram que, à medida que a contribuição da PHverde tende a decrescer, a da PHazul tende a aumentar. Este resultado mostra que, com a crise hídrica, a demanda da evapotranspiração da planta não pode ser atendida somente pela água da chuva, necessitando ainda de uma forma de suprimento suplementar: a irrigação. Ou seja, diante de uma situação crítica, a cultura requer o uso de um volume maior de água disponível (azul). Esta compensação entre as águas verde e azul corroboram com as observações realizadas por Moura (2017) em seu estudo sobre a expansão da cana-de-açúcar no Cerrado e os impactos nos recursos hídricos. A autora encontrou que, em cenários de mudanças climáticas onde a necessidade hídrica é atendida pela precipitação, a PH azul tende a ser menor. Resultados similares podem ser observados em estudos envolvendo pegadas hídricas de outros cultivos associadas a alterações climáticas. Silva (2018a), ao analisar a produtividade e a Pegada Hídrica da soja na região do Matopiba, estimou que, em cenários futuros de diminuição de precipitação e aumento da temperatura, a PHazul da soja aumente, ao passo que a PHverde diminua. Bocchiola *et al.* (2013), por sua vez, em análise da pegada hídrica do milho no norte da Itália, em suas projeções alterando temperatura e pluviosidade, também observaram uma tendência de pico da PHazul no futuro.

Em relação à sustentabilidade, é válido ressaltar que o aumento do uso de água azul nos cultivos gera diversos impactos negativos, dentre eles a elevação do volume de água poluída durante o manejo agrícola. Aliado a isto, frisa-se que o cálculo da Pegada Hídrica considera a etapa do desenvolvimento da cultura, ou seja, excetuam-se da contabilização as demais águas azuis envolvidas em outras etapas do processo produtivo, como, por exemplo, o transporte, a colheita e o processamento, as quais não são objeto deste estudo. Dessa forma, é razoável inferir, portanto, que, em condições ideais de irrigação, os valores de PH azuis, na prática, são ainda maiores que os encontrados neste estudo, ao se considerar todo o ciclo de vida da cana.

Em regiões com bons índices de precipitação, a água verde é essencialmente empregada nos cultivos alimentícios, que, portanto, competem pelo uso desta água de modo a garantir uma boa produtividade agrícola. A substituição do requerimento de um tipo de água por outro por uma cultura, como ocorre com a cana nessa região, de água verde por azul, a fim de cobrir o seu déficit hídrico pode levar a efeitos preocupantes quando se considera regiões com regime pluvial escasso e que já tem escassez de água azul para outros fins. Nestas, a competição com outros cultivos menos intensivos em água, e entre outros setores como pecuária, indústria e de abastecimento urbano, entre outros, será substancialmente incrementada, potencializando os conflitos.

Portanto, os resultados desta pesquisa podem ser utilizados para verificar a sustentabilidade de um aumento do requerimento por água azul em um cenário de expansão da cana-de-açúcar numa região escassa em água e sujeita a eventos extremos como a da bacia estudada. Neste contexto, ressalta-se a nova disponibilidade, a ser ofertada para a referida bacia pelo o Projeto de Transposição do Rio São Francisco (PISF), o que, sem a gestão de demanda adequada pode incentivar não somente a manutenção como até uma futura expansão do setor sem sustentabilidade.

#### 4.2 AS PEGADAS HÍDRICAS MUNICIPAIS: O AGRESTE E A ZONA DA MATA

A análise pormenorizada das Pegadas Hídricas da cana-de-açúcar dos municípios pertencentes às regiões Agreste e Zona da Mata da bacia do Ipojuca contribui com informações acerca das diferenças no cultivo em determinados locais, com foco nos requerimentos de água.

Na região Agreste, como apresentado na Tabela 14, dos 8 municípios estudados, verificou-se que Pombos foi o maior produtor de cana em trinta anos, em média 201.618,63 toneladas por ano, seguido por Sairé, responsável por 185.282,93 toneladas. Em termos de produtividade (t/ha), observa-se que Gravatá e Bezerras ocupando o primeiro e segundo lugares, com 51,45 t/ha e 47,62 t/ha, respectivamente. Os menores valores foram atribuídos a Caruaru (17,78 t/ha), seguido por Riacho das Almas e São Caetano, com produtividades de 20,00 t/ha. A Zona da Mata da bacia, por sua vez, que conta com 5 municípios, em geral, produz maiores quantidades de cana que o Agreste, em toneladas, e tem Ipojuca e Escada como principais produtores da região (em torno de 732.552,77 e 678.359,33 toneladas ao ano, respectivamente), conforme Tabela 14. Os municípios com maiores produtividades foram Ipojuca e Primavera, com 52,33 t/ha e 51,19 t/ha, respectivamente. A Figura 14 mostra a predominância da Zona da Mata na produção da cana-de-açúcar na bacia.

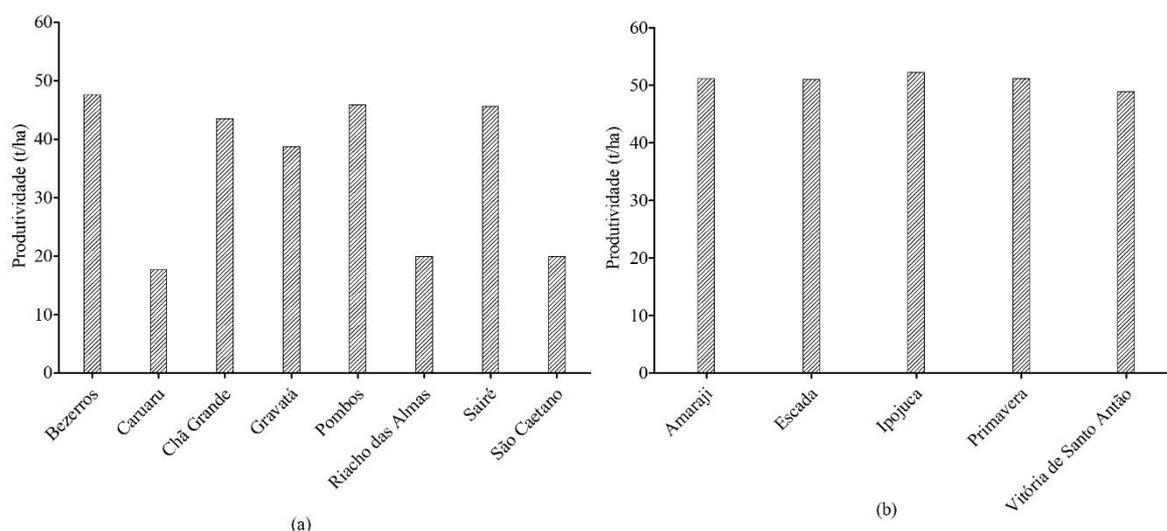
Uma vez que os dados meteorológicos e de solo empregados para o cálculo da PH foram os mesmos para todos os municípios de cada região, a produtividade é o parâmetro que diferencia seus respectivos valores de PH total.

Tabela 14 - Médias de quantidade produzida, área colhida e produtividade por município das regiões do Agreste e Zona da Mata, para trinta anos (1987 a 2016)

Mesorregião	Município	Quantidade produzida (t)	Área colhida (ha)	Produtividade (t/ha)
Agreste	Bezerros	28.571,43	600,00	47,62
	Caruaru	58,07	3,27	17,78
	Chã Grande	30.755,94	706,47	43,53
	Gravatá	17.681,33	343,67	51,45
	Pombos	201.618,63	4.387,77	45,95
	Riacho das Almas	10.000,00	500,00	20,00
	Sairé	185.282,93	4.065,64	45,57
	São Caetano	10.000,00	500,00	20,00
Zona da Mata	Amaraji	354.935,33	6.942,83	51,12
	Escada	678.359,33	13.283,67	51,07
	Ipojuca	732.552,77	14.026,77	52,23
	Primavera	371.978,53	7.266,73	51,19
	Vitória de Santo Antão	328.850,53	6.712,47	48,99

Fonte: Adaptado da Pesquisa Agrícola Municipal (IBGE) (1987 a 2016).

Figura 14 - Produtividades médias (t/ha) dos municípios das regiões Agreste (a) e Zona da Mata (b) no período de 1987 a 2016.



Fonte: Adaptado da Pesquisa Agrícola Municipal (IBGE).

A Tabela 15 mostra os resultados das pegadas hídricas totais dos municípios pertencentes ao Agreste, juntamente com a PH<sub>total</sub> calculada da região. Observa-se que maiores PH totais são de Caruaru, devido à sua menor produtividade (17,78 t/ha). Devido às condições

climáticas atípicas do ano de 2012, discutidas anteriormente, observou-se um aumento na sua PH total neste ano (992,2 m<sup>3</sup>/t). Tendo em vista que a produção de cana neste município demanda muita água, o cultivo em seu território pode não ser vantajoso, dada a competição pelo uso do recurso com outros cultivos alimentícios menos intensivos em água, como a mandioca e o milho<sup>16</sup>. Ainda no contexto do Agreste, é possível notar também que as baixas produtividades de Caruaru, Riacho das Almas e São Caetano faz com que suas pegadas hídricas anuais totais se distanciem significativamente da média da região a cada ano.

Tabela 15 - Pegada Hídrica total (m<sup>3</sup>/t) dos municípios pertencentes à região Agreste da bacia do Ipojuca no período de 2007 a 2016

Município	Pegada Hídrica total (m <sup>3</sup> /t)									
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Bezerros	362,7	362,2	343,2	357,3	327,9	370,4	358,9	347,2	369,1	345,5
Caruaru	971,6	970,2	919,5	957,3	878,3	992,2	961,5	930,2	988,7	925,4
Chã Grande	396,7	396,1	375,4	390,9	358,6	405,1	392,6	379,8	403,7	377,9
Gravatá	445,8	445,1	421,9	439,2	403,0	455,2	441,2	426,8	453,6	424,6
Pombos	375,9	375,3	355,7	370,3	339,8	383,8	372,0	359,8	382,5	358,0
Riacho das Almas	863,6	862,3	817,3	850,8	780,6	881,8	854,6	826,8	878,7	822,5
Sairé	379,0	378,4	358,7	373,4	342,6	387,0	375,0	362,8	385,6	361,0
São Caetano	863,6	862,3	817,3	850,8	780,6	881,8	854,6	826,8	878,7	822,5
<b>Agreste</b>	<b>372,1</b>	<b>371,5</b>	<b>352,1</b>	<b>366,6</b>	<b>336,3</b>	<b>379,9</b>	<b>368,2</b>	<b>356,2</b>	<b>378,6</b>	<b>354,4</b>

Fonte: A autora, 2020.

Diferentemente do Agreste, as produtividades consideradas para os municípios da Zona da Mata não divergiram consideravelmente entre si, o que acarretou uma Pegada Hídrica muito semelhante entre eles (Figura 14) e em comparação à média da região. A Tabela 16 mostra que a maiores produtividades em Ipojuca (52,23 t/ha) fizeram com que o mesmo apresentasse os menores valores de PH totais (cerca de 223,24 m<sup>3</sup>/t ao ano). Os maiores resultados foram identificados para Vitória de Santo Antão, responsável por 237,98 m<sup>3</sup>/t ao ano, devido à sua menor produtividade (48,99 t/ha).

<sup>16</sup> Dados da Produção Agrícola Municipal do IBGE em 2017 (IBGE, 2018).

Tabela 16 - Pegada Hídrica total (m<sup>3</sup>/t) dos municípios pertencentes à região Zona da Mata da bacia do Ipojuca no período de 2007 a 2016

Município	Pegada Hídrica total (m <sup>3</sup> /t)									
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Amaraji	234,7	233,2	225,7	227,7	214,3	236,3	230,6	215,2	237,1	225,9
Escada	235,0	233,4	226,0	228,0	214,5	236,5	230,8	215,4	237,4	226,1
Ipojuca	229,8	228,2	220,9	222,9	209,7	231,3	225,7	210,6	232,1	221,1
Primavera	234,4	232,9	225,4	227,4	214,0	236,0	230,3	214,9	236,8	225,6
Vitória de Santo Antão	244,9	243,3	235,5	237,6	223,6	246,6	240,6	224,6	247,4	235,7
<b>Zona da Mata</b>	236,1	234,5	227,0	229,0	215,5	237,6	231,9	216,4	238,5	227,2

Fonte: A autora, 2020.

Conforme apresentado no item 4.1, as variações das Pegadas Hídricas ao longo dos anos, que refletem os impactos climáticos decorrentes da seca de 2012, são melhor visualizadas quando se efetua a análise por tipo de água. O padrão encontrado na análise geral do Agreste e da Zona da Mata – aumento no requerimento de água azul de modo a suprir a diminuição de água verde disponível – foi identificado também nesta avaliação pormenorizada para cada município (vide Apêndice E).

#### 4.3 AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA DO IMPACTO DOS FATORES CLIMÁTICOS NA PEGADA HÍDRICA

A correlação de Pearson foi aplicada a fim de identificar melhor o impacto das variáveis climáticas nas pegadas hídricas verde e azul, bem como em seus componentes ETverde, ETazul e ETcultivo.

Verifica-se nos resultados da análise de correlação realizada para a região do Agreste (Tabela 17) a confirmação de que grande parte dos fatores climáticos exercem forte influência ( $r > 0,7$ ) nos resultados de pegada hídrica. Os que mais apresentaram correlação forte (valores em vermelho) com os componentes da PH foram precipitação, insolação e umidade relativa.

Tabela 17 - Correlação de Pearson entre as variáveis climáticas e os componentes da Pegada Hídrica para o Agreste

Variável	Precipitação (mm)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Insolação (horas)	Umidade relativa (%)	Velocidade do vento (m/s)
ETverde (mm)	0,97	-0,56	0,06	-0,84	0,83	-0,08
ETazul (mm)	-0,92	0,49	-0,22	0,89	-0,86	0,29
ETcultivo (mm)	-0,66	0,28	-0,46	0,81	-0,75	0,62
PHverde (m <sup>3</sup> /t)	0,97	-0,56	0,06	-0,84	0,83	-0,08
PHazul (m <sup>3</sup> /t)	-0,92	0,49	-0,22	0,89	-0,86	0,29

Fonte: A autora, 2020.

Em uma avaliação variável a variável, tem-se que a precipitação apresentou correlação forte e positiva com os parâmetros ETverde e PHverde, o que condiz com a definição de água verde, que se refere ao consumo da água da chuva que não se torna escoamento superficial. Em contrapartida, este parâmetro apresentou correlação negativa forte com a ETazul e PHazul, confirmando que a diminuição no volume de chuvas implica o aumento da necessidade de emprego da água azul para abastecimento do cultivo, ou vice-versa.

As temperaturas máxima e mínima, de modo geral, apresentaram correlação de fraca a moderada com a maioria das variáveis, com destaque para a correlação moderada e negativa da Tmáx com a ETverde e a PHverde e da Tmín com a ETcultivo, confirmando a forte relação entre temperatura e evapotranspiração.

Os resultados da correlação para o parâmetro insolação confirmaram sua significativa influência sobre todos os componentes da pegada hídrica. Relação forte com a evapotranspiração do cultivo também foi encontrada por Ferreira (2014) quando realizada a análise de sensibilidade da evapotranspiração da cana-de-açúcar na bacia do São Francisco aos elementos climáticos, no semiárido do Brasil, utilizando o método da curva de sensibilidade descrito em Alencar *et al.* (2012). O autor identificou um coeficiente positivo entre a evapotranspiração e a radiação global, que, por sua vez, tem relação proporcional com a insolação (AMPRATWUM e DORVLO, 1999). A correlação foi negativa e forte para a ETverde ( $r = -0,84$ ) e a PHverde ( $r = -0,84$ ), ao passo que foi positiva e forte para a ETazul ( $r = 0,89$ ) e a PHazul ( $r = 0,89$ ).

Similarmente, a umidade relativa apresentou correlação forte com todos os parâmetros. Seu aumento tem impacto no potencial de evapotranspiração da planta uma vez que diminui a capacidade do ar de absorver vapor de água. O resultado corrobora com o encontrado por Sun *et al.* (2012) em seu estudo para a cultura do trigo, onde encontraram correlação negativa entre precipitação e umidade relativa e a ETcultivo, identificando um efeito semelhante de aumento

da evapotranspiração e consumo de água em decorrência da diminuição das chuvas e da umidade.

A análise da correlação efetuada para os parâmetros climáticos coletados na Zona da Mata (Tabela 18) se mostrou com tendência semelhante à da região Agreste em alguns parâmetros, no entanto as correlações que se apresentaram fortes nesta região, tornaram-se fracas ou moderadas na primeira, corroborando com o resultado de maior variação da PH<sub>total</sub> no Agreste, apresentada na Tabela 11 (+2,16%). A análise de correlação confirma que o evento de seca teve um efeito sobre as pegadas hídricas das regiões, porém de maneira diferente, uma vez que seu impacto sobre o comportamento dos fatores climáticos nos anos decorrentes (2012 a 2016) ocorreu de uma forma mais acentuada no Agreste. Ou seja, pode-se inferir que, em situações semelhantes – regiões que sofram variações mais acentuadas no clima devido a um evento extremo –, o aumento do consumo hídrico para desenvolvimento do cultivo seja maior. Destaca-se que, na Zona da Mata, os parâmetros climáticos tiveram fatores de correlação diferentes com as pegadas hídricas verde e azul e seus respectivos componentes (ET<sub>verde</sub> e ET<sub>azul</sub>), diferentemente dos resultados para o Agreste, onde os valores foram iguais.

Tabela 18 - Correlação de Pearson entre as variáveis climáticas e os componentes da Pegada Hídrica para a Zona da Mata

<b>Variável</b>	Precipitação (mm)	T <sub>máx</sub> (°C)	T <sub>mín</sub> (°C)	Insolação (horas)	Umidade relativa (%)	Velocidade do vento (m/s)
ET <sub>verde</sub> (mm)	0,17	-0,08	-0,25	-0,29	-0,32	-0,12
ET <sub>azul</sub> (mm)	-0,30	0,33	0,34	0,06	-0,01	0,32
ET <sub>cultivo</sub> (mm)	-0,13	0,22	0,11	-0,15	-0,24	0,19
PH <sub>verde</sub> (m <sup>3</sup> /ton)	0,07	-0,22	-0,52	0,08	-0,37	-0,16
PH <sub>azul</sub> (m <sup>3</sup> /ton)	-0,44	0,33	0,29	0,32	-0,01	0,38

Fonte: A autora, 2020.

#### 4.4 A PEGADA HÍDRICA AZUL E A GESTÃO DA ÁGUA NA BACIA DO IPOJUCA

Analisar individualmente a PH<sub>azul</sub> é importante, por ser este um indicador da necessidade hídrica para a irrigação e, portanto, da pressão sobre os recursos provenientes de mananciais, poços, adutoras, reservatórios e outras fontes hídricas na bacia. O cálculo do requerimento de água em uma bacia, em m<sup>3</sup>, necessário ao desenvolvimento de cana durante um ciclo de 320 dias, é uma forma de obter um valor estimado que permite uma avaliação. Para

isto, considerou-se a PHazul e a quantidade produzida, em toneladas, no período de 2007 a 2016 (Tabela 19). O volume anual demandado para irrigação foi, em média, de  $60,6 \times 10^6$  m<sup>3</sup> no período de 2007-2011 e  $125,9 \times 10^6$  m<sup>3</sup> de 2012-2016 no Agreste, e  $80,8 \times 10^6$  m<sup>3</sup> e  $68,43 \times 10^6$  m<sup>3</sup> para os dois períodos, respectivamente, na Zona da Mata. Observa-se um aumento no Agreste após 2012 e uma diminuição na outra região, diferença que pode ser explicada pelos efeitos diferenciados da seca nas duas localidades, conforme comentado no item 4.1.

Tabela 19 - Volumes estimados de água requeridos para irrigação do cultivo da cana-de-açúcar no período de 2007 a 2016

Ano	Agreste			Zona da Mata			Total (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
	PHazul (m <sup>3</sup> /t)	Produção (t)	Volume (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	PHazul (m <sup>3</sup> /t)	Produção (t)	Volume (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	
2007	275,1	124.325	34,20	47,85	1.840.800	88,08	122,28
2008	265,6	86.370	22,94	58,17	2.206.800	128,37	151,31
2009	256,4	86.370	22,14	47,57	1.893.408	90,07	112,21
2010	250,9	529.778	132,95	45,84	1.689.408	77,44	210,39
2011	179,2	506.722	90,78	16,55	1.209.660	20,01	110,81
2012	309,0	491.283	151,82	46,19	1.453.490	67,14	218,96
2010	280,8	431.755	121,22	49,40	1.675.990	82,79	204,01
2011	239,0	446.765	106,78	25,36	1.597.500	40,51	147,73
2015	296,9	446.755	132,27	27,03	1.782.500	48,18	180,84
2016	274,1	426.100	116,81	51,74	2.001.200	103,54	220,36

Fonte: A autora, 2020.

É importante notar que, embora a PHazul do Agreste seja significativamente maior que a da Zona da Mata, em alguns anos, o volume de água necessário foi maior na segunda, visto que a produção nesta região é 7,14 vezes maior, considerando a média dos valores para o período de trinta anos já apresentados na Tabela 10. No entanto, na Zona da Mata da bacia, a produção é mais eficiente em termos de quantidade produzida por volume de água consumido, ou seja, produz-se mais com menor requerimento de água, como mostra a Tabela 20. Em caso de tentativa de aumento da produção no Agreste, em toneladas, a níveis semelhantes aos da Zona da Mata, com base nos dados obtidos para PH, e sabendo que a evapotranspiração da cultura (ETcultivo) no Agreste é maior (Figura 13), o volume requerido ultrapassaria o estimado para a Zona da Mata de modo considerável.

Tabela 20 - Quantidade produzida de cana-de-açúcar por volume de água requerido na bacia do Ipojuca para o período de 2007 a 2016

Ano	Produção por volume de água azul (kg/m <sup>3</sup> )	
	Agreste	Zona da Mata
2007	3,64	20,90
2008	3,76	17,19
2009	3,90	21,02
2010	3,98	21,82
2011	5,58	60,42
2012	3,24	21,65
2010	3,56	20,24
2011	4,18	39,43
2015	3,37	37,00
2016	3,65	19,33

Fonte: A autora, 2020.

Avaliando o consumo de água de azul por unidade de área, também se verifica que a Zona da Mata é uma região substancialmente mais eficiente (Tabela 21). Ou seja, em caso de expansão da produção de cana pelo interior do Agreste, como previsto por Assad *et al.* (2008), o impacto em termos de uso para irrigação será maior.

Tabela 21 - Demanda hídrica da cana-de-açúcar por área na bacia do Ipojuca para o período de 2007 a 2016

Ano	DHC (m <sup>3</sup> /ha)	
	Agreste	Zona da Mata
2007	12.770	2.432
2008	12.331	2.957
2009	11.902	2.418
2010	11.649	2.330
2011	8.317	841
2012	14.345	2.348
2010	13.033	2.511
2011	11.095	1.289
2015	13.784	1.374
2016	12.726	2.630

Fonte: A autora, 2020

A fim de identificar o impacto sobre os recursos hídricos da produção de cana na bacia e auxiliar na gestão, comparou-se o requerimento total estimado em 2010 (Tabela 19) com a disponibilidade hídrica prevista no Plano Hidroambiental da bacia do Ipojuca (PHA) (SRH, 2010b), elaborado com dados do mesmo ano (Tabela 22). O documento previu uma disponibilidade virtual total de  $381,36 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/ano, que corresponde à parcela máxima da potencialidade que poderá ser aproveitada, em função das condições físicas da bacia e do

progresso tecnológico. Percentualmente, nota-se que, em 2010, 55,2% desta disponibilidade teria sido demandada somente para a irrigação da cana.

Outra comparação pode ser realizada em termos de outorga. O PHA estimou que, em 2010, 41% dos consumidores outorgados para águas superficiais na bacia tinham como finalidade a irrigação, em sua maioria suplementar, ou seja, para reduzir parcialmente o estresse hídrico. O volume outorgado foi contabilizado em 485.725,33 m<sup>3</sup>/dia (Tabela 22). Considerando-se o volume de água azul de 210,39x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> necessário para todo o ciclo de 320 dias da cultura em 2010, numa estimativa diária, a demanda seria de 657.468,75 m<sup>3</sup>. Entende-se, dessa forma, que se fosse empregada a irrigação de modo que a cultura tivesse sua evapotranspiração completamente suprida, sem estresse hídrico, a demanda para a cana seria cerca de 35,3% maior que a outorgada na época para toda a bacia.

Tabela 22 - Disponibilidade virtual\* e vazões outorgadas na bacia do Ipojuca para fonte superficial e subterrânea, estimadas em 2010

	Fonte		Total
	Superficial	Subterrânea	
Disponibilidade virtual (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /ano)	Superficial	367,72	381,36
	Subterrânea	13,62	
Outorga (m <sup>3</sup> /dia)	Superficial	484.294,53	485.725,33
	Subterrânea	1.430,80	

Fonte: Adaptado de SRH (2010b).

\*Para as águas superficiais, representa o aproveitamento máximo da potencialidade, levando em conta as restrições físicas e econômicas a este aproveitamento. Para as águas subterrâneas, corresponde à potencialidade.

No contexto dos reservatórios existentes na bacia do Ipojuca (Tabela 23), a situação adquire ainda mais destaque. Segundo SRH (2010b), somente um deles, o Pão-de-Açúcar, atende às demandas por irrigação pela cana, uma vez que a maioria tem como principal finalidade o abastecimento público dos municípios. Sua capacidade, no entanto, é cerca de 3,85 vezes menor que a necessária para a cana. Atenta-se ainda para o fato de que este reservatório divide seu volume também com o abastecimento das cidades de Pesqueira e Sanharó e com a pesca.

Ressalta-se que a estimativa de cálculo das pegadas hídricas foi realizada considerando-se uma estratégia ideal de irrigação, onde a mesma ocorreria quando o índice de depleção fosse crítico e, então, o solo seria recomposto até a capacidade de campo. Em outras palavras, seriam obedecidos intervalos máximos de irrigação, ao mesmo tempo em que se evitaria estresse hídrico no cultivo. Dessa forma, há que se levar em conta a questão de que o volume simulado para água azul é um requerimento e, na prática, como as condições não são favoráveis

principalmente no Agreste da bacia, a irrigação na bacia deve apenas minimizar o déficit hídrico e não atender aos requerimentos (ANA, 2017b).

Tabela 23. Capacidades dos principais reservatórios da bacia do Ipojuca e seus usos preponderantes.

<b>Reservatório</b>	<b>Município</b>	<b>Capacidade máxima (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Principais usos</b>
Pão de Açúcar	Pesqueira	54.696.500	Abastecimento / Irrigação
Pedro Moura Júnior (Belo Jardim)	Belo Jardim	30.000.000	Abastecimento
Eng. Severino Guerra (Bituri)	Belo Jardim	17.776.470	Abastecimento
Manuíno	Bezerros	2.021.000	Abastecimento
Brejão	Sairé	1.625.000	Abastecimento
Taquara	Caruaru	1.100.000	Abastecimento
Guilherme de Azevedo	Caruaru	786.000	Abastecimento
Serra dos Cavalos	Caruaru	761.000	Abastecimento
Jaime Nejaim	Caruaru	600.000	Abastecimento
Antônio Menino	Caruaru	538.740	Abastecimento

Fonte: SRH (2010b).

Outro aspecto possível é que parte deste déficit hídrico seja atendido pelo vinhoto que complementa a irrigação misturado à água, mas que tem forte impacto na questão da qualidade ambiental, não avaliada no presente estudo. Utilizando dados da safra 2010/2011 fornecidos pelo Sindaçúcar para a produção de etanol pelas três usinas em operação na bacia – Salgado, Ipojuca e União e Indústria – e a taxa de produção de vinhaça de 12 l/l de etanol (Elia Neto *et al.*, 2009), calcula-se que teria sido gerado, nesta safra, 511.500 m<sup>3</sup> de vinhaça. Assumindo que este efluente seria reutilizado na fertirrigação do cultivo da bacia, estima-se que o mesmo contribuiria com apenas 0,46% da água azul requerida neste ano, sendo necessário ainda um considerável volume de água bruta.

#### 4.5 ESTRATÉGIAS PARA A REDUÇÃO DA PEGADA HÍDRICA

Uma vez que ampliar a disponibilidade hídrica, através de obras hídricas, não implica necessariamente em segurança hídrica e um desenvolvimento econômico sustentável, urge que, aliado a estratégias de aumento da oferta, aplique-se a chamada gestão da demanda. A ideia é que perdas sejam reduzidas e incentive-se o uso eficiente da água em especial em regiões como a estudada. Para incentivar o uso eficiente, uma das estratégias da gestão de demanda é

estabelecer valores de cobrança que reflitam o valor real de escassez na região, de forma que os produtores agrícolas busquem alternativas que levem à diminuição da PH principalmente no Agreste, onde as condições edafoclimáticas são menos favoráveis. Instrumentos de gestão baseados em mercado, como a cobrança, se adequadamente utilizados, induzem os produtores a aumentarem a sua produtividade, migrarem na agricultura para outros cultivos ou até para outros setores econômicos.

Na vertente de elevação da produtividade, Scarpore *et al.* (2016) avaliaram o efeito da fertirrigação com vinhaça como medida de redução da Pegada Hídrica da cana e aumento de produtividade por substituir parcialmente o déficit hídrico da bacia hidrográfica do Tietê-Jacaré. Para isto, os autores compararam as situações de atendimento da demanda com água da chuva e com completa irrigação. Os resultados mostraram que, embora a fertirrigação tenha aumentado o consumo de água, o incremento na produtividade foi consideravelmente maior, diminuindo a PH e tornando a prática vantajosa em áreas com boa disponibilidade hídrica, mas que sofrem com pressões sobre o uso do solo. É importante ressaltar o requerimento hídrico da bacia reduziu-se em 10% devido ao emprego da vinhaça.

Em outro estudo, Barbosa *et al.* (2017) mostraram ser possível diminuir a pegada hídrica da cana-de-açúcar a partir da aplicação de esgoto doméstico tratado junto à água doce como fonte de irrigação. Os experimentos, conduzidos em Campinas, São Paulo, apresentaram reduções nas pegadas hídricas verde e cinza – associada à poluição –, quando comparados com aqueles que não receberam água de irrigação. O estudo contribuiu para a corroboração de que a fertirrigação por gotejamento subsuperficial leva ao incremento da produtividade. Destaca-se que a mitigação da contaminação dos corpos hídricos foi explicada por uma perda maior de nitrato por lixiviação nos tratamentos sem irrigação e com fertilização manual. Em outras palavras, a aplicação de esgoto somado à fertirrigação diminuiu as perdas de nitrato no solo.

A adoção de técnicas de irrigação mais eficientes, assim como algumas formas de cultivo podem colaborar para a redução da PH e um menor impacto sobre a segurança hídrica impostos pelo cultivo da cana. Adetoro *et al.* (2020) compararam os métodos de pivô central e gotejamento subsuperficial na irrigação da cana-de-açúcar na região de Melelane, África do Sul, onde a PH azul excede a PH verde, e encontraram que o emprego do gotejamento reduz o requerimento de água azul, por evitar mais perdas. Este resultado corrobora com os de Barbosa *et al.* (2017), que também alcançaram menores valores de PH total aplicando esse método de irrigação. Em seu estudo, Adetoro *et al.* (2020) também identificaram que a utilização de uma cobertura mais grossa de resíduos de planta tem impacto significativo na diminuição da demanda por água azul, quando comparadas com o uso de uma cobertura menos espessa. Isto

pôde ser explicado tendo em vista que a cobertura mais grossa diminui a evaporação de água do solo e a evapotranspiração da cultura, facilita a drenagem e diminui o *runoff* durante a chuva.

Um aspecto importante levantado por Hoekstra *et al.* (2011) é que uma gestão adequada deve evitar a pressão sobre a pegada hídrica em áreas ou períodos em que as demandas ambientais são violadas. O Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC), desenvolvido pela Embrapa, indica períodos mais adequados para plantio ou semeadura por cultivo da cana e municípios, considerando seu ciclo de desenvolvimento, bem como as características de clima e tipo de solo. A cana-de-açúcar, no estado de Pernambuco, possui dois zoneamentos de risco aprovados pelo MAPA em 2018, para o cultivo em regime de sequeiro e com irrigação de salvamento (BRASIL, 2018). Dentre os municípios indicados, os que possuem área na bacia do Ipojuca e estão indicados como aptos ao cultivo da cana estão Amaraji, Bezerros, Cachoeirinha, Chão Grande, Escada, Gravatá, Ipojuca, Primavera, Pombos, Sairé, São Bento do Una e São Caetano. Identificados aqueles mais desfavoráveis ao plantio da cana e tomando como base outros indicadores além da Pegada Hídrica, pode-se indicar o redirecionamento do consumo de água azul para outros cultivos relevantes bem como para outros setores econômicos bem menos intensivos em água e com potencial de gerar mais renda e emprego.

Vale destacar que a aplicação das estratégias mencionadas se baseia e requer a adoção de uma visão transdisciplinar, que agregue as diferentes esferas públicas e seus órgãos, como o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), o Ministério do Meio Ambiente (MMA), o Ministério de Minas e Energia (MME) e o Ministério da Economia (ME). Dessa forma, entende-se e consolida-se a gestão dos recursos hídricos como pertencente à tríade formada pelo meio ambiente, a sociedade e a economia.

## 5 CONCLUSÕES

A pegada hídrica total da cana-de-açúcar na bacia do Ipojuca foi maior na mesorregião do Agreste em todos os anos avaliados, em comparação com a Zona da Mata, o que pode ser explicado pelas condições edafoclimáticas mais favoráveis ao cultivo à medida que se aproxima do litoral, com aumento da precipitação e presença de solo mais adequado, diminuindo-se o requerimento de água azul para o desenvolvimento do cultivo.

A componente verde da PH foi maior na Zona da Mata, devido ao volume pluviométrico mais elevado na região. Em contrapartida, a componente azul foi substancialmente maior no Agreste, que requer uma complementação significativa desta água proveniente de mananciais e reservatórios para produzir a cana.

Ao longo dos anos, observou-se que a seca de 2012 provocou variações diferentes nos fatores climáticos de cada uma das regiões, tendo sido mais acentuada no Agreste, que apresentou destaque para a queda na precipitação em quatro dos cinco anos pós 2012, bem como na temperatura mínima e na umidade relativa, e aumento na insolação e velocidade do vento. Estas alterações acarretaram redução na evapotranspiração verde concomitante ao aumento da evapotranspiração azul na região, mas poucas modificações na Zona da mata para este parâmetro.

O comportamento dos fatores climáticos produziu respostas também diferenciadas em relação às pegadas hídricas das regiões, no entanto ambas apresentaram redução da contribuição da PHverde e um aumento da PHazul em relação à PHtotal após 2012, mais notório no Agreste, o que demonstrou o reflexo do evento extremo no requerimento de água, elevando a demanda por irrigação como uma alternativa à baixa oferta hídrica pluvial.

Para os municípios do Agreste, Caruaru foi o que apresentou maiores pegadas hídricas totais para os anos do estudo, devido à sua baixa produtividade, indicando que o cultivo da cana pode não ser uma alternativa ambientalmente sustentável no local, em termos hídricos. Na Zona da Mata, Ipojuca e Vitória de Santo Antão foram os municípios com menor e maior média de PHtotal, respectivamente.

A tendência de diminuição da participação da PHverde e aumento da PHazul sobre a PHtotal devido às alterações climáticas no período pós seca também foi observada município a município.

A análise estatística confirmou o efeito mais acentuado dos fatores climáticos nos resultados das pegadas hídricas do Agreste, tendo sido a precipitação, a insolação e a umidade

relativa os que apresentaram correlação mais forte ( $r > 0,7$ ) com os indicadores de requerimentos de água verde e azul, bem como com seus componentes ETa, ETverde e ETazul.

A avaliação pormenorizada do consumo de água azul, em m<sup>3</sup>, na bacia, mostrou que a demanda por irrigação para o cultivo da cana pressiona os recursos hídricos disponíveis, representando uma parte bastante significativa da demanda por água na bacia. Para atender aos requerimentos por água azul da cana encontrados nesta pesquisa, o volume requerido representaria mais da metade da disponibilidade da bacia (55,2%) e requereria um aumento de 35,3% do volume outorgado para águas superficiais e subterrâneas em 2010 na bacia. Ressalta-se que uma pequena parte desta demanda pode ser atendida pelo reaproveitamento da vinhaça (cerca de 0,46%).

Os resultados aqui obtidos podem servir de subsídio às políticas de alocação de água entre os setores econômicos na bacia do rio Ipojuca, em especial na aplicação de valores de cobrança que possam induzir os agentes a usarem a água com eficiência, reduzirem as perdas e investirem em setores sustentáveis e não-intensivos em água, mesmo diante de um aumento na oferta hídrica com que contará, essa que é uma das bacias receptoras do PISF. O desenvolvimento e a configuração da economia na região devem responder não só ao aumento da oferta hídrica, mas também à possibilidade de eventos extremos e à aplicação de adequada gestão de demanda. Esta se faz obtida através da aplicação de instrumentos que reflitam o valor real de escassez da água e promovam incentivos para um desenvolvimento social e econômico sustentável do estado.

## 6 RECOMENDAÇÕES

A fim de melhorar os cálculos, alcançar maior representatividade e fidedignidade para os resultados em estudos semelhantes para outras bacias, recomenda-se:

- Realizar os cálculos considerando uma série histórica maior (maior quantidade de anos), se possível;
- Utilizar dados climáticos e de solo específicos para cada município para ter valores específicos para os cálculos das suas respectivas evapotranspirações;
- Realizar o diagnóstico do uso e não apenas do requerimento da água em condições ideais. Para isto, calcular as Pegadas Hídricas no Cropwat utilizando a opção ‘Calendário de Irrigação’, com entrada de dados reais de irrigação, identificando também o método empregado, bem como sua dinâmica de atuação e eficiência.
- Estimar a Pegada Hídrica cinza associada ao processo produtivo da cana, de modo a identificar o impacto poluidor do cultivo na bacia.
- Calcular a Pegada Hídrica para outras bacias também produtoras de cana no estado de Pernambuco.

## REFERÊNCIAS

ADECE – Agência de Desenvolvimento do Estado do Ceará. **Estudo técnico para a alocação de água destinada à irrigação no médio e baixo Jaguaribe, definindo os critérios e o monitoramento.** Relatório final. Fortaleza, 2015.

ADETORO, A. A. *et al.* Alleviating water shortages by decreasing water footprint in sugarcane production: The impacts of different soil mulching and irrigation systems in South Africa. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 11, 2020.

ALBUQUERQUE, M. F. **Medições e Modelagem da Pegada Hídrica da Cana-de-Açúcar Cultivada no Brasil.** Dissertação (Mestrado em Agrometeorologia) - Universidade Federal de Campinas, 2013.

ALBUQUERQUE, W. G. **Consumo hídrico e coeficiente de cultivo dual da cana-de-açúcar cultivada sob diferentes lâminas de irrigação.** Tese (Doutorado em Agrometeorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, 2012.

ALENCAR, L. P.; SEDIYAMA, G. C. WANDERLEY, H. S.; ALMEIDA, T.S.; DELGADO, R.C.; VIEIRA, G. H. S. Evolução temporal da evapotranspiração de referência e sua sensibilidade aos principais elementos climáticos na cidade Uberaba – MG. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias.** Recife – PE, v. 7, n. 1., p. 159-166, 2012.

ALLAN, T. “Virtual water”: a long term solution for water short Middle Eastern economies? **London: School of Oriental and African Studies, University of London.**, p. 24–29, 1997. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00031-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00031-9).

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56 - Crop Evapotranspiration**, 1998.

AMPRATWUM, D. B.; DORVLO, A. S. S. Estimation of solar radiation from the number of sunshine hours. **Applied Energy**, v. 63, p. 161-167, 1999.

ANA - Agência Nacional de Águas. **Manual De Procedimentos Técnicos E Administrativos De Nacional De Águas**, p. 240, 2013.

\_\_\_\_\_. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil – Relatório pleno.** [S. l.], p. 177, 2017. Brasília, DF: ANA, 2017. Disponível em: <[http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conj2017\\_rel.pdf](http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conj2017_rel.pdf)>.

\_\_\_\_\_. **Reservatórios Do Semiárido Brasileiro.** 88 p. Brasília - DF, 2017a. ISBN: 978-85-

8210-048-6.

\_\_\_\_\_. **Atlas Irrigação**. 86 p. Brasília, 2017b. ISBN 978-85-8210-051-61.

\_\_\_\_\_. **Levantamento da cana-de-açúcar irrigada e fertirrigada no Brasil**. 2<sup>a</sup> ed. 53 p. Brasília, 2019. ISBN: 978-85-8210-063-91.

ANDRADE, M. C. Espaço e tempo na agroindústria canavieira de Pernambuco. **Estudos Avançados**, v. 15, n. 43, p. 267–280, 2001.

ANDRADE, A.; DUARTE, J. A.; MOTA, P. R. D.; MOURA, J. F. L.; RIBEIRO, V. Q. **Níveis de irrigação e fertirrigação por gotejamento subsuperficial na produção de cana-de-açúcar**. In: Proceedings of the XXXVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola (SBEA), Juazeiro (Bahia)/Petrolina (Pernambuco), p. 5, 2009.

ANDRADE JUNIOR, A. S.; REZENDE, R. S.; MOURA, M. S. B.; BUFON, W. B. Irrigação em cana-de-açúcar. In: SILVA, F. C. da; ALVES, B. J. R.; FREITAS, P. L. de (Ed.). **Sistemas de produção mecanizada da cana-de-açúcar integrada à produção de energia e alimentos**. Brasília, DF: Embrapa, v. 2, p. 98-147, 2017.

APAC - Agência Pernambucana de Águas e Clima. **Bacias Hidrográficas**. s.d. Disponível em: <[http://www.apac.pe.gov.br/pagina.php?page\\_id=5](http://www.apac.pe.gov.br/pagina.php?page_id=5)>. Acesso em: maio 2020.

\_\_\_\_\_. **Relatório de situação de recursos hídricos do Estado de Pernambuco 2011/2012**. 116 p. Recife, 2013.

ARAUJO, I. D. C. *et al.* Proposta de um modelo de gestão para o uso eficiente da água no perímetro irrigado de São Gonçalo no sertão paraibano. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental**, v. 12, n. 1., p. 43-57, 2018.

ASSAD, E. D. *et al.* **Aquecimento global e a nova geografia da produção agrícola no Brasil**. 2 ed. Campinas: EMBRAPA. v. 1, p. 55, 2008.

\_\_\_\_\_. **Eficiência do uso da água no Brasil: análise do impacto da irrigação na agricultura brasileira e potencial de produção de alimentos face ao aquecimento global**. Relatório completo, 2016.

ASSIS, W. D.; RIBEIRO, M. M. R.; MORAES, M. M. G. A. Proposição de melhorias para o Sistema de Cobrança pelo Uso da Água Bruta da bacia hidrográfica do rio São Francisco. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 23, n. 4, p. 779-790, 2018.

BARBOSA, E. A. A. et al. Water footprint of sugarcane irrigated with treated sewage and freshwater under subsurface drip irrigation, in Southeast Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 153, p. 448-456, 2017.

BARROS, A. H. C.; JUNIOR, A. S. A.; BASTOS, E. A.; SILVA, A. B. **Simulação do crescimento e da produtividade da cana-de-açúcar em Teresina, PI**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 32 p., 2018.

BOCCHIOLA, D.; NANA, E.; SONCINI, A. Impact of climate change scenarios on crop yield and water footprint of maize in the Po valley of Italy. **Agricultural Water Management**, p. 50–61, 2013.

BORGES FILHO, E. F. A. **Acesso e gestão da água em situação de escassez: implantação de tecnologias sociais simples de captação e armazenamento de água no alto trecho da Bacia do Rio Pajeú, Pernambuco**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2012.

BRASIL. Portaria n. 24, de 30 de abril de 2018. Aprova o zoneamento agrícola de risco climático para a cultura de cana-de-açúcar, em regime de sequeiro, no estado de Pernambuco. **Diário Oficial da União**, Brasília, n. 83, 02 maio 2018. Seção 1, p. 36.

\_\_\_\_\_. Portaria n. 24, de 23 de abril de 2018. Aprova o zoneamento agrícola de risco climático para a cultura de cana-de-açúcar, com irrigação de salvação, no estado de Pernambuco. **Diário Oficial da União**, Brasília, n. 81, 27 abril 2018. Seção 1, p. 39.

BUANAIN, A. M.; GARCIA, J. R. Polos de irrigação no Nordeste do Brasil. **Confins**, v. 23, 2015. Disponível em: < <https://journals.openedition.org/confins/10031?lang=pt>>. Acesso em jan. 2021.

CAMPOS, N.; STUDART, T. **Gestão das Águas: princípios e práticas**. Porto Alegre: ABRH, 198 p., 2003.

CARDOSO, T. F. *et al.* A regional approach to determine economic, environmental and social impacts of different sugarcane production systems in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 120, p. 9-20, 2019.

CARVALHO, R. G. **Análise dos impactos no aumento da demanda dos principais produtos do setor sucro-alcooleiro de Pernambuco e seus encadeamentos com as demais atividades econômicas do estado: uma análise de insumo-produto**. Dissertação (Mestrado em

Economia) - Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), 2007.

CASTRO, C. N. **Gestão das Águas: experiências internacional e brasileira**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, Brasília, 2012.

CHAPAGAIN, A K.; HOEKSTRA, A Y. Water footprint of nations. Volume 1 : Main report. **Value of Water Research Report Series**, v. 1, n. 16, p. 1–80, 2004.

CHEAVEGATTI-GIANOTTO, A. *et al.* Sugarcane (*Saccharum X officinarum*): A Reference Study for the Regulation of Genetically Modified Cultivars in Brazil. **Tropical Plant Biology**, v. 4, n. 1, p. 62–89, 2011. DOI: 10.1007/s12042-011-9068-3.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**, v. 5, Safra 2018/19, n. 1 - Primeiro Levantamento, p. 1-62. Brasília, 2018.

\_\_\_\_\_. **Boletim da safra de cana-de-açúcar**. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar?limitstart=0>>. Acesso em out. 2020.

CONDEPE/FIDEM – Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas de Pernambuco. **Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca**. Série Bacias Hidrográficas de Pernambuco, 1, 64 p. Recife, 2005.

CRA/ENGEORPS. **Estudo de Impacto Ambiental do Ramal do Agreste Pernambucano: Sumário Executivo**. s.d. Disponível em: <<https://www.mdr.gov.br/images/stories/ProjetoRioSaoFrancisco/ArquivosPDF/documentos tecnicos/Sumario-Executivo.pdf>>. Acesso em jun. 2019.

CUNHA, C. S. **Análise de cenários com redução da demanda da orizicultura na bacia do rio Santa Maria com aplicação do modelo Cruz**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2014.

DANTAS NETO, J.; FIGUEREDO, J. L. C.; FARIAS, C. H. A.; AZEVEDO, H. M.; AZEVEDO, C. A. V. Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 283–288, 2006. DOI: 10.1590/s1415-43662006000200006.

DAVIJANI, M. H.; BANIHABIB, M. E.; ANVAR, A. N.; HASHEMI, S. R. Optimization model for the allocation of water resources based on the maximization of employment in the agriculture and industry sectors. **Journal of Hydrology**, v. 533, p. 430-438, 2016.

DOMINGUES, I. A. S. **Variabilidade climática e sua influência na produtividade da cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) na região norte e noroeste do Paraná.** Tese (Doutorado em em Geografia Física) - Universidade de São Paulo, 2010.

ELIA NETO, A.; SHINTAKU, A.; PIO, A. A. B.; CONDE, A. J.; FRANCESCO, F.; DONZELLI, J. L. **Manual de Conservação e Reuso de Água na Agroindústria Sucroenergética.** Coordenação técnica: André Elia Neto. Publicado por: ANA – Agência Nacional de Águas; FIESP – Federação das Indústrias do Estado de São Paulo; ÚNICA – União da Indústria da cana-de-açúcar; e CTC – Centro de Tecnologia Canavieira. Brasília, 2009.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Cropwat 8.0 model.** Roma, 2010. Disponível em: <<http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/cropwat/en/>>. Acesso em: nov. 2020.

\_\_\_\_\_. **Aquastat Country Profile – Brazil.** Rome, Italy, 2015. Disponível em: <<http://www.fao.org/aquastat/en/countries-and-basins/country-profiles/country/BRA>>. Acesso em set. 2020.

FERREIRA, R. C. **Evapotranspiração e produtividade de água no primeiro ciclo da cana-de-açúcar submetida à irrigação superficial no semiárido do Brasil.** Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.

FOLEGATTI, M. V.; ROMAN, R. M. S.; COELHO, R. D.; FRIZZONE, J. A. **Gestão dos recursos hídricos e agricultura irrigada no Brasil.** In: Carlos E. de M. Bicudo; José Galizia Tundisi, Marcos C. Barnsley Scheuenstuhl. (Org.). *Águas do Brasil: Análises Estratégicas.* São Paulo: Instituto de Botânica, p. 15-23, 2010.

GERMANO, B. N.; MORAES, M. M. G. A.; RAMOS, F. S. Custos de oportunidade para alocação de efluentes nas áreas plantadas de cana na bacia do rio Pirapama. **Estudos Econômicos**, v. 40, n. 3, p. 679-711, 2010.

GILBERT, R. A.; RAINBOLT, C. R.; MORRIS, D. R.; MCCRAY, J. M. Sugarcane growth and yield responses to a 3-month summer flood. **Agricultural Water Management**, v. 95, n. 3, p. 283–291, 2008.

GUNKEL, G. et al. Sugarcane industry as a source of water pollution – Case study on the situation in Ipojuca River, Pernambuco, Brazil. **Water, Air and Soil Pollution**, v. 180, p. 261-269, 2007.

GWP – Global Water Partnership. **Towards water security: a framework for action.**

Estocolmo: GWP, 2000.

HANAUER, J. G. **Produtividade de cana-de-açúcar em cultivo de cana-planta e cana-soca de um ano em Santa Maria**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria. 81 p. Santa Maria - RS, 2011.

HASSAN-ESFAHANI, L.; TORRES-RUA, A.; MCKEE, M. Assessment of optimal irrigation water allocation for pressurized irrigation system using water balance approach, learning machines, and remotely sensed data. **Agricultural Water Management**, v. 153, p. 42-50, 2015.

HERRERA-MARTINEZ, S.; VAN EIJCK, J.; DA CUNHA, M. P.; GUILHOTO, J. P.; WALTER, A.; FAAIJ, A. Analysis of socio-economic impacts os sustainable sugarcane-ethanol production by means of inter-regional Input-Output analysis: Demonstrated for Northeast Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Review**, v. 28, p. 290-316, 2013.

HOEKSTRA, A. Y.; CHAPAGAIN, A. K.; ALDAYA, M. M.; MEKONNEN, M. M. **The Water Footprint Assessment Manual**. Water Footprint Network. p. 216. London; Washington, DC: Earthscan, 2011.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção Agrícola Municipal 2017**. 2018. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html>>. Acesso em dez. 2018.

\_\_\_\_\_. **Produção Agrícola Municipal 2018**. 2019. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html>>. Acesso em jul. 2019.

\_\_\_\_\_. **Produto Interno Bruto dos Municípios**. 2017a. Disponível em: <<https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pib-munic/tabelas>>. Acesso em out. 2020.

\_\_\_\_\_. **Censo Agropecuário 2017**. 2017b. Disponível em: <[https://censos.ibge.gov.br/agro/2017/templates/censo\\_agro/resultadosagro/pecuaria.html?localidade=26&tema=75645](https://censos.ibge.gov.br/agro/2017/templates/censo_agro/resultadosagro/pecuaria.html?localidade=26&tema=75645)>. Acesso em out. 2020.

\_\_\_\_\_. **Censo Agropecuário 2006**. 2006. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9827-censo-agropecuaria.html?=&t=o-que-e>>. Acesso em out. 2020.

INMAN-BAMBER, N. G. Sugarcane water stress criteria for irrigation and drying off. **Field Crops Research**, v. 89, n. 1, p. 107–122, 2004. DOI: 10.1016/j.fcr.2004.01.018.

INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field Crops Research**, v. 92, n. 2- 3 SPEC. ISS., p. 185–202, 2005. DOI: 10.1016/j.fcr.2005.01.023.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Agrometeorologia dos Cultivos: O fator meteorológico na produção agrícola**. José Eduardo Monteiro (org.), p. 530, Brasília -DF, 2009. ISBN: 978-85-62817-00-7.

INSA - Instituto Nacional do Semiárido. **Recursos Hídricos em regiões áridas e semiáridas** / editores, Salomão de Sousa Medeiros, Hans Raj Gheyi, Carlos de Oliveira Galvão, Vital Pedro da Silva Paz – Campina Grande, PB: INSA, 2011.

\_\_\_\_\_. **Sinopse do Censo Demográfico para o Semiárido Brasileiro** / editores, Salomão de Sousa Medeiros *et al.* – Campina Grande, PB: INSA, 2012.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Sotcker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1585 pp., 2013.

KELMAN, J.; RAMOS, M. Custo, valor e preço da água utilizada na agricultura. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 2, n. 2. P. 39-48, 2005.

KOTSUKA, L. K. **Avaliação dos conceitos de água virtual e pegada hídrica na gestão de recursos hídricos: Estudo de caso da soja e óleo de soja**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba- PR, 2013.

LEITE, G. H. P.; CRUSCIOL, C. A. C. Reguladores vegetais no desenvolvimento e produtividade da cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 8, p. 995–1001, 2008. DOI: 10.1590/s0100-204x2008000800007.

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Projeções do Agronegócio: Brasil 2015/2016 a 2025/2026**. 7º ed, p. 138, 2016.

MARTINS, E. S. R.; MAGALHÃES, A. R. A seca de 2012 – 2015 no Nordeste e seus impactos.

**Parc. Strat. Ed. Especial**, Brasília, v. 20, n. 41, p. 107-128, 2015.

MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. **National Water Footprint accounts: the green, blue and grey water footprint of production and consumption**. Volume 2: Appendices. Value of Water Research Series, n. 50, 2011.

MELO, M. G. S. **Gestão ambiental no setor sucroalcooleiro de Pernambuco: entre a inesgotabilidade dos recursos naturais e os mecanismos de regulação**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

MIERZWA, J. C.; HESPANHOL, I. **Água na indústria: uso racional e reuso**. São Paulo, Oficina dos Textos, 143p., 2005.

MORAES, M. M. G. A. *et al.* The impact of global change on economic values of water for Public Irrigation Schemes at the São Francisco River Basin in Brazil. **Regional Environmental Change**, v. 1, p. 1, 2018.

MOURA, E. **Uso dos recursos hídricos na expansão sucroenergética em áreas do bioma cerrado**. 2017. Tese (Doutorado em Ambiente e Sociedade) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, 2017.

MOURA, E. P.; MÉLO, M. A. N.; MEDEIROS, D. D. Um estudo sobre o desempenho da agroindústria canavieira no Estado de Pernambuco no período de 1987 a 1996. **Production**, v. 14, n. 1, p. 78–91, 2004.

NOLETO, D. H. *et al.* Crescimento da cana-de-açúcar (2ª soca) sob diferentes níveis de irrigação. In: CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 21, 2011, Petrolina. As oportunidades de empreendedorismo na agricultura irrigada: anais. **Anais de Congresso**. Petrolina: ABID, 2011. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/910487/crescimento-da-cana-de-acucar-2-soca-sob-diferentes-niveis-de-irrigacao>>. Acesso em out. 2020.

OLIVEIRA, A. R.; SIMÕES, W. L.; CALGARO, M. Espaçamento e profundidade do sistema de irrigação gotejamento subsuperficial em cultivo de cana-de-açúcar. **Instruções Técnicas da Embrapa Semiárido**. Petrolina, 2013.

REBOUÇAS, A. C. Água no Brasil : abundância , desperdício e escassez. **Bahia Análise e & Dados**, v. 13, p. 341–345, 2003.

REZENDE, R. S.; JUNIOR, A. S. A. **Árvore do conhecimento cana-de-açúcar: Irrigação**. Agência Embrapa de Informação Tecnológica, s.d. Disponível em: <[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01\\_56\\_711200516718.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_56_711200516718.html)>. Acesso em: fev. 2020.

RIBEIRO, C. S.; **Pegada Hídrica e Água Virtual: Estudo de Caso da Manga no Submédio do Vale do São Francisco, Brasil**. Dissertação (Mestrado em Economia) - Universidade Federal da Bahia, 2014.

SABADIN, J. F. G. **Avaliação de modelo agrometeorológico para tolerância de genótipos de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) ao déficit hídrico**. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, Piracicaba - SP, 2013.

SALGUEIRO, J. H. P. B. **Avaliação da rede pluviométrica e análise de variabilidade espacial da precipitação: estudo de caso na bacia do Ipojuca em Pernambuco**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Pernambuco. Recife - PE, 2005.

SANTOS, M. C. **Cadernos do Semiárido: Solos do semiárido do Brasil**. p. 60, 2017.

SANTOS, R. R. S. **Acoplamento de modelo de alocação de água baseado em rede à modelagem de insumo-produto: uma proposta metodológica e aplicação em bacias hidrográfica interligadas do Agreste pernambucano**. Tese (Doutorado em Economia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2020.

SCARPARE, F. V. *et. al.* Sugarcane water footprint under different management practices in Brazil: avaliação da bacia do Tietê/Jacaré. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 4576-4584, 2016.

SILVA, J. A. A.; LYRA, M. R. C. C.; FLORENCIO, L. Mathematical modeling of the Biochemical Oxygen Demand (BOD) from water table in sugar cane plantation fertirrigated with vinasse in Brazil. **Modern Environmental Science and Engineering**, v. 2, n. 4., p. 217-224, 2016.

SILVA, R. A. **Impacto das mudanças climáticas sobre a produtividade e pegada hídrica da soja cultivada na região do Matopiba**. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, 2018a.

SILVA, E. S. **Pegada hídrica da cultura da pimenta malagueta (*Capsicum frutescens*) na região Agreste do estado de Sergipe**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio

Ambiente) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2018b.

SILVA, S. R. **Gestão da demanda de água para uso na agricultura em região semiárida: estudo de caso bacia do rio Salitre – BA**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2011.

SILVA, T. F. F. et. al. Requerimento hídrico e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 1. P. 64-71, 2012.

SILVA, V. P. R. et. al. Crop coefficient, water requirements, yield and water use efficiency of sugarcane growth in Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 128, p. 102-109, 2013.

SINDAÇÚCAR – Sindicato da Indústria do Açúcar e do Álcool no Estado de Pernambuco. **Boletim Geral de Produção: Safra 2010/2011**. 2011.

SOUZA, M. H. C. **Estratégias de alocação de água para irrigação no perímetro irrigado Pontal Sul**. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista. Botucatu, 2020.

SRH - Secretaria de Recursos Hídricos. **Plano Hidroambiental da bacia hidrográfica do rio Ipojuca: Tomo I - Diagnóstico Hidroambiental**. v. 02/03. 18 p. Recife - PE, 2010.

\_\_\_\_\_. **Plano Hidroambiental da bacia hidrográfica do rio Ipojuca: Tomo V - Mapas**. 13 p. Recife - PE, 2010a.

\_\_\_\_\_. **Plano Hidroambiental da bacia hidrográfica do rio Ipojuca: Tomo I – Diagnóstico Hidroambiental**. v. 01/03. 339 p. Recife, 2010b.

SRH - Secretaria de Recursos Hídricos; COMPESA - Companhia Pernambucana de Saneamento. **Projeto de Sustentabilidade Hídrica - PSHPE: Manual de operações do projeto**. v. 1, s.d.

SRHE – Secretaria de Recursos Hídricos e Energéticos. **Apresentação dos PHA das Bacias Hidrográficas dos Rios Capibaribe e Ipojuca**. Recife, s.d. Disponível em: <<http://www.sirh.srh.pe.gov.br/hidroambiental/index.php/abertura>>. Acesso em fev. 2020.

SUN, S. K.; WU, P. T.; WANG, Y. B.; ZHAO, X. N. Impacts of climate change on water footprint of spring wheat production: the case of an irrigation district in China. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 10, n. 4, p. 1176, 2012.

TEODORO, I.; NETO, J. D.; SOUZA, J. L.; LYRA, G. B.; BRITO, K. S.; SÁ, L. A.; SANTOS,

M. A. L.; SARMENTO, P. L. V. S. Isoquantas de produtividade da cana-de-açúcar em função de níveis de irrigação e adubação nitrogenada. **Irriga**, v. 18, p. 387–401, 2013.

TUCCI, C. E. M.; HESPANHOL, I.; NETTO, O. DE M. C. **Gestão da água no Brasil**. Brasília, DF: UNESCO, 2001.

TUNDISI, J. C. Governança da água. **Revista da Universidade Federal de Minas Gerais**, v. 20, n. 2, p. 222-235, 2013.

XIE, Y. L.; XIA, D. X.; JI, L.; HUANG, G. H. An inexact stochastic-fuzzy optimization model for agricultural water allocation and land resources utilization management under considering effective rainfall. **Ecological Indicators**, v. 92, p. 301-311, 2018.

WIEDENFELD, R. P. Water stress during different sugarcane growth periods on yield and response to N fertilization. **Agricultural Water Management**, v. 43, n. 2, p. 173–182, 2000.

WWAP - United Nations World Water Assessment Programme. **The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World**. Paris, 2015. ISBN 978-92-3-100071-3.

## APÊNDICE A – DADOS CLIMÁTICOS PARA O AGRESTE

Estação: SURUBIM – PE (OMM: 82797)

Latitude (graus): -7,83

Longitude (graus): -35,71

Altitude (metros): 418,32

Estação Operante

Início da operação: 01/10/1929

2007						
Mês	Precipitação (mm)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Insolação (horas)	Umidade Relativa Media (%)	Velocidade do Vento Media (m/s)
JANEIRO	23,20	34,20	20,00	8,81	78,16	3,48
FEVEREIRO	51,80	35,00	20,00	7,87	76,37	3,56
MARÇO	73,10	32,20	20,00	7,85	75,97	3,63
ABRIL	56,10	33,20	20,00	7,56	73,06	3,84
MAIO	39,70	31,00	19,00	7,15	78,54	3,64
JUNHO	123,00	29,60	17,60	4,87	83,41	3,66
JULHO	48,50	27,80	16,40	7,03	82,93	3,70
AGOSTO	48,60	28,80	16,80	6,43	82,55	4,20
SETEMBRO	29,30	30,60	17,00	7,56	75,59	4,28
OUTUBRO	3,60	32,40	17,40	8,77	70,54	4,24
NOVEMBRO	5,80	33,00	19,00	9,92	66,16	4,46
DEZEMBRO	16,80	33,40	17,10	8,94	67,83	4,38

2008						
Mês	Precipitação (mm)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Insolação (horas)	Umidade Relativa Media (%)	Velocidade do Vento Media (m/s)
JANEIRO	3,50	34,40	19,00	8,58	73,52	3,49
FEVEREIRO	1,40	35,00	19,50	9,31	70,79	4,39
MARÇO	157,40	35,20	20,40	7,46	74,14	3,33
ABRIL	58,40	31,20	19,00	7,51	81,66	3,26
MAIO	115,20	31,00	19,00	6,46	84,67	3,27
JUNHO	64,60	28,40	16,80	5,64	85,17	3,38
JULHO	93,20	28,20	16,20	5,42	83,83	3,75
AGOSTO	80,60	28,70	16,40	5,87	82,40	3,65
SETEMBRO	19,80	31,40	17,20	8,09	75,01	4,09
OUTUBRO	7,00	32,80	18,00	8,93	70,48	4,63
NOVEMBRO	0,40	34,00	19,00	9,67	68,61	4,50
DEZEMBRO	1,90	34,40	19,40	9,26	66,19	4,10

2009						
Mês	Precipitação (mm)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Insolação (horas)	Umidade Relativa Media (%)	Velocidade do Vento Media (m/s)
JANEIRO	9,00	35,00	19,60	8,55	75,13	3,31
FEVEREIRO	136,90	33,80	20,40	7,27	81,33	3,48
MARÇO	44,70	32,80	20,40	8,86	77,02	3,11
ABRIL	36,60	34,00	20,60	6,36	77,65	3,42
MAIO	95,30	31,80	19,60	5,88	82,23	2,70
JUNHO	69,20	29,60	17,20	5,78	84,60	3,17
JULHO	52,90	28,80	16,80	6,06	84,13	3,07
AGOSTO	49,70	29,00	17,00	6,21	82,11	3,43
SETEMBRO	15,80	31,60	17,60	8,31	76,14	3,58
OUTUBRO	0,30	32,80	17,20	9,15	67,10	3,97
NOVEMBRO	16,40	33,50	19,00	8,91	67,41	4,35
DEZEMBRO	12,60	34,20	20,20	7,81	68,45	3,68

2010						
Mês	Precipitação (mm)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Insolação (horas)	Umidade Relativa Media (%)	Velocidade do Vento Media (m/s)
JANEIRO	111,80	32,4	19,8	6,37	82,35	2,76
FEVEREIRO	43,50	34	19,6	7,50	76,78	3,90
MARÇO	25,00	35,6	21,4	8,72	68,06	3,27
ABRIL	92,80	33,6	20	7,56	76,28	3,00
MAIO	39,00	32,2	18,5	8,25	75,83	3,31
JUNHO	249,00	31,4	19	6,76	80,67	3,19
JULHO	38,90	28,4	17,8	6,50	82,54	3,27
AGOSTO	51,00	28,8	16	6,07	78,93	3,89
SETEMBRO	25,70	31,4	17	7,63	74,79	4,10
OUTUBRO	7,70	34	19,2	8,18	70,31	3,96
NOVEMBRO	2,90	34	18	9,78	66,29	4,11
DEZEMBRO	45,70	33,8	20,4	7,98	70,18	3,88

2011						
Mês	Precipitação (mm)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Insolação (horas)	Umidade Relativa Media (%)	Velocidade do Vento Media (m/s)
JANEIRO	70,30	33	20,8	7,36	78,03	3,07
FEVEREIRO	35,40	33,4	21	8,43	75,86	3,60
MARÇO	71,20	33,6	20,4	8,96	73,20	3,08
ABRIL	174,30	34,1	20,6	6,79	79,07	3,33
MAIO	184,30	29,6	19,2	4,96	85,96	3,08
JUNHO	97,30	28,8	17,6	6,00	84,58	3,10
JULHO	120,10	26,8	17,5	4,51	87,41	3,18
AGOSTO	62,60	28	16,8	6,99	82,76	3,27
SETEMBRO	13,90	31	16	8,27	76,08	3,57
OUTUBRO	15,00	32,2	17,6	7,98	73,42	3,40
NOVEMBRO	15,80	32,2	19	8,42	72,92	3,73
DEZEMBRO	3,20	33,8	19	9,09	68,44	4,14

2012						
Mês	Precipitação (mm)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Insolação (horas)	Umidade Relativa Media (%)	Velocidade do Vento Media (m/s)
JANEIRO	71,80	33,20	20,00	7,41	79,81	3,31
FEVEREIRO	48,90	31,60	19,60	8,91	78,69	3,82
MARÇO	6,10	33,00	19,00	9,21	69,11	3,72
ABRIL	3,50	33,40	19,00	9,06	68,30	3,72
MAIO	46,40	32,60	18,40	7,84	71,86	3,57
JUNHO	95,10	29,80	17,80	6,25	79,55	3,34
JULHO	59,30	27,50	16,00	6,15	83,22	3,46
AGOSTO	29,20	30,20	16,20	8,08	75,28	3,84
SETEMBRO	1,90	31,60	17,50	9,06	67,98	4,03
OUTUBRO	4,30	31,60	17,40	8,50	68,45	3,98
NOVEMBRO	1,40	33,80	18,50	9,19	67,56	3,98
DEZEMBRO	9,00	34,60	20,00	8,77	69,81	3,90

2013						
Mês	Precipitação (mm)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Insolação (horas)	Umidade Relativa Media (%)	Velocidade do Vento Media (m/s)
JANEIRO	31,00	33,40	19,80	7,97	75,03	3,16
FEVEREIRO	4,70	33,60	20,90	9,04	70,75	4,13
MARÇO	9,80	33,80	21,80	8,95	69,22	4,05
ABRIL	101,90	35,20	20,40	8,02	72,59	3,43
MAIO	35,50	30,20	18,60	7,28	81,31	3,16
JUNHO	73,00	29,00	17,50	6,81	82,75	3,06
JULHO	109,40	29,00	17,00	5,42	83,18	3,10
AGOSTO	45,40	29,20	16,60	7,20	80,74	3,35
SETEMBRO	14,40	30,80	16,20	7,74	77,87	3,72
OUTUBRO	11,40	32,20	18,60	8,90	72,52	3,99
NOVEMBRO	8,50	32,20	19,00	8,14	70,95	4,11
DEZEMBRO	10,50	34,00	20,40	7,83	71,38	3,75

2014						
Mês	Precipitação (mm)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Insolação (horas)	Umidade Relativa Media (%)	Velocidade do Vento Media (m/s)
JANEIRO	6,20	33,20	19,80	8,74	73,97	3,26
FEVEREIRO	81,00	33,00	20,00	6,92	77,86	3,60
MARÇO	28,30	33,60	21,00	8,25	72,48	3,68
ABRIL	46,90	33,60	21,00	7,84	73,33	3,51
MAIO	203,10	30,00	17,60	7,00	82,53	2,95
JUNHO	41,30	28,60	17,00	6,42	81,94	3,32
JULHO	55,10	29,80	16,40	6,59	80,81	3,49
AGOSTO	58,40	29,80	16,40	7,31	78,77	3,49
SETEMBRO	54,30	32,20	17,80	7,27	78,18	3,59
OUTUBRO	56,30	31,80	18,60	7,86	75,39	3,78
NOVEMBRO	67,80	34,00	19,20	7,90	72,56	3,76
DEZEMBRO	5,70	33,60	19,40	7,97	71,66	3,77

2015						
Mês	Precipitação (mm)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Insolação (horas)	Umidade Relativa Media (%)	Velocidade do Vento Media (m/s)
JANEIRO	9,10	33	19,8	8,66	76,77	3,23
FEVEREIRO	10,90	34,2	20	8,40	72,71	3,92
MARÇO	50,50	34	20	7,45	71,91	3,54
ABRIL	10,60	34,2	20	9,41	67,70	3,31
MAIO	43,00	33	19,8	8,15	71,06	3,44
JUNHO	98,10	30,4	18,4	5,70	83,70	2,99
JULHO	108,30	28	18,4	5,13	86,23	3,00
AGOSTO	16,50	29,8	16,6	8,26	79,27	3,55
SETEMBRO	7,20	31,6	17,2	8,35	69,44	3,82
OUTUBRO	7,30	32,8	17,5	9,00	68,75	3,90
NOVEMBRO	4,00	35,4	18,8	9,68	65,96	3,81
DEZEMBRO	41,60	35	19,8	7,38	71,06	3,69

2016						
Mês	Precipitação (mm)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Insolação (horas)	Umidade Relativa Media (%)	Velocidade do Vento Media (m/s)
JANEIRO	108,10	32,8	20	6,17	82,16	2,91
FEVEREIRO	31,60	33,2	19,2	8,52	79,14	3,25
MARÇO	31,80	34	20,2	7,64	75,45	3,45
ABRIL	73,90	34	20	7,32	77,28	3,44
MAIO	99,80	31,4	19	6,26	81,61	2,84
JUNHO	45,50	29,7	16,8	7,24	79,93	2,97
JULHO	12,90	30,6	17,5	7,50	75,13	3,21
AGOSTO	9,40	32	18	8,11	70,77	3,12
SETEMBRO	3,70	32,8	18	9,04	69,60	3,02
OUTUBRO	0,20	33,6	20	9,12	67,35	2,98
NOVEMBRO	0,60	33,8	20,6	9,26	65,98	2,72
DEZEMBRO	4,60	35,4	20,6	7,88	67,84	2,71

## APÊNDICE B – DADOS CLIMÁTICOS PARA A ZONA DA MATA

Estação: RECIFE CURADO - PE (OMM: 82900)

Latitude (graus): -8,05

Longitude (graus): -34,95

Altitude (metros): 10

Estação Operante

Início da operação: 07/07/1961

2007						
Mês	Precipitação (mm)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Insolação (horas)	Umidade Relativa Media (%)	Velocidade do Vento Media (m/s)
JANEIRO	83,50	32,40	21,10	8,28	74,98	2,16
FEVEREIRO	226,70	34,30	20,70	7,01	75,57	2,18
MARÇO	138,70	32,10	21,10	7,37	77,96	2,16
ABRIL	347,30	33,10	20,60	7,08	80,47	1,72
MAIO	208,20	31,90	20,30	6,62	83,85	1,58
JUNHO	390,80	29,70	19,20	4,33	84,22	1,59
JULHO	331,00	29,50	18,10	6,18	83,61	1,72
AGOSTO	223,70	29,80	18,10	6,34	81,19	2,23
SETEMBRO	127,10	28,80	19,10	6,91	79,47	2,39
OUTUBRO	25,60	30,60	18,00	7,48	74,06	2,78
NOVEMBRO	40,00	31,20	20,70	8,80	71,81	2,67
DEZEMBRO	30,60	32,20	20,50	8,54	70,56	2,63

2008						
Mês	Precipitação (mm)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Insolação (horas)	Umidade Relativa Media (%)	Velocidade do Vento Media (m/s)
JANEIRO	85,70	31,60	21,10	7,12	72,60	2,36
FEVEREIRO	32,30	33,90	21,00	8,85	69,22	2,39
MARÇO	395,40	32,80	20,20	6,70	77,48	1,51
ABRIL	314,20	31,70	20,10	7,06	82,21	1,26
MAIO	415,70	33,00	20,10	6,03	84,19	1,55
JUNHO	391,80	29,60	18,80	4,96	86,03	1,69
JULHO	374,30	28,10	19,40	5,00	85,24	1,95
AGOSTO	294,40	29,00	18,80	5,61	84,85	1,82
SETEMBRO	47,60	29,60	20,10	6,51	77,98	2,21
OUTUBRO	53,60	30,30	20,70	7,17	74,85	2,84
NOVEMBRO	16,00	31,80	20,10	8,56	69,29	2,73
DEZEMBRO	18,30	33,20	20,60	7,79	68,84	2,78

2009						
Mês	Precipitação (mm)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Insolação (horas)	Umidade Relativa Media (%)	Velocidade do Vento Media (m/s)
JANEIRO	85,20	32,70	21,10	7,74	70,02	2,71
FEVEREIRO	376,10	31,30	21,70	6,03	78,80	1,95
MARÇO	142,80	32,60	21,30	8,35	75,79	1,93
ABRIL	351,80	33,30	21,50	6,33	83,41	1,09
MAIO	410,10	31,90	22,00	5,32	87,69	1,06
JUNHO	333,00	29,80	20,30	5,37	86,38	1,69
JULHO	386,80	29,40	20,00	5,91	85,72	1,69
AGOSTO	290,20	29,90	19,40	7,07	82,29	2,14
SETEMBRO	83,50	30,30	19,60	7,12	77,62	2,27
OUTUBRO	16,30	31,60	19,80	8,35	71,35	2,37
NOVEMBRO	49,90	32,40	19,80	8,48	69,98	2,73
DEZEMBRO	47,80	32,20	21,20	7,87	72,98	2,45

2010						
Mês	Precipitação (mm)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Insolação (horas)	Umidade Relativa Media (%)	Velocidade do Vento Media (m/s)
JANEIRO	193,40	31,8	22	5,08	79,44	1,81
FEVEREIRO	45,20	32,8	22	6,90	75,97	2,15
MARÇO	92,70	33,6	21,5	7,83	75,27	1,90
ABRIL	273,30	33	22	7,02	82,41	1,77
MAIO	114,30	31,4	19,2	7,24	82,97	1,58
JUNHO	543,90	31,9	20,8	6,44	85,33	1,70
JULHO	259,40	29,5	19,8	5,75	84,06	1,91
AGOSTO	191,20	28,8	19	5,06	82,99	2,04
SETEMBRO	74,30	30,4	18,2	6,88	75,61	2,68
OUTUBRO	37,40	31,2	19,3	6,76	72,70	2,47
NOVEMBRO	23,50	31,9	20,2	9,09	67,80	2,58
DEZEMBRO	84,80	32,9	21,6	7,09	70,27	2,45

2011						
Mês	Precipitação (mm)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Insolação (horas)	Umidade Relativa Media (%)	Velocidade do Vento Media (m/s)
JANEIRO	139,30	31,6	21,1	6,20	74,62	2,13
FEVEREIRO	336,60	31,8	21,9	7,46	74,20	2,05
MARÇO	129,50	32,7	20,8	8,23	74,34	1,65
ABRIL	647,40	32,4	20,8	4,27	82,58	1,45
MAIO	755,70	31,3	19,1	4,24	86,70	1,60
JUNHO	303,90	29,8	18,2	4,97	84,54	1,81
JULHO	544,40	29	19,2	4,07	86,03	1,59
AGOSTO	201,80	29,2	18,1	5,64	79,73	1,93
SETEMBRO	35,70	29,4	18,4	5,30	74,58	2,47
OUTUBRO	34,60	31,2	19,6	6,21	71,96	2,46
NOVEMBRO	75,00	31	18,6	7,29	71,10	2,53
DEZEMBRO	41,80	32	19,3	7,65	69,81	2,41

2012						
Mês	Precipitação (mm)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Insolação (horas)	Umidade Relativa Media (%)	Velocidade do Vento Media (m/s)
JANEIRO	198,60	32,30	20,40	5,54	74,40	2,16
FEVEREIRO	189,80	31,40	20,60	6,69	73,60	2,49
MARÇO	138,80	31,60	20,20	7,27	73,09	2,16
ABRIL	55,80	31,60	17,10	7,91	74,10	2,08
MAIO	190,20	31,30	19,20	7,13	75,61	1,77
JUNHO	296,50	30,20	18,60	5,50	82,44	1,53
JULHO	261,70	28,80	18,80	6,22	80,01	1,89
AGOSTO	163,50	28,80	18,40	6,57	80,30	2,26
SETEMBRO	19,70	30,30	17,80	5,64	71,60	2,58
OUTUBRO	54,40	30,80	18,80	6,04	71,36	2,70
NOVEMBRO	9,90	32,10	19,60	7,95	66,06	2,56
DEZEMBRO	25,10	32,20	20,20	7,08	67,58	2,48

2013						
Mês	Precipitação (mm)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Insolação (horas)	Umidade Relativa Media (%)	Velocidade do Vento Media (m/s)
JANEIRO	95,70	33,10	19,70	7,34	70,38	2,35
FEVEREIRO	47,70	33,20	21,70	7,33	68,69	2,57
MARÇO	98,80	33,00	22,00	6,50	71,35	2,21
ABRIL	229,00	33,50	20,80	7,07	74,40	1,82
MAIO	316,90	31,40	20,70	6,54	80,75	1,42
JUNHO	491,40	30,40	19,50	6,11	86,29	1,30
JULHO	416,40	30,00	19,40	4,88	84,60	1,31
AGOSTO	225,30	29,10	19,00	5,98	80,46	1,97
SETEMBRO	146,00	30,40	19,20	4,74	78,87	2,27
OUTUBRO	129,20	31,10	20,10	5,31	75,52	2,25
NOVEMBRO	76,50	31,00	20,10	4,64	76,98	2,20
DEZEMBRO	177,30	32,20	21,20	5,21	74,48	2,41

2014						
Mês	Precipitação (mm)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Insolação (horas)	Umidade Relativa Media (%)	Velocidade do Vento Media (m/s)
JANEIRO	108,90	31,70	20,40	6,09	73,86	2,20
FEVEREIRO	148,20	32,40	20,80	4,16	77,57	1,75
MARÇO	252,40	32,00	21,60	5,48	79,37	1,81
ABRIL	268,50	33,20	21,00	6,99	77,07	1,47
MAIO	315,10	31,20	20,40	6,27	83,31	1,33
JUNHO	322,80	30,00	19,60	6,45	82,08	1,69
JULHO	278,90	29,30	19,00	5,90	82,27	1,75
AGOSTO	162,20	29,40	18,40	5,78	80,71	1,86
SETEMBRO	248,90	30,20	19,20	4,44	80,28	1,88
OUTUBRO	146,50	30,00	21,00	6,46	78,26	2,17
NOVEMBRO	56,00	32,00	19,80	7,80	73,31	1,87
DEZEMBRO	71,30	31,80	20,40	7,24	73,43	1,97

2015						
Mês	Precipitação (mm)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Insolação (horas)	Umidade Relativa Media (%)	Velocidade do Vento Media (m/s)
JANEIRO	65,40	32,2	19,6	8,76	71,43	2,19
FEVEREIRO	56,20	32,6	21,4	8,19	71,42	2,00
MARÇO	341,20	32,9	20,8	6,64	76,58	1,60
ABRIL	74,60	32,5	20,2	8,62	73,64	1,59
MAIO	178,90	32	20,2	7,79	77,31	1,43
JUNHO	460,50	30,6	19,6	5,68	83,52	1,15
JULHO	446,30	29,6	18,7	4,42	83,22	1,48
AGOSTO	116,00	30,2	18,4	7,16	79,76	1,84
SETEMBRO	35,10	31	18,8	7,97	73,64	2,00
OUTUBRO	16,60	31,4	19,8	7,96	70,46	2,25
NOVEMBRO	30,60	32,9	20,3	9,28	68,74	2,29
DEZEMBRO	91,80	33	19,8	7,12	69,73	2,08

2016						
Mês	Precipitação (mm)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Insolação (horas)	Umidade Relativa Media (%)	Velocidade do Vento Media (m/s)
JANEIRO	124,00	33,2	20,1	5,99	73,19	1,54
FEVEREIRO	70,00	32,9	21	7,10	74,37	1,66
MARÇO	265,10	33,8	22,4	6,50	75,77	1,64
ABRIL	293,60	32	22,2	6,37	79,27	1,61
MAIO	478,30	31,4	20,7	6,06	82,12	1,24
JUNHO	152,40	31,2	18,8	7,48	80,91	1,26
JULHO	111,30	29,6	18	6,49	81,27	1,67
AGOSTO	58,30	30,2	18	6,81	77,30	1,86
SETEMBRO	58,20	31,4	18,6	7,87	73,73	2,08
OUTUBRO	14,10	32,4	20,2	8,13	70,31	2,36
NOVEMBRO	17,30	33,2	20,4	7,93	70,17	2,21
DEZEMBRO	68,00	33,6	20,2	7,37	70,80	2,14

## APÊNDICE C – DADOS DE SOLO E CULTIVO PARA ENTRADA NO CROPWAT

### A) Dados do cultivo da cana-de-açúcar

<b>Parâmetro</b>	<b>Agreste</b>	<b>Zona da Mata</b>	<b>Período do ciclo</b>
Data de plantio	01/out	01/out	
Ciclo (dias)	320	320	-
Coeficiente de cultivo (kc)	0,65	0,18	Início
	1,1	1,06	Médio
	0,85	0,76	Final
Duração das fases (dias)	30	30	Início
	50	50	Desenvolvimento
	180	180	Médio
	60	60	Final
Altura máxima (m)	3	3	-
Profundidade da raiz (m)	0,3	0,3	-
	1,2	1,2	-
Fator de resposta	1,2	1,2	Início
	0,75	0,75	Desenvolvimento
	0,5	0,5	Médio
	0,5	0,5	Final
	0,1	0,1	Total
Fator de esgotamento (fração)	0,65	0,65	-

### B) Dados do solo

<b>Parâmetro</b>	<b>Agreste</b>	<b>Zona da Mata</b>
Tipo de solo	Textura médio	Textura argilosa
Umidade total disponível (mm/m)	110	150
Taxa máxima de infiltração (mm/dia)	40	40
Profundidade máxima da raiz (cm)	700	700
Depleção inicial da umidade (%)	0	0
Umidade inicial disponível (mm/m)	110	150

## APÊNDICE D – DADOS DE ENTRADA PARA ANÁLISE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON

### A) AGRESTE

Ano	Etverde (mm)	Etazul (mm)	Etcultivo (mm)	PHverde (m <sup>3</sup> /t)	PHazul (m <sup>3</sup> /t)	Precipitação (mm)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Insolação (horas)	Umidade (%)	Vel. Vento (m/s)
2007	450,1	1277,0	1727,1	97,0	275,1	519,5	31,8	18,4	7,7	75,9	3,9
2008	491,5	1233,1	1724,6	105,9	265,6	603,4	32,1	18,3	7,7	76,4	3,8
2009	444,3	1190,2	1634,5	95,7	256,4	539,4	32,2	18,8	7,4	76,9	3,4
2010	536,7	1164,9	1701,6	115,6	250,9	733,0	32,5	18,9	7,6	75,3	3,6
2011	729,5	831,7	1561,2	157,2	179,2	863,4	31,4	18,8	7,3	78,1	3,4
2012	329,1	1434,5	1763,6	70,9	309,0	376,9	31,9	18,3	8,2	73,3	3,7
2013	405,9	1303,3	1709,2	87,4	280,8	455,5	31,9	18,9	7,8	75,7	3,6
2014	544,0	1109,5	1653,5	117,2	239,0	704,4	31,9	18,7	7,5	76,6	3,5
2015	379,0	1378,4	1757,4	81,6	296,9	407,1	32,6	18,9	8,0	73,7	3,5
2016	372,4	1272,6	1645,0	80,2	274,1	422,1	32,8	19,2	7,8	74,4	3,1

### B) ZONA DA MATA

Ano	Etverde (mm)	Etazul (mm)	Etcultivo (mm)	PHverde (m <sup>3</sup> /t)	PHazul (m <sup>3</sup> /t)	Precipitação (mm)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	Insolação (horas)	Umidade (%)	Vel. Vento (m/s)
2007	956,8	243,2	1200,0	188,2	47,9	2173,2	31,3	19,8	7,1	78,1	2,2
2008	896,3	295,7	1192,0	176,3	58,2	2439,3	31,2	20,1	6,8	77,7	2,1
2009	912,1	241,8	1153,9	179,4	47,6	2573,5	31,5	20,6	7,0	78,5	2,0
2010	931,2	233,0	1164,2	183,2	45,8	1933,4	31,6	20,5	6,8	77,9	2,1
2011	1011,3	84,1	1095,4	199,0	16,6	3245,7	31,0	19,6	6,0	77,5	2,0
2012	973,1	234,8	1207,9	191,4	46,2	1604,0	31,0	19,1	6,6	74,2	2,2
2013	1090,7	362,2	1452,9	182,5	49,4	2450,2	31,5	20,3	6,0	76,9	2,0
2014	971,2	128,9	1100,1	191,1	25,4	2379,7	31,1	20,1	6,1	78,5	1,8
2015	1074,7	137,4	1212,1	211,4	27,0	1913,2	31,7	19,8	7,5	75,0	1,8
2016	891,7	263,0	1154,7	175,4	51,7	1710,6	32,1	20,1	7,0	75,8	1,8

**APÊNDICE E – PEGADAS HÍDRICAS VERDE, AZUL E TOTAL PARA  
OS MUNICÍPIOS DO AGRESTE E DA ZONA DA MATA**

**A) AGRESTE**

Bezerros			
Ano	PHverde (m <sup>3</sup> /t)	PHazul (m <sup>3</sup> /t)	PHtotal (m <sup>3</sup> /t)
2007	94,5	268,2	362,7
2008	103,2	259,0	362,2
2009	93,3	249,9	343,2
2010	112,7	244,6	357,3
2011	153,2	174,7	327,9
2012	69,1	301,2	370,4
2013	85,2	273,7	358,9
2014	114,2	233,0	347,2
2015	79,6	289,5	369,1
2016	78,2	267,2	345,5

Caruaru			
Ano	PHverde (m <sup>3</sup> /t)	PHazul (m <sup>3</sup> /t)	PHtotal (m <sup>3</sup> /t)
2007	253,2	718,4	971,6
2008	276,5	693,7	970,2
2009	250,0	669,6	919,5
2010	301,9	655,3	957,3
2011	410,4	467,9	878,3
2012	185,1	807,0	992,2
2013	228,3	733,2	961,5
2014	306,0	624,2	930,2
2015	213,2	775,4	988,7
2016	209,5	715,9	925,4

Chã Grande			
Ano	PHverde (m <sup>3</sup> /t)	PHazul (m <sup>3</sup> /t)	PHtotal (m <sup>3</sup> /t)
2007	103,4	293,3	396,7
2008	112,9	283,2	396,1
2009	102,1	273,4	375,4
2010	123,3	267,6	390,9
2011	167,6	191,0	358,6
2012	75,6	329,5	405,1
2013	93,2	299,4	392,6
2014	125,0	254,9	379,8
2015	87,1	316,6	403,7
2016	85,5	292,3	377,9

Gravatá			
Ano	PHverde (m <sup>3</sup> /t)	PHazul (m <sup>3</sup> /t)	PHtotal (m <sup>3</sup> /t)
2007	116,2	329,6	445,8
2008	126,9	318,3	445,1
2009	114,7	307,2	421,9
2010	138,5	300,7	439,2
2011	188,3	214,7	403,0
2012	84,9	370,3	455,2
2013	104,8	336,4	441,2
2014	140,4	286,4	426,8
2015	97,8	355,8	453,6
2016	96,1	328,5	424,6

Pombos			
Ano	PHverde (m <sup>3</sup> /t)	PHazul (m <sup>3</sup> /t)	PHtotal (m <sup>3</sup> /t)
2007	98,0	277,9	375,9
2008	107,0	268,4	375,3
2009	96,7	259,0	355,7
2010	116,8	253,5	370,3
2011	158,8	181,0	339,8
2012	71,6	312,2	383,8
2013	88,3	283,6	372,0
2014	118,4	241,5	359,8
2015	82,5	300,0	382,5
2016	81,0	277,0	358,0

Riacho das Almas			
Ano	PHverde (m <sup>3</sup> /t)	PHazul (m <sup>3</sup> /t)	PHtotal (m <sup>3</sup> /t)
2007	225,1	638,5	863,6
2008	245,8	616,6	862,3
2009	222,2	595,1	817,3
2010	268,4	582,5	850,8
2011	364,8	415,9	780,6
2012	164,6	717,3	881,8
2013	203,0	651,7	854,6
2014	272,0	554,8	826,8
2015	189,5	689,2	878,7
2016	186,2	636,3	822,5

Sairé			
Ano	PHverde (m <sup>3</sup> /t)	PHazul (m <sup>3</sup> /t)	PHtotal (m <sup>3</sup> /t)
2007	98,8	280,2	379,0
2008	107,8	270,6	378,4
2009	97,5	261,2	358,7
2010	117,8	255,6	373,4
2011	160,1	182,5	342,6
2012	72,2	314,8	387,0
2013	89,1	286,0	375,0
2014	119,4	243,5	362,8
2015	83,2	302,5	385,6
2016	81,7	279,2	361,0

São Caetano			
Ano	PHverde (m <sup>3</sup> /t)	PHazul (m <sup>3</sup> /t)	PHtotal (m <sup>3</sup> /t)
2007	225,1	638,5	863,6
2008	245,8	616,6	862,3
2009	222,2	595,1	817,3
2010	268,4	582,5	850,8
2011	364,8	415,9	780,6
2012	164,6	717,3	881,8
2013	203,0	651,7	854,6
2014	272,0	554,8	826,8
2015	189,5	689,2	878,7
2016	186,2	636,3	822,5

## B) ZONA DA MATA

Amaraji			
Ano	PHverde (m <sup>3</sup> /t)	PHazul (m <sup>3</sup> /t)	PHtotal (m <sup>3</sup> /t)
2007	187,2	47,6	234,7
2008	175,3	57,8	233,2
2009	178,4	47,3	225,7
2010	182,2	45,6	227,7
2011	197,8	16,5	214,3
2012	190,3	45,9	236,3
2013	181,4	49,1	230,6
2014	190,0	25,2	215,2
2015	210,2	26,9	237,1
2016	174,4	51,4	225,9

Escada			
Ano	PHverde (m <sup>3</sup> /t)	PHazul (m <sup>3</sup> /t)	PHtotal (m <sup>3</sup> /t)
2007	187,4	47,6	235,0
2008	175,5	57,9	233,4
2009	178,6	47,3	226,0
2010	182,3	45,6	228,0
2011	198,0	16,5	214,5
2012	190,6	46,0	236,5
2013	181,6	49,2	230,8
2014	190,2	25,2	215,4
2015	210,4	26,9	237,4
2016	174,6	51,5	226,1

Ipojuca			
Ano	PHverde (m <sup>3</sup> /t)	PHazul (m <sup>3</sup> /t)	PHtotal (m <sup>3</sup> /t)
2007	183,2	46,6	229,8
2008	171,6	56,6	228,2
2009	174,6	46,3	220,9
2010	178,3	44,6	222,9
2011	193,6	16,1	209,7
2012	186,3	45,0	231,3
2013	177,6	48,1	225,7
2014	186,0	24,7	210,6
2015	205,8	26,3	232,1
2016	170,7	50,4	221,1

Primavera			
Ano	PHverde (m <sup>3</sup> /t)	PHazul (m <sup>3</sup> /t)	PHtotal (m <sup>3</sup> /t)
2007	186,9	47,5	234,4
2008	175,1	57,8	232,9
2009	178,2	47,2	225,4
2010	181,9	45,5	227,4
2011	197,6	16,4	214,0
2012	190,1	45,9	236,0
2013	181,2	49,1	230,3
2014	189,7	25,2	214,9
2015	209,9	26,8	236,8
2016	174,2	51,4	225,6

Vitória de Santo Antão			
Ano	PHverde (m <sup>3</sup> /t)	PHazul (m <sup>3</sup> /t)	PHtotal (m <sup>3</sup> /t)
2007	195,3	49,6	244,9
2008	183,0	60,4	243,3
2009	186,2	49,4	235,5
2010	190,1	47,6	237,6
2011	206,4	17,2	223,6
2012	198,6	47,9	246,6
2013	189,3	51,3	240,6
2014	198,2	26,3	224,6
2015	219,4	28,0	247,4
2016	182,0	53,7	235,7

## ANEXO A – CURRÍCULOS LATTES DA ALUNA, ORIENTADORA E COORIENTADORA



### Marianna Oliveira Moura

Endereço para acessar este CV: <http://lattes.cnpq.br/4001263257231789>

ID Lattes: **4001263257231789**

Última atualização do currículo em 02/01/2021

Mestranda em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco, com área de concentração em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos. Possui graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária pela Universidade Federal de Sergipe (2017) e graduação sanduíche pela University of New Hampshire (EUA) (2014-2015). Obteve experiência nas áreas de Monitoramento Ambiental, com ênfase na qualidade do ar, Ecotoxicologia de Ambientes Aquáticos e Gestão Ambiental, através da participação em projeto de avaliação de impactos ambientais causados por indústrias do estado de New Hampshire (EUA). Além disso, realizou estudos na área de Engenharia de Processos, por meio de aplicação de metodologia de integração de processos para maximização do reuso de água industrial. (Texto informado pelo autor)

### Identificação

Nome	Marianna Oliveira Moura
Nome em citações bibliográficas	MOURA, M. O.; MOURA, MARIANNA; MOURA, MARIANNA OLIVEIRA
Lattes iD	<a href="http://lattes.cnpq.br/4001263257231789">http://lattes.cnpq.br/4001263257231789</a>

### Endereço

### Formação acadêmica/titulação

2017	Mestrado em andamento em Engenharia Civil (Conceito CAPES 5), Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, Brasil. Título: Impactos na pegada hídrica do cultivo da cana-de-açúcar em um período de seca na bacia hidrográfica do Ipojuca em Pernambuco, Orientador:  Maria de Lourdes Florêncio dos Santos. Coorientador: Márcia Maria Guedes Alcoforado de Moraes. Bolsista do(a): Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, Brasil. Palavras-chave: gestão hídrica; mudanças climáticas; agronegócio; sustentabilidade. Grande área: Ciências Agrárias
2011 - 2017	Grande Área: Ciências Agrárias / Área: Agronomia / Subárea: Engenharia Civil. Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Sergipe, UFS, Brasil. com período sanduíche em University of New Hampshire (Orientador: Katherine Earley). Título: Proposta de reuso de águas residuárias utilizando Diagrama de Fontes de Água: caso de uma fábrica de papel. Orientador: Inaura Carolina Carneiro da Rocha. Bolsista do(a): Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, Brasil.

### Formação Complementar

2016 - 2016	Especiação e toxicidade dos metais em organismos aquáticos: estudos de caso. (Carga horária: 4h). Pontifícia Universidade Católica do Paraná, PUC/PR, Brasil.
2014 - 2014	English as a Second Language (Avançado). University of New Hampshire, UNH., Estados Unidos.
2011 - 2011	Gestão de Resíduos Sólidos. (Carga horária: 8h). Universidade Tiradentes, UNIT, Brasil.
2011 - 2011	Programa de Ensino para Elaboração de Projetos em Educação Ambiental. (Carga horária: 8h). Universidade Federal de Sergipe, UFS, Brasil.



## Maria de Lourdes Florencio dos Santos

Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq - Nível 1D

Endereço para acessar este CV: <http://lattes.cnpq.br/9481193101590250>

ID Lattes: **9481193101590250**

Última atualização do currículo em 18/11/2020

Possui graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Pernambuco (1978), mestrado em Engenharia Civil (Hidráulica e Saneamento) pela Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo (1981) e doutorado em Ciências Agrícolas e Ambiental (Tecnologia Ambiental) pela Universidade de Wageningen - Holanda (1994). Em 2010, foi agraciada com a Comenda da Ordem do Mérito Científico do Ministério da Ciência e Tecnologia. É Professora Titular do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco. É membro da Academia Pernambucana de Engenharia. Coordenou de junho de 2007 a fevereiro de 2012 o Programa PIBIC/CNPq na UFPE. Foi coordenadora nacional do Programa PROSAB, da rede temática Esgoto, edital 2 (2003-2006) e da Rede Nacional Remoção de Nutrientes de esgotos - RENTRES, Finep Edital 06/2010 (2011-2015). Tem experiência na área de Engenharia Ambiental, atuando principalmente nos seguintes temas: avaliação ambiental, controle da poluição, qualidade da água, saneamento básico e ambiental, tratamento e pós-tratamento de esgotos, e reúso de água. (Texto informado pelo autor)

### Identificação

<b>Nome</b>	Maria de Lourdes Florencio dos Santos
<b>Nome em citações bibliográficas</b>	Florencio, L.;Santos, M.L.F.;Florencio, M.L.;FLORENCIO, L.;Florencio, Lourdinha;SANTOS, MARIA DE LOURDES FLORÊNCIO DOS;De Lourdes Florencio dos Santos, M.;FLORÊNCIO, L.;L Florencio;L. Florencio;L. Florencio;FLORÊNCIO, LOURDINHA
<b>Lattes ID</b>	 <a href="http://lattes.cnpq.br/9481193101590250">http://lattes.cnpq.br/9481193101590250</a>

### Endereço

<b>Endereço Profissional</b>	Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Departamento de Eng Civil Grupo de Saneamento Ambiental. Avenida Acadêmico Hélio Ramos s/n Cidade Universitária 50670-530 - Recife, PE - Brasil Telefones: (81) 21268742 Fax: (81) 21268219
------------------------------	--

### Formação acadêmica/titulação

<b>1989 - 1994</b>	Doutorado em Environmental Technology. Wageningen Agricultural University, WAU, Holanda. Título: The Fate of Methanol in Anaerobic Bioreactors, Ano de obtenção: 1994. Orientador: Gatzke Lettinga. Bolsista do(a): Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, Brasil. Palavras-chave: metanol; bioreator anaerobio; Competição microbiana; Estabilidade operacional; Micronutrientes; metanogêneses. Grande área: Engenharias Grande Área: Engenharias / Área: Engenharia Sanitária / Subárea: Saneamento Ambiental / Especialidades: Microbiologia Aplicada e Engenharia Sanitária. Setores de atividade: Produtos e Processos Biotecnológicos; Produtos e Serviços Voltados Para A Defesa e Proteção do Meio Ambiente, Incluindo O Desenvolvimento Sustentado; Captação, Tratamento e Distribuição de Água, Limpeza Urbana, Esgoto e Atividades Conexas.
<b>1979 - 1981</b>	Mestrado em Engenharia Civil Hidráulica e Saneamento. Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo, EESC-USP, Brasil. Título: Influência da Estrutura do Floco no Desempenho de um Sistema de Lodos Ativados, Ano de Obtenção: 1985. Orientador: Samuel Murgel Branco. Bolsista do(a): Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, Brasil. Palavras-chave: lodos ativados; Tratamento aerobio; Microbiologia aplicada.



## Márcia Maria Guedes Alcoforado de Moraes

Endereço para acessar este CV: <http://lattes.cnpq.br/9857333541846350>

ID Lattes: **9857333541846350**

Última atualização do currículo em 31/07/2020

Márcia Maria Guedes Alcoforado de Moraes, Pós-Doutorado na University of Illinois at Urbana-Champaign UIUC/ EUA (2010-2011), Doutora em Economia pela Universidade Federal de Pernambuco ( UFPE ) em 2003 com estágio no International Food Policy Research Institute (IFPRI). Seu mestrado e a graduação foram ambos obtidos em Engenharia Elétrica. Atualmente é professora titular da mesma Universidade (UFPE) , tendo formado em 2007 o Grupo de Apoio a Gestão Econômico-Integrada (GAPGEIn), ligado aos Programas de Pós-Graduação em Economia (PIMES) na área de Métodos Quantitativos em Economia e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) na área de Tecnologia ambiental e Recursos Hídricos. Entre 2011 e 2013 atuou como consultora do Banco Internacional para Reconstrução e Desenvolvimento - BIRD ou Banco Mundial. Vem a partir daí atuando em equipes de importantes projetos de pesquisa nacionais e internacionais. Coordenou a elaboração de capítulo referente a políticas e instrumentos regulatórios e econômicos, com influência sobre a relação entre produção de bioenergia e disponibilidade e uso da água, em relatório publicado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (Pnuma), intitulado: The bioenergy and water nexus. Atua desde 2015 como especialista convidada do Grupo de Trabalho no. 6, que trata do nexo Água-Bioenergia , do GBEP (Global Bioenergy Partnership). Entre 2012-2016 compôs o Comitê Diretor de projeto financiado pela National Science Foundation (NSF) com o objetivo de criar uma rede de pesquisa em sustentabilidade na produção de biocombustíveis e bioenergia nas Américas, liderado pela Michigan Technological University (MTU). Atualmente lidera projeto de pesquisa com recursos da ANA, agenciado pela CAPES voltado a apoiar a decisão na aplicação de instrumentos de gestão previstos na Política Nacional de Recursos Hídricos usando modelos econômicos integrados. Tem publicações nacionais e internacionais em periódicos científicos, dentre os quais se destacam: Regional Environmental Change; Environmental Mangement; Biofuels, Bioproducts & Biorefining, e Journal of Water Resources Planning and Management. Orienta teses de doutorado, dissertações de mestrado, iniciação científica e monografias de conclusão de curso de graduação. Sua linha de atuação principal é Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos usando modelos matemáticos; envolvendo fortemente Microeconomia Aplicada, Otimização Linear e Não-Linear, e Sistemas de Apoio a Decisão Espaciais. (Texto informado pelo autor)

### Identificação

<b>Nome</b>	Márcia Maria Guedes Alcoforado de Moraes
<b>Nome em citações bibliográficas</b>	MORAES, Márcia Maria Guedes Alcoforado de; Moraes, Márcia Maria Guedes Alcoforado de; Moraes, Marcia M.G.A.; de Moraes, Márcia Maria Guedes Alcoforado; De Moraes, Márcia M. G. Alcoforado; de Moraes, Marcia M. G. A.; De Moraes, M.M.G.A.; Moraes, Márcia Guedes Alcoforado; Moraes, Márcia Guedes Alcoforado de; ALCOFORADO DE MORAES, MÁRCIA MARIA GUEDES; Alcoforado de Moraes, Márcia M. G.
<b>Lattes iD</b>	 <a href="http://lattes.cnpq.br/9857333541846350">http://lattes.cnpq.br/9857333541846350</a>

### Endereço

<b>Endereço Profissional</b>	Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Ciências Sociais Aplicadas, Departamento de Ciências Econômicas. Av. dos Economistas, s/n Cidade Universitária 50740590 - Recife, PE - Brasil Telefones: (81) 21268378 Ramal: 246 Fax: (81) 21268378 URL da Homepage: <a href="http://www.ufpe.br/decon/sitedecon/visao/professor/principal/?dp=48">http://www.ufpe.br/decon/sitedecon/visao/professor/principal/?dp=48</a>
------------------------------	--

### Formação acadêmica/titulação