

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA LUIZ DE QUEIROZ  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE BIOSISTEMAS**

**Potencial de irrigação da cultura da cana-de-açúcar na microrregião de Araçatuba, SP, em função da disponibilidade hídrica regional**

**Vinicius Perin**

**Trabalho apresentado para conclusão do curso de  
Engenharia Agronômica.**

**Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Sentelhas**

**Piracicaba  
2016**



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	9
<b>2. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA .....</b>	10
2.1 Aspectos gerais da cana-de-açúcar .....	10
2.2 Fenologia e ciclos .....	12
2.3 Condições climáticas requeridas pela cultura da cana-de-açúcar.....	14
2.3.1 Radiação solar.....	14
2.3.2 Temperatura.....	15
2.3.3 Demanda hídrica.....	15
2.4 Canaviais irrigados .....	17
2.5 Disponibilidade hídrica superficial.....	18
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	20
3.1 Região de estudo.....	20
3.2 Obtenção e processamento dos dados meteorológicos.....	22
3.2.1 Estimação da evapotranspiração de referência .....	25
3.2.2 Cálculo do balanço hídrico climatológico sequencial .....	26
3.2.3 Componentes do balanço hídrico da cultura.....	28
3.3 Processamento dos dados geográficos para geração dos mapas.....	28
3.4 Área de produção de cana-de-açúcar por município .....	30
3.5 Cálculo da disponibilidade hídrica superficial .....	31
3.6 Cálculo da porcentagem da lâmina requerida coberta pela água disponível.....	34
3.7 Área irrigável utilizando diferentes níveis de irrigação.....	34
<b>4. RESULTADOS .....</b>	35
4.1 Água superficial disponível por município .....	35
4.2 Diferentes cenários da lâmina de irrigação requerida .....	37
4.3 Cenários de cobertura da lâmina requerida .....	46
4.4 Cenários de % de áreas irrigáveis de cana-de-açúcar por município .....	47
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	56
<b>6. REFERÊNCIAS .....</b>	58

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais e irmãos que sempre estiveram ao meu lado em todas as minhas decisões, e pelo grande apoio durante toda graduação.

Aos amigos da República Vira-Latas por todo apoio e compreensão durante os últimos cinco anos.

Ao candidato a título de Doutor Henrique Boriolo Dias pela paciência, ensinamentos e pela grande amizade.

Ao Professor Dr. Sérgio Nascimento Duarte pelo apoio, ensinamentos e pela grande amizade.

Ao Professor Dr. Paulo Cesar Sentelhas pelo apoio, ensinamentos, conselhos e pela grande amizade.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”!

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 - Representação das fases fenológicas da cultura de cana-de-açúcar. Adaptado de FAO (1980) .....	13
Figura 2 - Microrregião de Araçatuba, SP, com seus 33 municípios (números se referem à ordem apresentada na Tabela 3) e as estações pluviométricas consideradas no presente estudo.....	20
Figura 3 - Relação entre os dados de precipitação (chuva), temperatura máxima, temperatura mínima e evapotranspiração de referência observados e da base de dados de Xavier et al. (2015), para a localidade de Alto Alegre, SP (estação #1) .....	24
Figura 4 - Representação dos fluxos de entrada e saída do balanço hídrico climatológico a partir do Princípio de Conservação de Massa em um dado volume de solo. ....	26
Figura 5 - Classificação dos municípios da microrregião de Araçatuba, SP de acordo com a área cultivada com cana-de-açúcar. Fonte: CANASAT (2016). ....	30
Figura 6 - Vazão Ecológica Q <sub>7,10</sub> espacializada para a microrregião de Araçatuba, SP. Os dados de vazão foram obtidos a partir do sistema proposto por Wolff (2013). ....	33
Figura 7 - Lâmina de irrigação requerida para a cultura da cana-de-açúcar, considerando-se o percentil de 50%, na microrregião de Araçatuba, SP.....	41
Figura 8 - Lâmina de irrigação requerida para a cultura da cana-de-açúcar, considerando-se o percentil de 60%, na microrregião de Araçatuba, SP.....	42
Figura 9 - Lâmina de irrigação requerida para a cultura da cana-de-açúcar, considerando-se o percentil de 75%, na microrregião de Araçatuba, SP.....	43
Figura 10 - Lâmina de irrigação requerida para a cultura da cana-de-açúcar, considerando-se o percentil de 80%, na microrregião de Araçatuba, SP.....	44
Figura 11- Lâmina de irrigação requerida para a cultura da cana-de-açúcar, considerando-se o percentil de 90%, na microrregião de Araçatuba, SP.....	45
Figura 12- Distribuição da porcentagem de cobertura da lâmina de 20% em relação a necessidade total da cultura. ....	49
Figura 13- Distribuição da porcentagem de cobertura da lâmina de 40% em relação a necessidade total da cultura. ....	49
Figura 14 - Distribuição da porcentagem de cobertura da lâmina de 60% em relação a necessidade total da cultura da cana-de-açúcar, na microrregião de Araçatuba, SP.....	50
Figura 15 - Distribuição da porcentagem de cobertura da lâmina de 80% em relação a necessidade total da cultura da cana-de-açúcar, na microrregião de Araçatuba, SP.....	50
Figura 16 - Distribuição da porcentagem de cobertura da lâmina de 100% em relação a necessidade total da cultura da cana-de-açúcar, na microrregião de Araçatuba, SP.....	51
Figura 17 - Porcentagem de área irrigável da cultura da cana-de-açúcar na microrregião de Araçatuba, SP, considerando 20% da lâmina total necessária. ....	53
Figura 18 - Porcentagem de área irrigável da cultura da cana-de-açúcar na microrregião de Araçatuba, SP, considerando 40% da lâmina total necessária .....	53
Figura 19 - Porcentagem de área irrigável da cultura da cana-de-açúcar na microrregião de Araçatuba, SP, considerando 60% da lâmina total necessária. ....	54
Figura 20 - Porcentagem de área irrigável da cultura da cana-de-açúcar na microrregião de Araçatuba, SP, considerando 80% da lâmina total necessária. ....	54
Figura 21 - Porcentagem de área irrigável da cultura da cana-de-açúcar na microrregião de Araçatuba, SP, considerando 100% da lâmina total necessária. ....	55

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Distribuição das áreas de produção de cana-de-açúcar por estado durante a safra 2015/2016.....	11
Tabela 2 - Consumo médio de água pela cana-de-açúcar em diferentes ciclos e locais ao redor do mundo.....	16
Tabela 3- Relação dos municípios da microrregião de Araçatuba, SP, com seus respectivos números apresentados na Figura 2 e código do IBGE.....	21
Tabela 4 - Coordenadas geográficas e altitude das estações pluviométricas da ANA, DAEE/SP e CIIAGRO/IAC. ....	22
Tabela 5 - Testes estatísticos para as variáveis selecionadas do "grid" proposto por Xavier. ....	24
Tabela 6- Área de cana-de-açúcar dos municípios da microrregião de Araçatuba, SP, em km <sup>2</sup> da safra 2013/14 disponíveis na base de dados do Projeto CANASAT.....	31
Tabela 7-Coeficientes da regressão linear múltipla utilizada para espacializar os valores da Q <sub>7,10</sub> , na microrregião de Araçatuba, SP. ....	32
Tabela 8- Área de cada município em km <sup>2</sup> , a Q <sub>7,10</sub> (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> km <sup>-2</sup> ) e a DHSA em mm ano <sup>-1</sup> ....	36
Tabela 9- Diferentes cenários de lâminas (mm ano <sup>-1</sup> ) de irrigação a nível municipal da microrregião de Araçatuba, SP, calculados a partir das equações de regressão linear. Os valores de cada município é a média ponderada entre os valores dos pixels que abrange cada município e o número de pixels em função da área municipal. ....	38
Tabela 10- Coeficientes das equações de Regressão Linear Múltipla para a obtenção dos mapas de lâmina requerida para cinco percentis. ....	39
Tabela 11- Porcentagem de cobertura da lâmina de irrigação requerida pela cultura da cana-de-açúcar na microrregião de Araçatuba, SP, de acordo com diferentes níveis de irrigação. ....	48
Tabela 12- Porcentagem de área irrigável da cultura da cana-de-açúcar na microrregião de Araçatuba, SP, de acordo com diferentes níveis de irrigação. ....	52

## RESUMO

### **Potencial de irrigação da cultura da cana-de-açúcar na microrregião de Araçatuba, SP, em função da disponibilidade hídrica regional.**

O estado de São Paulo destaca-se como o maior polo produtor de cana-de-açúcar no Brasil, a área colhida no estado destinada a cana-de-açúcar durante a Safra 2016/17 é de 5.563,26 mil hectares. Devido à importância econômica da cultura de cana-de-açúcar para o estado, os benefícios oriundos dos canaviais irrigados e da relevância do uso racional dos recursos hídricos, este estudo teve como principal objetivo avaliar o potencial de irrigação da cana-de-açúcar na microrregião de Araçatuba, SP, em função da disponibilidade hídrica superficial da região. Dessa forma procedeu-se calculando a necessidade hídrica da cana-de-açúcar considerando diferentes percentis de déficit hídrico, identificando a disponibilidade hídrica superficial da microrregião e criando cenários de % de cobertura da lâmina requerida e % de área irrigável por município. Foram utilizadas 28 estações pluviométricas para o cálculo do Balanço Hídrico (BH) pelo método de Thornthwaite e Mather (1995) para uma série histórica diária de 33 anos. Para cada localidade foi calculado o percentil de 50, 60, 75, 80 e 90% do déficit hídrico (DEF). Com esses percentis foram criados os mapas de DF por meio de equações de regressão linear múltipla, e a técnica de álgebra de mapas no SIG ArcGIS 10.2. A mesma metodologia foi utilizada para a criação do mapa da vazão ecológica ( $Q_{7,10}$ ), a qual serve como referência para quantificar o volume hídrico disponível para projetos de irrigação. A área de cultivo da cana-de-açúcar foi obtida através do sistema CANASAT para a safra 2013/2014. Resultados do BH mostram que a necessidade hídrica média dos canaviais da microrregião está em torno de 513 mm ano<sup>-1</sup>. A disponibilidade hídrica total da microrregião é de 586356341.40 m<sup>3</sup>ano<sup>-1</sup>. A % de cobertura da lâmina total requerida pela cultura, em função da disponibilidade hídrica superficial, é atendida em no máximo 36,85% em um dos municípios. A média entre todos as unidades municipais é de 22%. A mesma interpretação serve para a % de área irrigável, em que a aplicação da lâmina total requerida é possível em no máximo 36,85% da área de canavial de um dos municípios. Dessa forma, conclui-se que a irrigação dos canaviais na microrregião de Araçatuba, SP, é somente possível aplicando-se parcialmente a necessidade hídrica total, ou irrigando apenas parte das áreas de canavial.

## ABSTRACT

### Potential of irrigation of sugar cane in the region of Araçatuba, SP, taking into account the surface water availability.

São Paulo state is characterized as the largest grower of sugar cane in Brazil. It is expected to harvest 5,563.26 MHA (Million hectare) during the 2016/2017 season. Due to the economic importance of this crop, the benefits of irrigation activities and the concern about the right usage of water resources, this project aims to calculate the potential of irrigation of sugar cane in the region of Araçatuba, SP, considering the surface water availability. First, it was calculated the different percentage parts of the sugar cane water requirement. Second it was measured the surface water availability and for last, it was created different scenarios for the available water to irrigate different percentages of sugar cane water requirements, and for the percentage of possible irrigated area. In total, 28 meteorological points were used to collect rainfall data during 33 years to calculate the Water Balance (WB) using the method of Thornthwaite and Mather (1995). For each point it was calculated the percentage part of 50, 60, 75, 80 e 90% of the water requirement. Using these percentage parts five different maps of water requirement were created using Multiple Regression Analysis and the GIS software function Map Algebra of ArcGIS 10.2. The same methodology was used to create the map of the minimum reference flow rate ( $Q_{7,10}$ ), which is the reference to measure the available volume of water to irrigate. The sugar cane area data was extracted from the project CANASAT of the 2013/2014 season. Results of the WB showed that the water requirement for sugar cane is close to 513 mm/year. The total amount of available water in the region is 3772 mm year<sup>-1</sup>. The maximum percentage of the water requirement that is filled considering the total water requirement is 36,85%. The average for the entire region is close to 22%. The same methodology was used to measure the percentage of possible irrigated area. Summarizing, the irrigation of sugar cane in Araçatuba, SP, is possible when is considered part of the water requirement or part of the crop area.

## **1. INTRODUÇÃO**

O estado de São Paulo destaca-se como o maior polo produtor de cana-de-açúcar no Brasil. Segundo Conab (2016), a área colhida nacional destinada a cana-de-açúcar durante a Safra 2016/17 será de 8.973,2 mil hectares, o que representa um aumento de aproximadamente 318,4 mil hectares em comparação a safra passada. Da área total em produção, 62,2 % está localizada na região Sudeste, sendo 52,3 % no estado de São Paulo. A produtividade média esperada é de 76,31 kg/ha, 0,8 % menor em relação à safra passada, em função da queda de produtividade no Centro-Sul. A estimativa nacional de produção é de 2,9% maior em relação à safra anterior, valor próximo de 684,77 milhões de toneladas. O estado de São Paulo teve um aumento de 14 mil toneladas, e em termos percentuais é responsável por 56,2% do total da produção nacional.

De acordo com a Agência Nacional das Águas (ANA) (2012), o Brasil possui cerca de 5,8 milhões de hectares irrigados, o que corresponde a 8,3% do total da área de produção agrícola nacional. O potencial de área a ser irrigada no país é de aproximadamente 29 milhões de hectares, o que mostra que atualmente apenas 21% do potencial dessa área vem sendo utilizado. Estudos do Departamento de Águas e Energia (DAEE) (2012) do estado de São Paulo, apontam que 42% da água disponível é consumida pela irrigação de culturas, 32% pelo uso urbano e 25% destinados as atividades industriais. Considerando-se esse cenário, estudos sobre o uso racional da água na agricultura e seus efeitos na disponibilidade hídrica são cada vez mais relevantes.

De acordo com Silva et al. (2014), a cana-de-açúcar responde qualitativamente e quantitativamente à irrigação. Também foi constatado que há respostas diferentes em função da variedade que está sendo utilizada, e que o manejo deve ser feito corretamente a fim de se obter resultados positivos. De acordo com Frizzone et al. (2001), os benefícios da irrigação na cultura da cana-de-açúcar estão relacionados com aumento da produtividade, aumento da longevidade do canavial, redução de custos das atividades de preparo e plantio, e também redução de custos com tratos culturais da cana soca. Todavia, Alves et al. (2014) ressalta que a irrigação não é amplamente utilizadas para o cultivo de cana-de-açúcar, predominando os canaviais de sequeiro ou aqueles irrigados com déficit, ou seja, irrigação de salvamento ou complementar, as quais empregam lâminas que cobrem apenas parte da demanda hídrica da cultura.

Em função da importância econômica da cultura de cana-de-açúcar para o estado de São Paulo, dos benefícios oriundos dos canaviais irrigados e da relevância do uso racional dos recursos hídricos, este estudo teve como principal objetivo avaliar o potencial de irrigação da cana-de-açúcar na microrregião de Araçatuba, SP. Essa microrregião foi escolhida por ser caracterizada pela expansão gradativa da área de cana-de-açúcar, como apresentado pelo Projeto CANASAT (2016), e também por apresentar déficit hídrico ao longo do ano para a cultura, como demonstrado por Monteiro (2013). Para tanto, os seguintes objetivos específicos foram considerados:

- a) Analisar a necessidade de irrigação anual dos canaviais nos municípios que compõem a microrregião de Araçatuba, SP, levando-se em conta diferentes percentis de atendimento do déficit hídrico da cultura;
- b) Identificar a nível municipal a disponibilidade hídrica superficial por meio da vazão referência mínima ( $Q_{7,10}$ ).
- c) Determinar o potencial de irrigação de cada município e da microrregião em função da área cultivada com cana-de-açúcar, da disponibilidade hídrica superficial e da demanda hídrica da cultura.

## 2. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Aspectos gerais da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) pertence à família Poaceae e tem como provável centro de origem a Nova Guiné, localizada na Oceania. A planta é composta pelos colmos, raízes, folhas e flores, sendo que cada um dos componentes possui papel fundamental no ciclo produtivo da planta. Os colmos estão relacionados com a propagação vegetativa da planta, tendo pequenos brotos (gemas) com tecido meristemático que permitem que uma nova planta cresça a partir de cada gema (BULL, 2000). De forma geral, as folhas são longas e finas, e a planta caracteriza-se como uma espécie de metabolismo fotossintético C4 (SOUZA et al., 2008). As raízes podem se estender até 2 m de profundidade, todavia, sua parte efetiva localiza-se, na maioria dos casos, nos primeiros 50 cm do solo. Por fim, as flores têm sua grande importância para a produção de novas variedades (BULL, 2000).

No Brasil, pesquisadores afirmam que a cana-de-açúcar foi introduzida por Cristóvão Colombo durante a segunda metade do século XVI, através de suas jornadas ao “Novo

Mundo”. Primeiramente, a cultura teve grande influência social e econômica na região Nordeste do país, onde surgiram os primeiros engenhos de processamento de cana-de-açúcar, os quais produziam açúcar para exportação, principalmente para a Holanda e Portugal (UDOP, 2014).

Por volta do Século XIX, houve uma expansão das áreas produtoras de cana-de-açúcar em outras partes do mundo, fazendo com que o Brasil perdesse importância no mercado mundial e afetasse as condições econômicas da cultura no mercado interno (NITSCH, 1991). Diante desse cenário, a partir do século XX deu-se início aos incentivos da produção de cana-de-açúcar na região Sudeste, com a criação do Instituto de Açúcar e Álcool (IAA) em 1933, e em 1975, em meio à crise mundial do petróleo de 1973, o Brasil lançou o maior programa de incentivo à produção de biocombustíveis já conhecido, o Programa Nacional do Álcool – PROALCOOL, e nos anos seguintes, deu-se início a produção nacional de carros movidos a etanol (NITSCH, 1991). Desde então, o Brasil vem enfrentando altos e baixos no setor sucroalcooleiro (WILKINSON, 2015), todavia se consolidou como o maior produtor de açúcar no mundo em 2016 (USDA, 2016), e o segundo maior produtor mundial de combustível etanol (RFA, 2016).

De acordo com Pecege (2016), os grandes centros de produção de cana-de-açúcar no Brasil podem ser divididos em três áreas de concentração: Centro-Sul Tradicional (São Paulo e Paraná), Centro-Sul Expansão (Minas Gerais, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Goiás) e Nordeste (Pernambuco, Alagoas, Paraíba e Maranhão). A Tabela 1 a seguir apresenta a área cultivada com cana-de-açúcar na safra 2015/2016 nos principais estados produtores.

Tabela 1 - Distribuição das áreas de produção de cana-de-açúcar por estado durante a safra 2015/2016.

<b>Estados</b>	<b>Porcentagem da área</b>	<b>Área (mil hectares)</b>
São Paulo	52%	4498,3
Goiás	10%	866,5
Mato Grosso do Sul	7%	596,8
Paraná	6%	515,7
Alagoas	3,7%	323,6
Pernambuco	3%	254,2
Mato Grosso	2,7%	232,8
Outros	15,6%	555,44

Fonte: (CONAB, 2016).

A produção total de açúcar na safra 2015/2016 foi de 35 milhões de toneladas, 5,6% menor em relação à anterior, porém, acima da casa dos 30 milhões de toneladas, como vêm ocorrendo nas últimas quatro safras. A região Centro-Sul Tradicional foi responsável por 81,6% do açúcar produzido, enquanto que a região Centro-Sul Expansão ficou com 10,6% e o Nordeste com 7,6%. O restante foi produzido por outras áreas fora desses centros (CONAB, 2016).

O total produzido de etanol nessa mesma safra foi de 30,5 bilhões de litros. Para o etanol anidro, o qual é adicionado à gasolina, o total produzido foi de 11,2 bilhões de litros, e o restante produzido foi de etanol hidratado, o qual é vendido como combustível para automóveis. A região Centro-Sul Tradicional foi responsável por 64,9%, seguida por 29% da região Centro-Sul Expansão e 5,6% do Nordeste, e o restante em outras áreas Conab (CONAB, 2016).

## **2.2 Fenologia e ciclos**

Como apresentado por Camara e Oliveira (1993), o ciclo da cana-de-açúcar pode ser dividido em quatro fases distintas, representadas na Figura 1. A fase Emergência (1) tem duração aproximada de 30 a 60 dias, e é caracterizada pela Germinação e Emergência da planta. A fase Estabelecimento (2) tem um intervalo um pouco maior, entre 60 e 90 dias, e tem como os seus eventos o Perfilhamento e Estabelecimento da cultura. A fase Desenvolvimento (3) tem o maior intervalo durante todo o ciclo (entre 180 e 210 dias) e é responsável pelo intenso crescimento vegetativo, pela elongação dos colmos e pelo início do acúmulo de sacarose. Por afim, a fase Maturação (4), é o período de intenso acúmulo de sacarose, com duração de 60 a 90 dias.

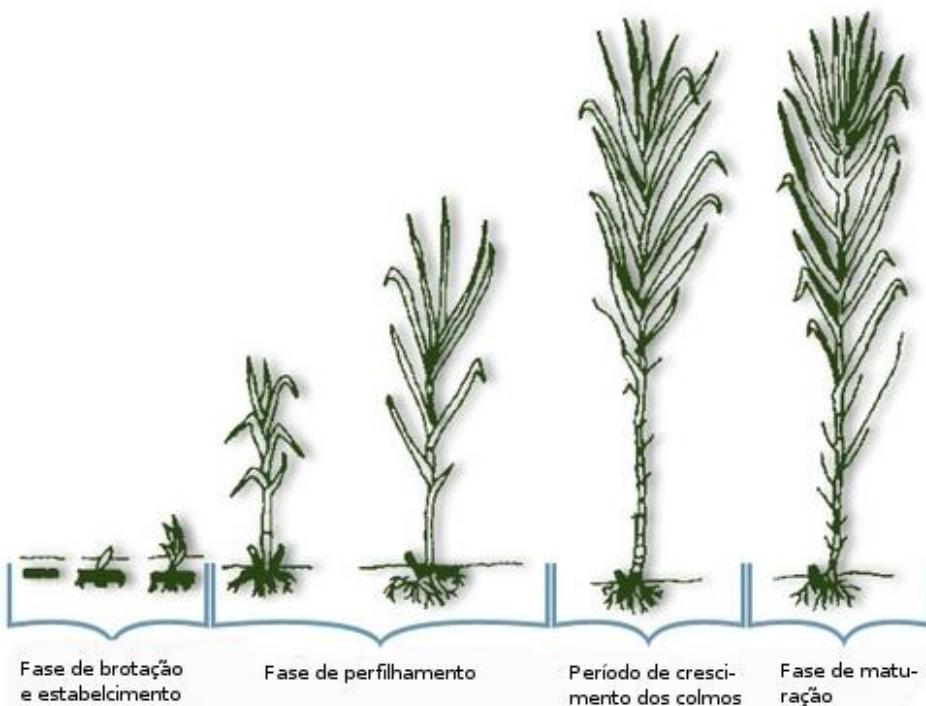


Figura 1 - Representação das fases fenológicas da cultura de cana-de-açúcar. Adaptado de FAO (1980).

De acordo com Scarpari et al. (2004), as principais características que caracterizam as variedades da cana-de-açúcar são: rusticidade; teor de açúcar; resistência às doenças; e o tempo de maturação, um dos principais fatores responsáveis pela duração dos ciclos.

A cana-de-açúcar pode ser considerada uma cultura semi-perene, e a principal forma de propagação é a vegetativa, utilizando colmos jovens e saudáveis, ou por meio do uso de mudas pré-brotadas (MPB) (XAVIER et al., 2014).

Geralmente, o ciclo produtivo da cultura baseia-se no plantio do colmo ou da muda pré-brotada no ano anterior, seguido por cinco ou mais ciclos provenientes da rebrota das soqueiras. A colheita possibilita a renovação da parte aérea e radicular da cultura (MARIN et al., 2009).

Após o primeiro ciclo produtivo, o qual é comumente chamado de ciclo da canaplanta, a planta passa outros cortes consecutivos, os quais são chamados de ciclos da canasoca (MARIN et al., 2009).

Em termos de manejo cultural do cultivo de cana-de-açúcar na Região Centro-Sul do Brasil, existem duas opções de ciclos que são comumente utilizadas em função da época de

plantio: a cana de ano (12 meses) ou a cana de ano e meio (18 meses). Normalmente, a cana de ano é plantada entre setembro e novembro, e tem sua colheita realizada cerca de 12 meses após o plantio. Durante esse período, a planta passa por um período de estabelecimento e crescimento em torno de 8 meses, e os meses restantes referem-se a fase final do ciclo, de maturação. Em relação à cana de ano e meio, o plantio ocorre entre janeiro e abril, e dura aproximadamente 18 meses. Nesse sistema, há um prolongamento da fase de crescimento e desenvolvimento vegetativo, o que faz com a cana seja mais produtiva em seus primeiros cortes (MARIN et al., 2009). Esse segundo sistema também é bastante adotado por produtores que combinam a cana-de-açúcar com uma cultura complementar, geralmente, uma leguminosa (Amendoim, Soja e Girassol), a qual possui um ciclo entre a colheita e o plantio do canavial (NOVACANA, 2013).

## 2.3 Condições climáticas requeridas pela cultura da cana-de-açúcar

### 2.3.1 Radiação solar

De acordo com Pereira et al. (2015), a radiação solar é a principal fonte de energia para a terra, e consequentemente, é fonte primária de energia para os processos terrestres. Desde os processos biológicos das plantas, como a fotossíntese, até processos climáticos, como furacões, tempestades, movimento dos ventos e outros. A radiação solar também é responsável por desencadear e influenciar todos os outros elementos do processo meteorológico, tais como, temperatura, chuva, pressão, umidade e outros.

A fotossíntese, que tem como significado a síntese pela luz, é o principal processo biológico responsável pelo crescimento e desenvolvimento vegetal. Sendo que toda energia necessária para realizar o processo de conversão de CO<sub>2</sub> em biomassa por seres fotossintetizantes é proveniente da radiação solar (TAIZ; ZEIGER, 2006).

As condições ideais de crescimento da cultura, em relação à disponibilidade de energia solar, variam entre 18 - 36 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>. Por exemplo, a fase de perfilhamento, que tem grande importância no ciclo produtivo da cana, é afetada pela quantidade de luz que chega até as plantas. Sendo assim, em dias nublados ou com pouca intensidade de luz o crescimento da cultura é influenciado negativamente. Ressalta-se também que o crescimento da área foliar é proporcional a quantidade de radiação solar absorvida pela

planta, e que em termos de produção de matéria seca, a proporção de energia convertida em matéria seca aumenta linearmente até 50% da interceptação de luz, e acima desse nível, a proporção fotossintética passa a diminuir (RAO; VERED, 2009).

### **2.3.2 Temperatura**

De acordo com Pereira et al. (2007), a temperatura tem influência direta no metabolismo das plantas por ser um fator regulador das reações químicas. Dessa maneira, influencia diretamente as taxas de crescimento e desenvolvimento vegetal.

Segundo Marin et al. (2012), a temperatura ideal para o brotamento dos toletes varia entre 32°C e 38°C, e para um crescimento e desenvolvimento da planta, com ciclo produtivo de alto rendimento, a temperatura média durante o dia deve ser entre 22°C e 30°C, sendo a temperatura mínima de 20°C. A atividade fotossintética é influenciada positivamente nesse intervalo de temperatura. Em temperaturas acima de 30°C a taxa de fotossíntese passa a diminuir (FAUCONNIER et al., 1970).

### **2.3.3 Demanda hídrica**

Como constatado por Marin et al. (2009), a demanda hídrica da cana-de-açúcar varia em função das diferentes fases fenológicas, como consequência dos diferentes processos biológicos que ocorrem durante as diversas fases. Esses autores relatam que a perda de água é condicionada pela área foliar, pelo estádio fenológico e pela densidade do sistema radicular.

Em um estudo realizado por Fauconnier et al. (1970), observou-se que o fornecimento de 1500 mm de água, seja por eventos de chuva ou de irrigação, proporcionou a um canavial de produtividade de 100 t ha<sup>-1</sup>, considerando-se que o colmo possui de 75 a 80% de água, produzir 1 kg de matéria seca para cada 150 a 200 kg de água consumida.

Em relação à necessidade hídrica da planta, esta varia de 1500 a 2500 mm anuais, distribuídos de maneira uniforme ao longo do ciclo. Valores próximos a esse intervalo foram citados por (DOORENBOS, J.; KASSAM, 1994; SILVA; MOURA; ZOLNIER, 2012). Entretanto, a demanda hídrica da cana-de-açúcar está sujeita a grandes variações dependendo do local de produção, pois depende de diversos fatores relacionados às

condições ambientais, técnicas agrícolas, época de plantio e cultivares (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005).

Como apresentado por Peres (1988), a Tabela 2 a seguir traz a demanda hídrica encontrada da cana-de-açúcar sob diversos experimentos conduzidos em diferentes locais, levando em conta diferentes ciclos da planta, e também diversas variedades. A Tabela 2 serve como uma referência do consumo médio da planta ao longo do ciclo. Ressalta-se a necessidade de atualizar os diferentes levantamentos da necessidade hídrica da cultura, visto que os experimentos datam da década de 60, 70 e 80.

Tabela 2 - Consumo médio de água pela cana-de-açúcar em diferentes ciclos e locais ao redor do mundo.

<b>Autor</b>	<b>Ano</b>	<b>Local</b>	<b>Ciclo da Cultura</b>	<b>Consumo de água médio (mm dia<sup>-1</sup>)</b>
Campbell et al.	1959	EUA (Havaí)	Planta	5,7
Thompson et al.	1963	África do Sul	Planta	4,2
Thompson	1965	África do Sul	Planta	3,7
Chang & Wang	1968	Taiwan	Planta e Soca	4,8
Thompson & Boyce	1971	África do Sul	Planta	3,9
Early & Gregorio	1974	Filipinas	Planta	3,1
Fogliata	1974	Argentina	Planta e Soca	4,4
Thompson	1976	África do Sul	1º Soca	3,9
			2ºSoca	3,6
Shih & Gascho	1980	EUA(Flórida)	Planta e Soca	3,4
Barbieri	1981	Brasil	Planta	2,5
Chang et al.	1983	Taiwan	Planta	2,3
			1º Soca	3,1
			2ºSoca	3,1
Yahng et al.	1985	Colômbia	Planta	3,3
			1º Soca	3,6

**Fonte:** Peres, 1988.

A deficiência hídrica no cultivo da cana-de-açúcar, em função da má distribuição ou a falta de chuvas, é o principal fator que contribui para quebras de produtividade da cultura (INMAN-BAMBER; SMITH, 2005).

Em contrapartida, apesar extrema importância do déficit hídrico para o desenvolvimento e crescimento da planta, o excesso de chuvas durante o período da colheita pode contribuir para a diminuição da qualidade industrial da matéria prima, e até mesmo inviabilizar a entrada de máquinas para realizar as operações de colheita, transbordo

e transporte. Outro fator relacionado, é que a alta umidade do solo em combinação com o tráfego intenso de máquinas favorece a compactação do solo, prejudicando futuros ciclos produtivos (MARIN et al., 2009).

Uma das maneiras de mitigar os efeitos negativos do déficit hídrico no ciclo da cultura é a prática de irrigação (FRIZZONE et al., 2001).

## 2.4 Canaviais irrigados

Como descrito por Donzeli e Costa (2010), as práticas de irrigação utilizadas na cana-de-açúcar podem ser divididas em três metodologias. i) Irrigação de Salvamento: método que visa suprir as necessidades hídricas em períodos críticos, pós-plantio e brotação de soqueiras. A lâmina de aplicação, nesse caso, varia entre 30 e 80 mm; ii) Irrigação com déficit: aplicação de 4 a 6 lâminas, de 40 a 60 mm, para suprir a necessidade hídrica em épocas críticas, como estabelecimento e de perfilhamento. Essas lâminas podem ser com água residuárias, somente água ou água misturada com vinhaça; iii) Lâmina Plena: que tem por finalidade suprir toda demanda hídrica da cana-de-açúcar durante todo o ciclo.

Estimativas do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento MAPA (2016), mostram que o Brasil possuía cerca de 6,2 milhões de hectares irrigados em 2014, quase 40% superior quando comparado com último levantamento realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 2006. De acordo com essa mesma estimativa do MAPA, espera-se que ocorra um aumento de 1,5 milhões de hectares irrigados entre 2016 e 2019.

Em uma pesquisa realizada pelo Grupo de Irrigação e Fertirrigação em Cana-de-Açúcar GIFC (2014), durante a safra 2013/2014, cerca de 12% do total da área cultivada com cana-de-açúcar era irrigada. Projeções feitas por esse mesmo estudo demonstram que esse número pode triplicar nos próximos sete anos.

O trabalho realizado por Dias (2016), simulando a produtividade de cana-de-açúcar de ciclo de 12 meses em diversas localidades no Brasil, mostrou que o modelo MZA-FAO (Modelo da Zona Agroecológica da FAO) pode ser utilizado para avaliar a variabilidade da produtividade da cana-de-açúcar em função de diferentes níveis de irrigação. O estudo foi realizado levando em conta diversos cenários de atendimento da lâmina de irrigação requerida e de diferentes níveis de Capacidade de Água Disponível no solo (CAD). De

forma geral, todos os incrementos de irrigação foram capazes de aumentar a produtividade de colmos. Dessa forma, concluiu-se que os incrementos na produtividade ocorreram tanto em regiões tradicionais produtoras, como em regiões de expansão da cultura da cana-de-açúcar. Constatou-se também que nos solos com menor disponibilidade hídrica o incremento de produtividade foi maior.

Em um estudo de modelagem agrometeorológica conduzido por Monteiro (2013), demonstrou que a aplicação da lâmina de irrigação cobrindo toda necessidade hídrica da cana-de-açúcar gerou um incremento de produtividade entre 70 e 130 t ha<sup>-1</sup>, para as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar no estado de São Paulo.

## 2.5 Disponibilidade hídrica superficial

De acordo com Wolff (2013), a água se destaca como centro das discussões de agências internacionais e governamentais que buscam estratégias de preservação dos recursos naturais. O gerencialmente dos recursos hídricos é de extrema importância para se solucionar problemas causados pelo crescimento econômico e populacional, e certificar que a água, recurso natural finito e essencial à vida humana, permaneça disponível para sanar as necessidades básicas da sociedade e continue a abastecer as funções hidrológicas, químicas e biológicas dos ecossistemas.

A Lei nº 9433/97 Brasil (1997) estabelece a Política Nacional de Recursos Hídricos e o SINGREH (Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos). Isso constitui um marco no gerenciamento dos recursos hídricos no Brasil, e essa política está embasada pelos seguintes fundamentos:

- A bacia hidrográfica é a unidade de planejamento e gestão dos recursos hídricos;
- A água é um bem de domínio público;
- A água é um bem finito e vulnerável;
- A gestão deve ser descentralizada e participativa;
- Em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dos animais.

A Lei nº 9433/97 Brasil (1997) também levanta a questão sobre as outorgas dos direitos do uso dos recursos hídricos, com o intuito de trazer a regulamentação do uso dos mesmos. Dessa forma, atribui ao usuário o quanto possa derivar, determinando volumes de

extração que venha a suprir suas necessidades. Um processo de outorga leva em consideração duas grandezas básicas: a disponibilidade hídrica e a necessidade hídrica. A primeira grandeza pode ser mensurada por meio do cadastramento dos usuários, e essa pode ser dinâmica ou contínua ao longo do tempo. A segunda grandeza pode variar em função do espaço e tempo, e é estimada a partir da avaliação do regime hidrológico da bacia.

Como explicado pela ANA (2013), a emissão de outorga de direito do uso da água está diretamente ligada à quantificação das disponibilidades hídricas na região. Todavia, a vazão de um manancial pode variar ao longo do tempo e espaço. Uma vazão característica que pode ser utilizada é a vazão média de longo termo, entretanto, para a maioria dos planos de reservatórios para o abastecimento doméstico e para o suprimento da agricultura irrigada, essa vazão é superestimada. Sendo assim, é de extrema importância o conhecimento das vazões mínimas dos rios e seus afluentes para a aplicação do direito de outorga, com a garantia da manutenção sustentável dos cursos de água.

Atualmente, duas metodologias têm sido usadas nacionalmente como critério para a determinação da vazão mínima de referência. Uma abordagem está relacionada com as vazões mínimas com determinado tempo de recorrência, e outra, com as vazões de curva de permanência. A primeira abordagem é utilizada em diversos estados, tais como: São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais ANA (2013).

Em termos de outorgas para direito do uso da água em atividades de agricultura irrigada, a vazão mínima de referência utilizada no estado de São Paulo é a  $Q_{7,10}$  ANA (2013), a qual é definida por Schmidit (2007), como:

*“São aquelas mínimas necessárias para garantir a sobrevivência dos ecossistemas, inclusive o aquático, garantindo a preservação da flora e fauna a jusante nos períodos de estiagem. Atualmente, adota-se como valor dessa vazão mínima ( $m^3 \cdot h^{-1}$ ) a média das menores vazões anuais com 7 dias consecutivos para um período de retorno de 10 anos”.*

Segundo a ANA (2013), órgão gestor dos recursos hídricos no estado de São Paulo e o Departamento de Águas e Energia Elétrica, e a vazão máxima outorgável para a agricultura irrigada é de 50% da  $Q_{7,10}$ .

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Região de estudo

A área escolhida para o presente estudo foi a que corresponde à microrregião de Araçatuba, localizada ao Noroeste do estado de São Paulo e composta por um total de 33 municípios. A Figura 2 e a Tabela 3 apresentam a região estudada e os seus respectivos municípios. A numeração na Figura 2 refere-se aos municípios da Tabela 3.

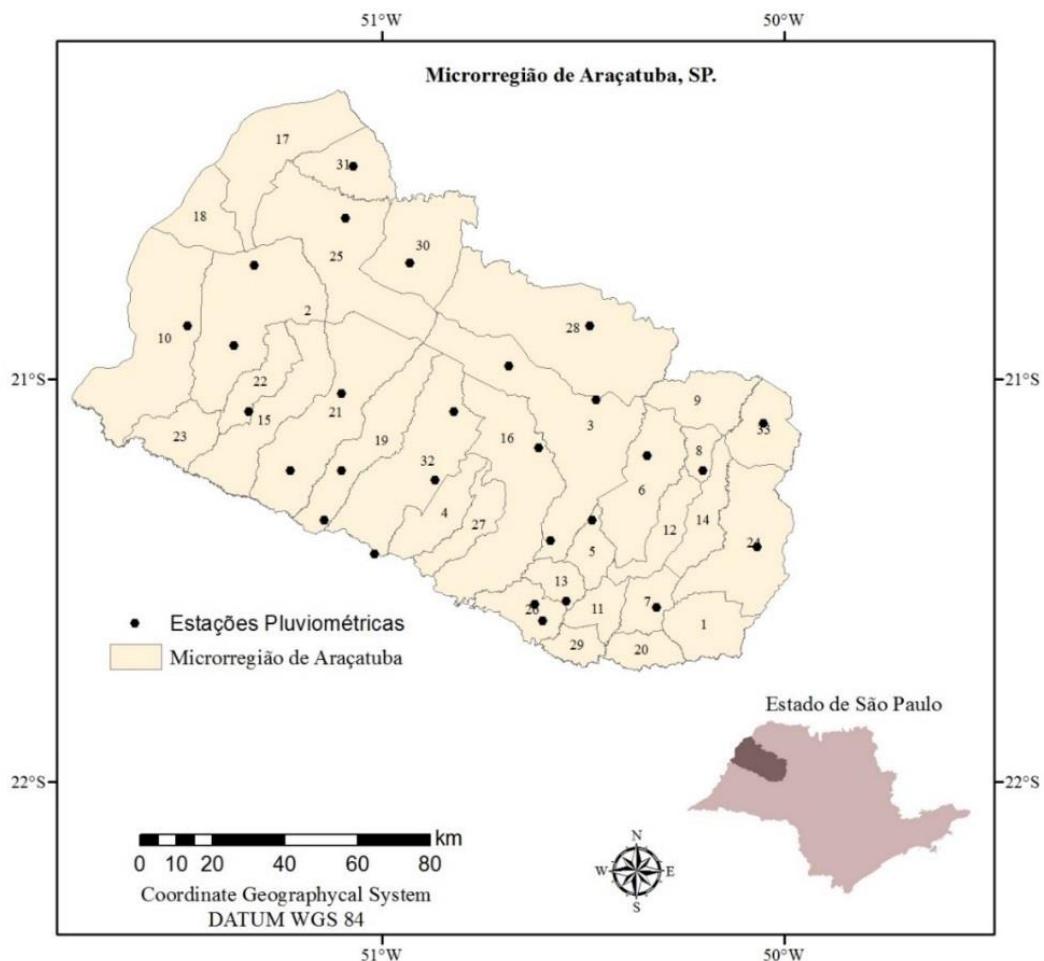


Figura 2 - Microrregião de Araçatuba, SP, com seus 33 municípios (números se referem à ordem apresentada na Tabela 3) e as estações pluviométricas consideradas no presente estudo.

\*1-Alto Alegre 2-Andradina 3-Araçatuba 4-Bento De Abreu 5-Bilac 6-Birigui 7-Braúna 8-Brejo Alegre 9-Buritama 10-Castilho 11-Clementina 12-Coroados 13-Gabriel Monteiro 14-Glicério 15-Guaraçá 16-Guararapes 17-Ilha Solteira 18-Itapura 19-Lavínia 20-Luiziânia 21-Mirandópolis 22-Murutinga Do Sul 23-Nova Independência 24-Penápolis 25-Pereira Barreto 26-Piacatu 27-Rubiácea 28-Santo Antônio Do Aracanguá 29-Santópolis Do Aguapeí 30-Sud Mennucci 31-Suzanápolis 32-Valparaíso 33-Zacarias.

A Figura 2 também exibe a distribuição espacial 28 estações meteorológicas que foram utilizadas para extrair os dados meteorológicas. As coordenadas geográficas e a altitude de cada estação são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 3- Relação dos municípios da microrregião de Araçatuba, SP, com seus respectivos números apresentados na Figura 2 e código do IBGE.

Número	IBGE (Código)	Município
1	3501103	Alto Alegre
2	3502101	Andradina
3	3502804	Araçatuba
4	3506201	Bento De Abreu
5	3506409	Bilac
6	3506508	Birigui
7	3507704	Braúna
8	3507753	Brejo Alegre
9	3508108	Buritama
10	3511003	Castilho
11	3511904	Clementina
12	3512506	Coroados
13	3516507	Gabriel Monteiro
14	3517109	Glicério
15	3517802	Guaraçaí
16	3518206	Guararapes
17	3520442	Ilha Solteira
18	3523008	Itapura
19	3526506	Lavínia
20	3527702	Luiziânia
21	3530102	Mirandópolis
22	3532108	Murutinga Do Sul
23	3533205	Nova Independência
24	3537305	Penápolis
25	3537404	Pereira Barreto
26	3537701	Piacatu
27	3544400	Rubiácea
28	3548054	Santo Antônio Do Aracanguá
29	3548401	Santópolis Do Aguapeí
30	3552304	Sud Mennucci
31	3552551	Suzanápolis
32	3556305	Valparaíso
33	3557154	Zacarias

Tabela 4 - Coordenadas geográficas e altitude das estações pluviométricas da ANA, DAEE/SP e CIIAGRO/IAC.

<b>Estação Meteorológica</b>	<b>Latitude</b>	<b>Longitude</b>	<b>Altitude (m)</b>
1	-20.87	-50.48	436
2	-21.05	-50.47	333
3	-21.25	-50.87	395
4	-21.43	-51.02	295
5	-21.08	-50.82	340
6	-21.04	-51.10	404
7	-21.56	-50.62	386
8	-20.97	-50.68	346
9	-21.35	-51.14	345
10	-21.23	-50.20	408
11	-21.17	-50.61	382
12	-21.23	-51.10	410
13	-21.23	-51.23	360
14	-21.35	-50.48	416
15	-21.55	-50.54	427
16	-21.40	-50.58	423
17	-21.19	-50.34	366
18	-20.87	-51.48	393
19	-20.92	-51.37	401
20	-21.08	-51.33	363
21	-21.11	-50.05	429
22	-21.60	-50.60	426
23	-21.42	-50.07	427
24	-20.47	-51.07	355
25	-20.71	-50.93	350
26	-20.60	-51.09	387
27	-21.57	-50.32	465
28	-20.72	-51.32	299

### 3.2 Obtenção e processamento dos dados meteorológicos

Os dados pluviométricos utilizados para determinar a necessidade hídrica da cultura da cana-de-açúcar nos municípios da microrregião de Araçatuba, SP, foram extraídos de estações pluviométricas da Agência Nacional das Águas (ANA), por meio do sistema Hidroweb, de estações do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) do estado de São Paulo, e de estações do Centro Integrado de Informações Agrometeorológicas

(CIIAGRO), do Instituto Agronômico de Campinas (IAC). Desses sistemas foram extraídos dados diários de chuva de 1980 até 2013 para cada estação pluviométrica utilizada.

As falhas nas series históricas foram preenchidas por meio de dados de grade da base de Xavier et al. (2015). Essa base de dados é composta por dados diários de 1980 a 2013, para as seguintes variáveis: precipitação, evapotranspiração de referência, velocidade do vento, temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa e radiação solar. Além do preenchimento das falhas, os valores de evapotranspiração de referência foram utilizados para o cálculo do balanço hídrico da cana-de-açúcar.

Os dados meteorológicos da base de Xavier et al. (2015) estão disponíveis online e organizados em “grids” de alta resolução ( $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ ). Os dados de evapotranspiração de referência foram extraídos para cada pixel correspondente a cada uma das 28 localidades das estações pluviométricas, de acordo com a latitude e longitude de cada estação. A Tabela 4 apresenta a latitude, longitude e altitude de cada estação. Para extrair esses dados foi elaborado um programa no R Studio 3.2.4.

Para se garantir que os dados meteorológicos da base disponibilizada por Xavier et al. (2015) eram válidos para a região, foi realizado um teste de qualidade dos dados. Esse teste foi realizado para as variáveis chuva, evapotranspiração de referência, temperatura máxima e temperatura mínima. Dessa forma, foi escolhida uma estação meteorológica para se extrair os dados dessas variáveis e compará-los com os dados da base de Xavier et al. (2015). A estação utilizada foi a Número 1 (Tabela 4), e a evapotranspiração de referência foi calculada pelo método de Penman-Monteith, mesmo método adotado por Xavier et al. (2015). Sendo assim, foram utilizados dados diários de 5 anos (2009-2013). A Figura 3 apresenta as relações entre os dados observados e os dados da base de Xavier et al. (2015). A Figura 3 apresenta a análise estatística da comparação entre os dados observado e da base de dados de Xavier et al. (2015).

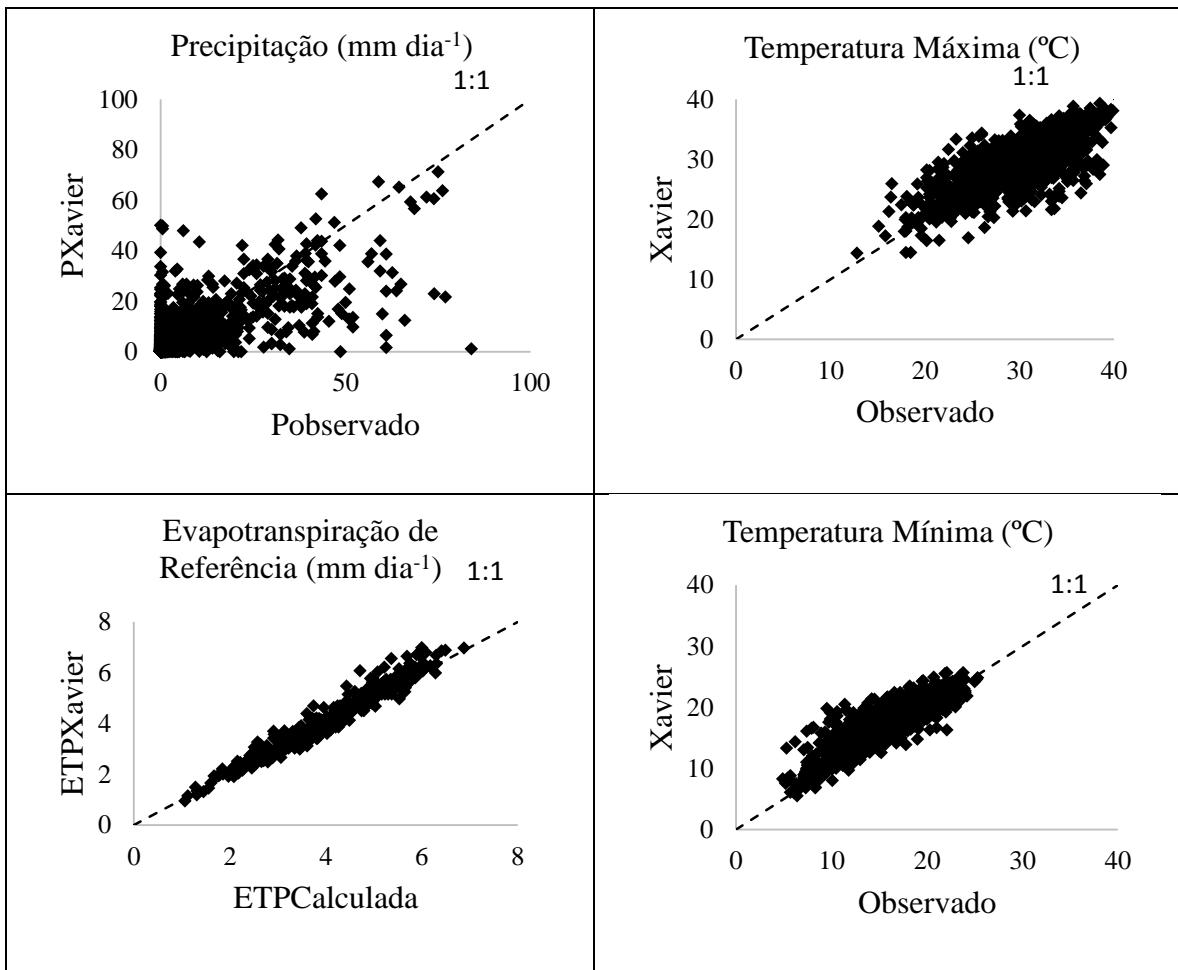


Figura 3 - Relação entre os dados de precipitação (chuva), temperatura máxima, temperatura mínima e evapotranspiração de referência observados e da base de dados de Xavier et al. (2015), para a localidade de Alto Alegre, SP (estação #1).

Tabela 5 - Testes estatísticos para as variáveis selecionadas do "grid" proposto por Xavier.

Variável	Teste
Evapotranspiração (mm dia <sup>-1</sup> )	RMSE
Precipitação (mm dia <sup>-1</sup> )	MAE
Temperatura Máx (°C)	R
Temperatura Min (°C)	CRE

A Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio (RMSE) e o Erro Médio Absoluto (MAE) avaliam a acurácia da comparação entre o valor observado (Estação Meteorológica 1) e o valor proposto por Xavier et al. (2015). Por outro lado, os valores do Coeficiente de Correlação (R) e do Erro Composto Relativo (CRE) medem a precisão entre os dois

conjuntos de dados. Sendo assim, observa-se que há elevada acurácia e precisão entre os dois conjuntos de dados, o que permite o uso da base de Xavier et al. (2015) em estudos desta natureza.

### **3.2.1 Estimação da evapotranspiração de referência**

A evapotranspiração é definida por Pereira et al. (2007), como o processo simultâneo de transferência de água para atmosfera por evaporação de água presente no solo e pela transpiração das plantas. A Evapotranspiração Potencial (ETP) ou (ETo), refere-se à evapotranspiração de uma superfície de grama, cobrindo 100% do solo, com altura de 8 a 15 cm, em condições hídricas ideais e em crescimento ativo.

A variação da ETP é condicionada apenas pelas condições atmosféricas do local e é tomada como referência para se obter a Evapotranspiração da Cultura (ETc), que é o produto entre a ETP e o Coeficiente de Cultura (Kc). Como ETP é função apenas das condições meteorológicas, esta pode ser estimada por modelos matemáticos, sendo o principal o de Penman-Monteith, considerado como o método de referência Allen et al. (1998).

O método descrito por Monteith (1973) e adaptado por Allen et al. (1998) é um modelo micrometeorológico que possibilita a estimativa da ETP diária. Sendo assim, calcula-se a ETP ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) pela seguinte equação:

$$\text{ETP} = \frac{0,408 * s * (Rn - G) + \gamma * \frac{900 U_2 (Es - Ea)}{T + 275}}{s + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (1)$$

em que: Rn ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ) a radiação líquida total diária, G ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ ) é o fluxo de calor no solo,  $\gamma$  ( $0,063 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) é a constante psicométrica, T ( $^\circ\text{C}$ ) é a temperatura média do ar,  $U_2$  ( $\text{m s}^{-1}$ ) a velocidade do vento a 2 metros, um valor próximo de 75% da velocidade do vento medida a 10 metros de altura no posto meteorológico, Es (kPa) é a pressão de saturação de vapor, Ea (kPa) pressão parcial de vapor e s ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) é a declividade da curva de pressão de vapor. As três últimas variáveis são dadas pelas seguintes equações:

$$s = \frac{4098 * Es}{(T + 237,3)^2} \quad (2)$$

$$E_s = 0,6108 * 10^{\frac{7,5 T}{237,3+T}} \quad (3)$$

$$Ea = \frac{\frac{E_s}{UR}}{100} \quad (4)$$

### 3.2.2 Cálculo do balanço hídrico climatológico sequencial

A demanda hídrica de uma cultura em uma dada região e certa época do ano pode ser calculada a partir da elaboração do balanço hídrico climatológico, uma ferramenta para quantificar a água presente no solo, a partir do princípio de conservação de massa em um volume de solo vegetado, em que o armazenamento de água no solo, varia de acordo com as entradas e saídas de água do volume de controle (PEREIRA et al., 2007). A Figura 4 apresenta os fluxos de água para quantificar a quantidade de água no solo.

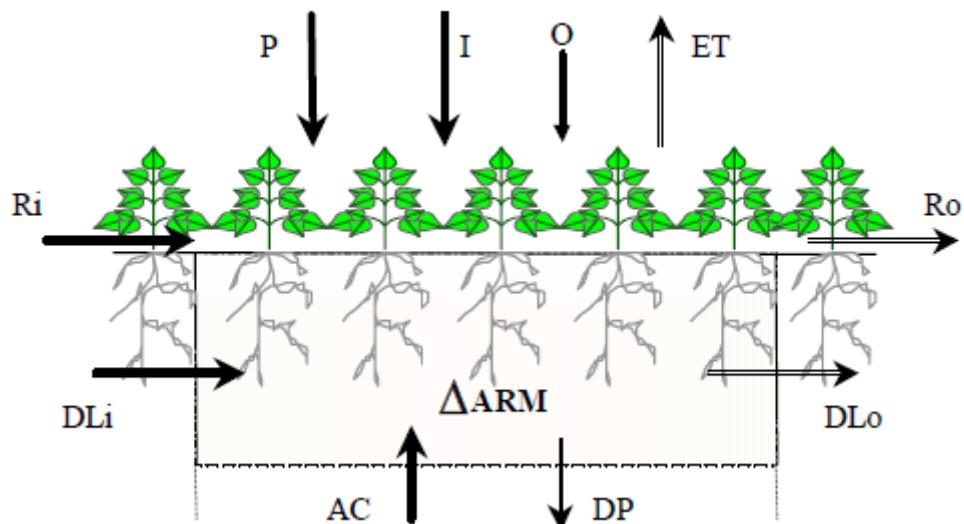


Figura 4 - Representação dos fluxos de entrada e saída do balanço hídrico climatológico a partir do Princípio de Conservação de Massa em um dado volume de solo. **Fonte:** (PEREIRA et al., 2007)

Da Figura 4, temos:

Fluxos de entrada de água no sistema:

- P = Precipitação
- I = Irrigação
- O = Orvalho
- Ri = Escorrimento superficial (Run in)
- DLi = Drenagem lateral
- AC = Ascensão Capilar.

Fluxos de saída de água no sistema:

- ET = Evapotranspiração
- Ro = Escorrimento superficial (Run off)
- DLo = Drenagem lateral;
- DP = Drenagem profunda.

Levando-se em conta que o Ri e Ro e que DLi e DLo tendem a se compensar, esses não são considerados na equação do armazenamento. O Orvalho (O) também pode ser desprezado, visto que sua contribuição é mínima. Sendo assim, a equação para a quantidade de água armazenada no solo, ou balanço hídrico pode ser representada a seguir:

$$\pm \Delta ARM = P + I - ET + AC - DP \quad (5)$$

O método de Thornthwaite e Mather (1955) considera o Armazenamento de água no solo sem irrigação ( $I = 0$ ) e Ascensão Capilar também zero, e a evapotranspiração adotada é a ETR (Evapotranspiração Real). Nesse caso, a DP é denominada excesso e, e assim temos que o Armazenamento é calculado por:

$$\pm \Delta ARM = P - ETR - EXC \quad (6)$$

Por fim é calculado o Déficit Hídrico, por meio da diferença entre a ETP e a ETR:

$$DEF = ETP - ETR \quad (7)$$

Para o cálculo do balanço hídrico para a cultura da cana-de-açúcar para as 28 estações meteorológicas foi elaborada uma planilha eletrônica seguindo a metodologia de Thornthwaite e Mather (1955), apresentada por Pereira et al. (2007).

### **3.2.3 Componentes do balanço hídrico da cultura**

A definição da CAD a ser utilizada foi embasada pela predominância do tipo de solo nos municípios da microrregião de Araçatuba, SP. De acordo com o mapa do Instituto Agronômico de Campinas (IAC), o qual mostra os principais solos presentes no Estado de São Paulo, na região em estudo há predominância de Argissolos e Latossolos IAC (2016). Sendo assim, conforme os parâmetros citados por Prado (2013), pode-se adotar uma CAD média de 70 mm para o cálculo do balanço hídrico da cana-de-açúcar.

Para o cálculo do balanço hídrico da cultura, utiliza-se o mesmo procedimento do Balanço de Thornthwaite e Mather (1955), porém, ao invés da ETP, utiliza-se a evapotranspiração da cultura (ETc), que é calculada pela seguinte equação:

$$\text{ETc} = \text{ETP} * \text{Kc} \quad (8)$$

O Kc (Coeficiente de Cultura) é função do Índice de Área Foliar (IAF) e varia de acordo com o crescimento e desenvolvimento da cultura (PEREIRA et al., 2007). Para fins deste trabalho foi utilizado um Kc médio de acordo com os valores propostos por Allen et al.(1998). O Kc médio utilizado considera a cana-de-açúcar com ciclos de aproximadamente 12 meses, e com diferentes épocas de plantio/colheita. Dessa forma foi calculado um coeficiente de cultura médio para cada dia, considerando-se a presença da cultura em diferentes fases de desenvolvimento ao longo do ano todo, de acordo com o manejo adotado nas usinas, em que as colheitas e sucessivas rebrotas ocorrem de abril a meados de dezembro na região de estudo. O valor do Kc médio utilizado foi de 0,9165.

No cálculo do Balanço Hídrico da Cultura, os valores de chuva total foram ajustados para a chuva efetiva, que corresponde a 80% da chuva total (SAMPAIO, 2000).

As lâminas requeridas de irrigação da cana-de-açúcar ao longo do ano foram obtidas pela soma do DEF total anual, considerando-se os percentis de 50%, 60%, 75%, 80% e 90%, para as 28 localidades analisadas.

## **3.3 Processamento dos dados geográficos para geração dos mapas**

A partir da obtenção dos percentis de déficit hídrico foram gerados mapas para cada nível de percentil. A espacialização dos dados de déficit hídrico foi gerada a partir de uma

equação de regressão linear múltipla para cada percentil. Esse método de interpolação tomou como base os valores de Latitude, Longitude e Altitude do Modelo de Elevação Digital (MED) SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) na resolução de 30° x 30° e no formato GEOTIFF (16 bits), disponíveis no site da EMBRAPA Monitoramento por Satélites (EMBRAPA, 2008). As imagens estão georreferenciadas originalmente no Sistema de Coordenadas Geográficas e o sistema de projeção DATUM WGS 84.

Após o download das imagens que cobrem a área da Microrregião de Araçatuba, SP, essas foram processadas no software ArcGIS 10.2.2. Primeiramente, foi utilizada a função *Mosaic* da caixa de ferramentas *Data Management Toolbox*. A partir de uma única imagem do MED da área, foram utilizadas as Equações 9 e 10, as quais o software já reconhece automaticamente, para obter as camadas de Latitude e Longitude::

$$\text{Latitude} = \$\$YMAP \quad (9)$$

$$\text{Longitude} = \$\$XMAP \quad (10)$$

em que \$\$YMAP é código da equação para obtenção do layer de Latitude, e \$\$XMAP é código da equação para obtenção do layer de Longitude.

A obtenção dos mapas foi realizada a partir do cruzamento dos *layers* correspondentes às coordenadas geográficas das estações meteorológicas, as quais estão disponíveis no site da ANA, no sistema “Hidroweb”, no site do DAEE e do CIIAGRO. A partir dos valores das coordenadas dos pontos de coleta de dados (PCD) (Estações meteorológicas), esses foram colocados no SIG (Sistema de Informação Geográfica), e utilizando o mosaico das imagens do MED, e a função *Extract Values to Point* da caixa de ferramentas *Spatial Analyst Tool*, obteve-se o valor da Altitude para cada PCD. A distribuição espacial de cada PCD está disponível na Figura 2.

Os mapas foram gerados a partir da função *Raster Calculator* da caixa de ferramentas *Spatial Analyst tools*, e as variáveis independentes foram a Latitude, Longitude e Altitude. Essas variáveis foram empregadas de forma simples e integrada na estimação da soma do déficit hídrico, conforme a equação a seguir:

$$\text{Déficit Hídrico} = a + b \phi + c \lambda + d \mu + e \phi \lambda + f \phi \mu + g \lambda \mu + h \phi^2 + i \lambda^2 + j \mu^2 + \varepsilon \quad (11)$$

em que:  $\phi$  é a Latitude (em graus décimos negativos);  $\lambda$  é a Longitude (em graus décimos negativos);  $\mu$  é a Altitude (em metros);  $a$  é o coeficiente linear da equação de Regressão;  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$ ,  $f$ ,  $g$ ,  $h$ ,  $i$  e  $j$  são os coeficientes; e  $\varepsilon$  o erro associados às estimativas.

### 3.4 Área de produção de cana-de-açúcar por município

Os dados das áreas de produção de cana-de-açúcar por município estão disponíveis no site do projeto CANASAT, dirigido pelo Departamento de Sensoriamento Remoto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) CANASAT(2016).

Para o efeito deste estudo, foi utilizada a área total de cana-de-açúcar disponível para a colheita, sendo assim foram incluídas as áreas de cana soca, cana reformada (planta) e área de expansão, levando em conta os ciclos de 12 e 18 meses da cultura.

Os dados das áreas com cana-de-açúcar podem ser baixados em forma de planilhas eletrônicas. Foi considerada a última safra atualizada no sistema do CANASAT, a Safra 2013/2014. Dessa forma, para cada município obteve-se a área de cultivo de cana-de-açúcar. A Figura 5 apresenta os municípios da microrregião de Araçatuba, classificados de acordo com a sua área de cultivo, Tabela 6 traz a área de cana-de-açúcar para todos os municípios da microrregião.

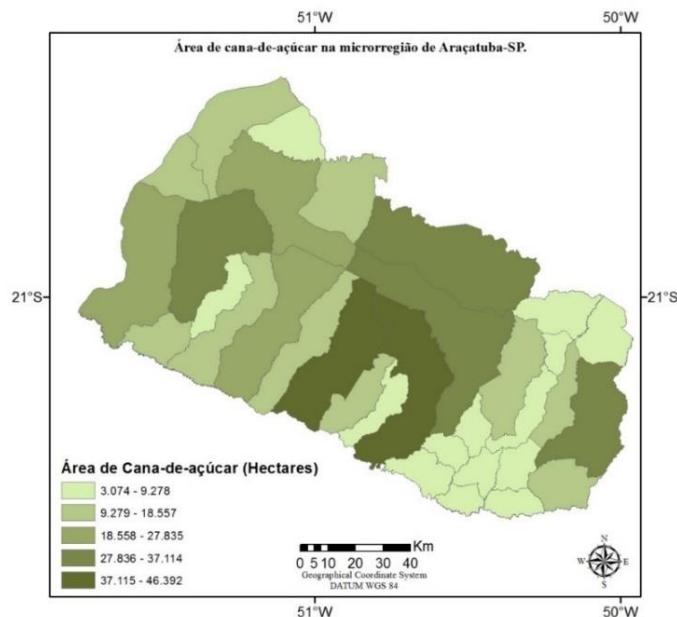


Figura 5 - Classificação dos municípios da microrregião de Araçatuba, SP de acordo com a área cultivada com cana-de-açúcar. Fonte: Adaptado CANASAT (2016).

Tabela 6- Área de cana-de-açúcar dos municípios da microrregião de Araçatuba, SP, em km<sup>2</sup> da safra 2013/14 disponíveis na base de dados do Projeto CANASAT.

Município	Área (km <sup>2</sup> )
Alto Alegre	13.573,62
Andradina	32.545,89
Araçatuba	31.690,08
Bento De Abreu	13.999,68
Bilac	4.411,89
Birigui	10.197,45
Braúna	7.486,56
Brejo Alegre	3.074,49
Buritama	5.834,88
Castilho	25.195,95
Clementina	6.350,67
Coroados	8.141,67
Gabriel Monteiro	3.962,79
Glicério	10.800,63
Guaraçaí	14.592,15
Guararapes	38.705,85
Ilha Solteira	17.629,56
Itapura	9.768,24
Lavínia	17.141,76
Luiziânia	5.096,79
Mirandópolis	24.117,39
Murutinga Do Sul	4.056,21
Nova Independência	9.367,02
Penápolis	34.453,89
Pereira Barreto	24.586,65
Piacatu	5.776,74
Rubiácea	7.834,77
Santo Antônio do Aracanguá	34.281,27
Santópolis do Aguapeí	4.608,99
Sud Mennucci	13.288,5
Suzanápolis	8.350,92
Valparaíso	46.392,3
Zacarias	8.237,97

Fonte: CANASAT, 2016.

### 3.5 Cálculo da disponibilidade hídrica superficial

A disponibilidade hídrica para atividades de irrigação foi calculada de acordo com a metodologia explicada no tópico “2.5 Disponibilidade Hídrica Superficial”. Sendo assim,

para o cálculo do recurso hídrico disponível para cada município, foram extraídos os valores da  $Q_{7,10}$  para todos os pontos de coleta de dados (PCDs) por meio do sistema proposto por Wolff (2013). Os dados estão disponíveis online no “*Sistema Regionalização de Vazões São Paulo*” (WOLFF, 2016).

A partir dos valores da  $Q_{7,10}$  para cada PCD, foi utilizado a técnica da Regressão Linear Múltipla para criar o mapa de espacialização da  $Q_{7,10}$ . A mesma metodologia utilizada para gerar os mapas de déficit hídrico foi utilizada para gerar o mapa desta vazão. A Equação 11 foi a equação base para gerar o mapa da  $Q_{7,10}$ . Os coeficientes para a geração do mapa de  $Q_{7,10}$ , são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7-Coeficientes da regressão linear múltipla utilizada para espacializar os valores da  $Q_{7,10}$ , na microrregião de Araçatuba, SP.

Coeficientes	Valores
Interseção	2.519721353
$\phi$	134.5086935
$\lambda$	-53.11889279
$\mu$	0.323038526
$\phi \lambda$	0.57571963
$\phi \mu$	0.004938783
$\lambda \mu$	0.0042376
$\Phi^2$	2.574497868
$\lambda^2$	-0.629444806
$\mu^2$	-0.000007
$\varepsilon$	0.261345893
R múltiplo	0.72

A  $Q_{7,10}$  foi extraída em  $L s^{-1}km^{-2}$ , e para calcular a disponibilidade hídrica superficial total de cada município, a  $Q_{7,10}$  de cada município foi multiplicada pela área total em  $km^2$  de cada município. E dessa maneira foi calculada a Disponibilidade Hídrica Superficial Anual (DHSA) em  $m^3$ , representada pela seguinte equação:

$$DHSA = \frac{0,5 Q_{7,10} * \text{Área do Município} * 3600 * 24 * 365}{1000} \quad (12)$$

em que a Área do Município é dada em ( $\text{km}^2$ ),  $Q_{7,10}$  em ( $\text{L s}^{-1}\text{km}^{-2}$ ) e DHSA em  $\text{m}^3\text{ano}^{-1}$ . A área do município foi retirada do site do IBGE (2016). De acordo com a Figura 6, observa-se que a  $Q_{7,10}$  varia de acordo com a Latitude, Longitude e Altitude, e 5 classes de vazão foram encontradas.

A partir da DHSA em  $\text{m}^3 \text{ano}^{-1}$  pode-se calcular a lâmina disponível em  $\text{mm ano}^{-1}$ , através da área de cada município e dos valores da  $Q_{7,10}$ .

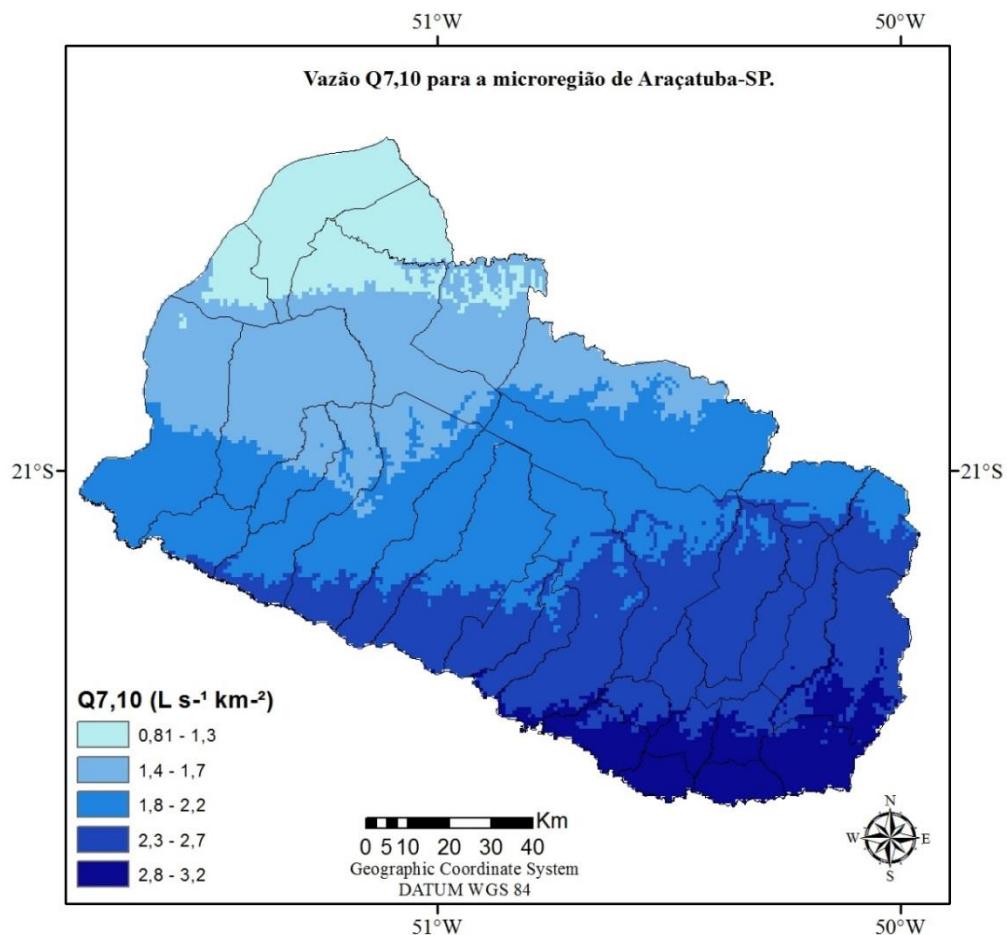


Figura 6 - Vazão Ecológica  $Q_{7,10}$  espacializada para a microrregião de Araçatuba, SP. Os dados de vazão foram obtidos a partir do sistema proposto por Wolff (2013).

### 3.6 Cálculo da porcentagem da lâmina requerida coberta pela água disponível

Foram criados diferentes cenários de cobertura da lâmina de irrigação em diferentes níveis de aplicação. Assim, foi calculada a porcentagem da lâmina requerida que se consegue cobrir com a água superficial disponível, irrigando-se 20, 40, 60, 80 e 100% da necessidade total de irrigação da cana. Esse cálculo foi feito a partir da seguinte equação, para cada município:

$$\% \text{ Lâmina Requerida} = \frac{DHSA}{\text{Área de Cultivo} * \text{Necessidade Anual} * \text{Nível de Irrigação} * 10^{-3}} \quad (13)$$

em que DHSA em  $\text{m}^3 \text{ ano}^{-1}$ , a Área de Cultivo em  $\text{m}^2$ , Necessidade Anual adotada a Lâmina Média (Percentil de 50%) em mm e Nível de irrigação em %.

### 3.7 Área irrigável utilizando diferentes níveis de irrigação

Foram criados também diversos cenários da área irrigável em cada município considerando-se as diferentes lâminas de irrigação. Esses cenários foram estabelecidos considerando 100% da área total de cana-de-açúcar por unidade municipal. Sendo assim, foi calculada a área irrigável levando em conta os seguintes níveis de irrigação: 20, 40, 60, 80 e 100% da lâmina total requerida. A área irrigável, dada em porcentagem, foi calculada pela seguinte equação:

$$\% \text{ Área Irrigável} = \frac{DHSA}{\text{Área de Cultivo} * \text{Necessidade Anual} * \text{Nível de Irrigação} * 10^{-3}} \quad (14)$$

em que DHSA em  $\text{m}^3 \text{ ano}^{-1}$ , a Área de Cultivo em  $\text{m}^2$ , Necessidade Anual adotada a Lâmina Média (Percentil de 50%) em mm e Nível de irrigação em %.

Ressalta-se que a % Lâmina Requerida e % Área Irrigável tratam-se da mesma informação interpretadas de maneiras diferentes, pois os valores de DHSA, Área de Cultivo e Necessidade Anual são constantes para cada município

## **4. RESULTADOS**

### **4.1 Água superficial disponível por município**

A disponibilidade hídrica superficial foi calculada a nível de municípios a partir da equação (12), a qual leva basicamente em consideração a vazão  $Q_{7,10}$  em  $\text{m}^3\text{ano}^{-1}$  e a área do município em  $\text{km}^2$ . A obtenção da vazão média de cada município foi obtida a partir da ponderação dos valores dos pixels de cada município, originados a partir da criação do mapa de regressão linear múltipla da  $Q_{7,10}$  (Figura 6). A disponibilidade hídrica está disponível para todos os municípios da microrregião de Araçatuba, SP, na Tabela 8.

O valor médio entre os municípios é de  $115 \text{ mm ano}^{-1}$ . Os três municípios que apresentaram os menores valores foram: Ilha Solteira ( $58,72 \text{ mm ano}^{-1}$ ), Itapura ( $60,68 \text{ mm ano}^{-1}$ ) e Valparaíso ( $63,46 \text{ mm ano}^{-1}$ ). Os municípios que apresentaram os maiores valores foram: Birigui ( $193,25 \text{ mm ano}^{-1}$ ), Buritama ( $186,98 \text{ mm ano}^{-1}$ ) e Piacatu ( $58,72 \text{ mm ano}^{-1}$ ).

Ao analisar a Figura 6, observa-se que a  $Q_{7,10}$  possui um padrão de distribuição espacial, em que os maiores valores estão localizados ao Sudoeste da microrregião de Araçatuba, e os menores valores localizados ao Noroeste da microrregião. Como a disponibilidade hídrica anual é calculada com base nos valores da  $Q_{7,10}$ , observou-se o mesmo padrão distribuição para esse parâmetro. Assim, os municípios que apresentaram os maiores valores estão ao Sudoeste, e os municípios com os menores valores ao Noroeste.

O valor total da disponibilidade hídrica na microrregião anualmente é de  $3772 \text{ mm ano}^{-1}$ . A mensuração dos recursos hídricos disponíveis é de extrema importância para dar continuidade aos estudos da viabilidade da irrigação de cana de açúcar na área analisada no projeto.

Através dos dados dispostos na foram gerados os mapas de % Lâmina Requerida e a % Área irrigável.

Tabela 8- Área de cada município em km<sup>2</sup>, a Q<sub>7,10</sub> (m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>km<sup>-2</sup>) e a DHSA em mm ano<sup>-1</sup>.

<b>Número</b>	<b>Municípios</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Q<sub>7,10</sub> (m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>km<sup>-2</sup>)</b>	<b>DHSA (mm ano<sup>-1</sup>)</b>
1	Alto Alegre	368,33	0,0029	105,49
2	Andradina	1101,58	0,0016	73,62
3	Araçatuba	1338,73	0,0021	124,58
4	Bento De Abreu	346,63	0,0024	80,13
5	Bilac	181,84	0,0025	141,76
6	Birigui	610,03	0,0024	193,26
7	Braúna	225,33	0,0027	110,98
8	Brejo Alegre	120,96	0,0023	125,51
9	Buritama	374,37	0,0021	186,98
10	Castilho	1218,67	0,0017	113,90
11	Clementina	194,81	0,0027	114,93
12	Coroados	283,50	0,0025	119,50
13	Gabriel Monteiro	159,71	0,0026	143,92
14	Glicério	314,65	0,0025	100,95
15	Guaraçáí	653,25	0,0019	119,01
16	Guararapes	1099,21	0,0023	90,17
17	Ilha Solteira	741,49	0,0010	58,72
18	Itapura	343,22	0,0012	60,69
19	Lavínia	616,94	0,0021	102,89
20	Luiziânia	192,44	0,0030	152,41
21	Mirandópolis	1053,16	0,0020	117,03
22	Murutinga Do Sul	287,19	0,0018	174,33
23	Nova Independência	304,86	0,0021	91,55
24	Penápolis	818,34	0,0026	85,26
25	Pereira Barreto	1116,04	0,0014	88,14
26	Piacatu	268,11	0,0028	176,42
27	Rubiácea	272,60	0,0024	114,44
28	Santo Antônio Aracanguá	1495,38	0,0018	108,03
29	Santópolis Do Aguapeí	147,77	0,0029	129,14
30	Sud Mennucci	674,06	0,0014	99,85
31	Suzanápolis	375,48	0,0011	67,68
32	Valparaíso	984,51	0,0022	63,46
33	Zacarias	366,02	0,0023	137,47

## 4.2 Diferentes cenários da lâmina de irrigação requerida

Os diferentes cenários da lâmina de irrigação requerida foram criados a partir dos dados de déficit hídrico obtidos através do balanço hídrico gerado para as 28 localidades, embasados pelos 33 anos da série histórica de dados meteorológicos. Para cada localidade foi calculado o percentil de 50, 60, 75, 80 e 90%.

O percentil é uma análise estatística que divide o conjunto de dados, nesse caso o déficit hídrico, em cem partes iguais, e então a partir do nível em que é calculado tem-se a distribuição dos dados em relação a distribuição normal. Esta técnica foi utilizada para estabelecer um limite de aceitação de déficit, e ter o conhecimento de como estão distribuídos os valores de lâminas de irrigação requerida.

Antes da obtenção dos valores das lâminas de irrigação para cada município, foi calculado o percentil de déficit hídrico para cada uma das 28 localidades, e então foram criados 5 mapas utilizando a Equação 11, para cada nível de percentil. Através dos mapas gerados pelas equações de regressão, foi calculado a média ponderada dos valores dos pixels de cada município para obter os valores que estão dispostos na Tabela 9.

Pela Tabela 9 observa-se o valor médio ponderado dos pixels abrangidos por cada unidade municipal, para os diferentes mapas gerados. Nota-se que o valor da lâmina requerida aumenta, à medida que o percentil aumenta, isso é esperado visto que quanto maior o nível do percentil maior será o intervalo delimitado.

A Tabela 9 traz os valores médios das lâminas requeridas de irrigação calculadas através do Balanço Hídrico da Cultura, utilizando os dados climatológicos de 1980 a 2013. Essa tabela é complementar aos seguintes mapas da espacialização das lâminas requeridas. A Tabela 10 traz os coeficientes das equações de Regressão Linear Múltipla que foram utilizadas para cada percentil para gerar os mapas de lâmina requerida.

A Figura 7 é o mapa de lâmina requerida gerado a partir do percentil de 50% do déficit hídrico, em outras palavras é o mapa da lâmina requerida média para cada município. Nota-se algumas faixas homogêneas ao longo da microrregião. Os menores valores da Lâmina requerida estão localizados ao extremo sul e uma pequena parte do noroeste da região.

Tabela 9- Diferentes cenários de lâminas ( $\text{mm ano}^{-1}$ ) de irrigação a nível municipal da microrregião de Araçatuba, SP, calculados a partir das equações de regressão linear. Os valores de cada município é a média ponderada entre os valores dos pixels que abrange cada município e o número de pixels em função da área municipal.

Número	Municípios	Percentis (%)				
		50	60	75	80	90
1	Alto Alegre	514,82	693,86	847,26	926,45	1026,70
2	Andradina	524,84	680,07	858,50	982,00	1086,43
3	Araçatuba	520,22	679,34	842,88	956,57	1059,69
4	Bento De Abreu	504,93	671,05	832,84	934,74	1036,77
5	Bilac	515,63	694,81	846,10	931,17	1032,03
6	Birigui	524,39	693,02	850,59	951,17	1052,02
7	Braúna	512,66	695,74	845,55	923,36	1023,63
8	Brejo Alegre	514,92	676,63	841,20	953,77	1053,17
9	Buritama	515,34	681,81	844,31	956,52	1054,09
10	Castilho	533,84	673,61	866,12	1011,33	1116,24
11	Clementina	500,29	675,92	830,45	914,42	1015,62
12	Coroados	524,46	698,03	852,77	945,00	1045,50
13	Gabriel Monteiro	501,87	677,99	832,06	918,01	1019,22
14	Glicério	523,23	690,33	850,22	950,35	1050,40
15	Guaraçaí	511,64	671,89	845,80	962,32	1064,00
16	Guararapes	514,01	681,08	840,21	940,91	1043,28
17	Ilha Solteira	507,84	664,16	846,65	973,92	1079,71
18	Itapura	529,46	675,57	863,83	1000,56	1108,07
19	Lavínia	514,28	673,21	841,28	955,02	1058,20
20	Luiziânia	492,10	659,54	820,52	909,13	1010,79
21	Mirandópolis	513,22	675,72	844,76	957,17	1059,49
22	Murutinga Do Sul	515,89	678,05	851,63	965,80	1068,02
23	Nova Independência	513,74	659,59	846,59	981,54	1083,16
24	Penápolis	523,75	694,89	853,97	949,05	1047,96
25	Pereira Barreto	522,02	675,35	851,00	977,49	1083,35
26	Piacatu	488,15	650,95	814,11	912,10	1014,22
27	Rubiácea	505,80	672,38	832,94	933,30	1035,42
28	Santo Antônio Do Aracanguá	516,11	676,46	841,38	960,54	1062,15
29	Santópolis Do Aguapeí	482,36	644,74	808,91	904,37	1006,32
30	Sud Mennucci	516,24	675,13	844,80	966,67	1070,62
31	Suzanápolis	507,82	668,88	843,72	965,19	1069,27
32	Valparaíso	513,66	674,80	839,80	949,51	1052,50
33	Zacarias	512,73	681,24	845,02	954,96	1050,51
	Valor Médio	513,10	676,84	842,96	950,74	1052,68

Tabela 10- Coeficientes das equações de Regressão Linear Múltipla para a obtenção dos mapas de lâmina requerida para cinco percentis.

Coeficientes	Lâmina				
	50	60	75	80	90
Interseção	-346750	-273918	-235172	-235172	-297137
$\Phi$	-11897.86	-10087.51	-10381.57	-10381.57	-11789.47
$\Lambda$	-8298.42	-6246.78	-4618.96	-4618.96	-6458.72
$\mu$	60.98	53.10	52.20	52.20	54.64
$\phi \lambda$	-120.43	-100.26	-101.14	-101.14	-120.06
$\phi \mu$	0.47	0.49	0.52	0.52	0.47
$\lambda \mu$	0.97	0.82	0.81	0.81	0.87
$\Phi^2$	-133.60	-114.98	-120.95	-120.95	-131.89
$\lambda^2$	-53.1388	-37.6928	-21.4664	-21.4664	-35.3927
$\mu^2$	-0.0023	-0.0018	-0.0007	-0.0007	-0.0010
$\varepsilon$	18.3495	18.4627	18.8079	19.3614	19.6963
R múltiplo	0.724	0.734	0.761	0.821	0.821

O município que apresenta o menor valor de lâmina requerida complementar para cana-de-açúcar é Piacatu, que tem o valor de 488,15 mm ano<sup>-1</sup>. Piacatu é o município #26, e está localizado ao extremo sul da microrregião (Figura 2). O município que apresentou o maior valor da lâmina média requerida foi Castilho, município #10, com valor de 533,84 mm ano<sup>-1</sup>, o mesmo está localizado ao Oeste da área estudada, e possui a maior mancha em de valores elevados da lâmina requerida, em que cerca de 35% dos pixels que cobrem o município estão entre 540 e 560 mm ano<sup>-1</sup>. A valor médio da lâmina média requerida entre todos os municípios é de 513 mm ano<sup>-1</sup>.

Observa-se que a grande maioria dos municípios possui uma ou duas classes de déficit hídrico. Todavia, os municípios de Buritama e Zacarias apresentam 5 e 4 classes, respectivamente. Isso mostra que há uma grande variação dos valores dos pixels dentro dessas unidades municipais. Os municípios localizados mais ao centro da microrregião, como Araçatuba, possuem uma homogeneidade maior entre o limite municipal, apresentando no máximo duas classes da lâmina requerida.

A Figura 8 mostra a espacialização da lâmina requerida de irrigação considerando percentil de 60%. Assim como a lâmina média requerida, observa-se algumas faixas homogêneas ao longo da região. A unidade municipal que apresentou o maior valor foi o

município #12 Coroados, com valor de 698 mm ano<sup>-1</sup>, e localizado ao sudoeste da microrregião. O município que apresentou a menor lâmina de irrigação requerida foi Santópolis do Aguapei, município #29, localizado ao extremo sul da microrregião, com valor de 644,74 mm ano<sup>-1</sup>. O valor médio entre os municípios foi de 676,84 mm ano<sup>-1</sup>.

Observa-se um maior número de classes de lâmina requerida necessária, e alguns municípios chegam a ter 5 e 6 classes. No sudoeste da microrregião estão localizados os municípios com os maiores números de classes, em outras palavras, os municípios mais heterogêneos.

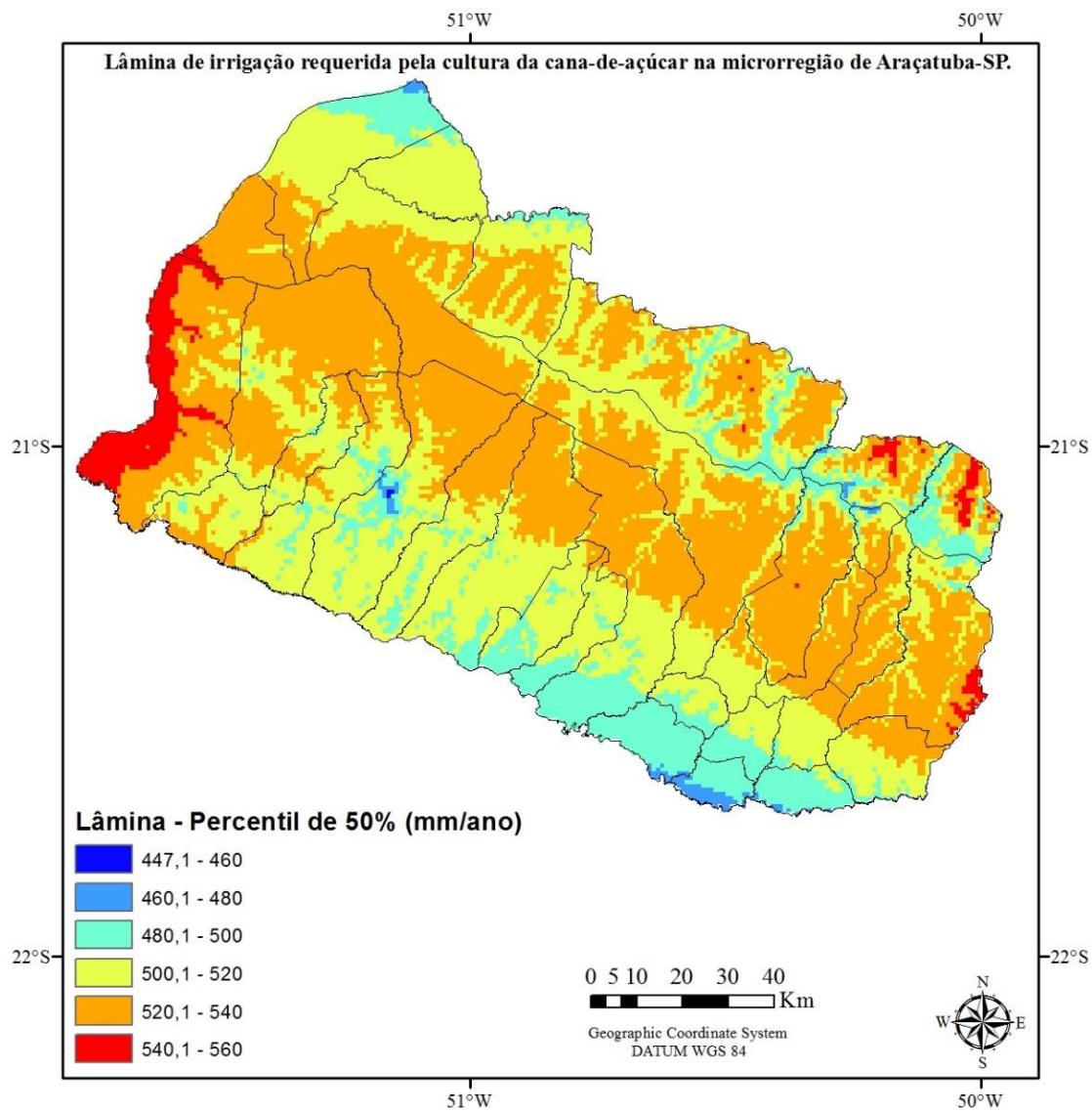


Figura 7 - Lâmina de irrigação requerida para a cultura da cana-de-açúcar, considerando-se o percentil de 50%, na microrregião de Araçatuba, SP.

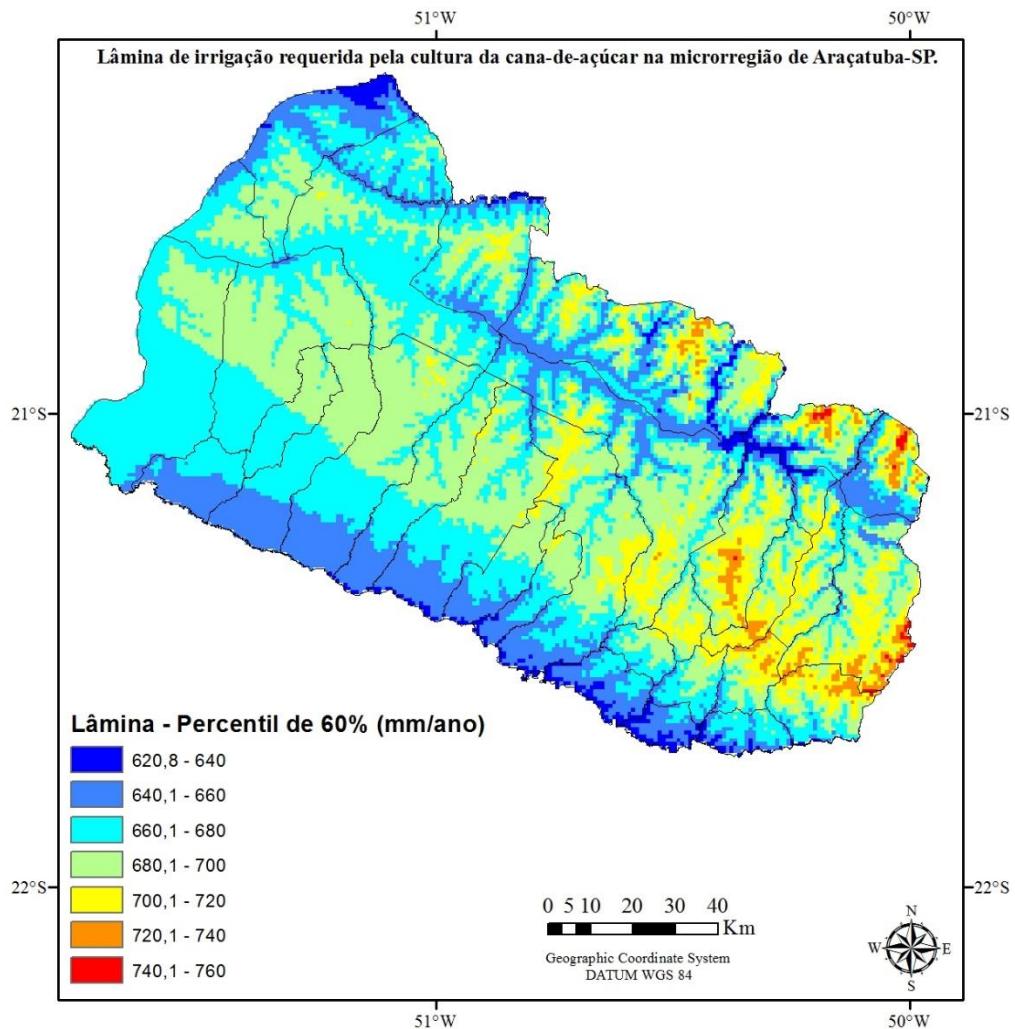


Figura 8 - Lâmina de irrigação requerida para a cultura da cana-de-açúcar, considerando-se o percentil de 60%, na microrregião de Araçatuba, SP.

A Figura 9 traz o mapa da lâmina de irrigação requerida considerando percentil de 75%, assim como os mapas apresentados anteriormente, observa-se algumas faixas de distribuição da lâmina requerida ao longo da microrregião. O município #10, Castilho, apresentou o maior valor de déficit, de  $866,13 \text{ mm ano}^{-1}$ , e o município de Santópolis de Aguapei (município #29), o menor valor de lâmina requerida de  $808,91 \text{ mm ano}^{-1}$ . Observou-se o mesmo padrão de distribuição do número de classes de lâmina requerida constato no mapa de percentil de 60%.

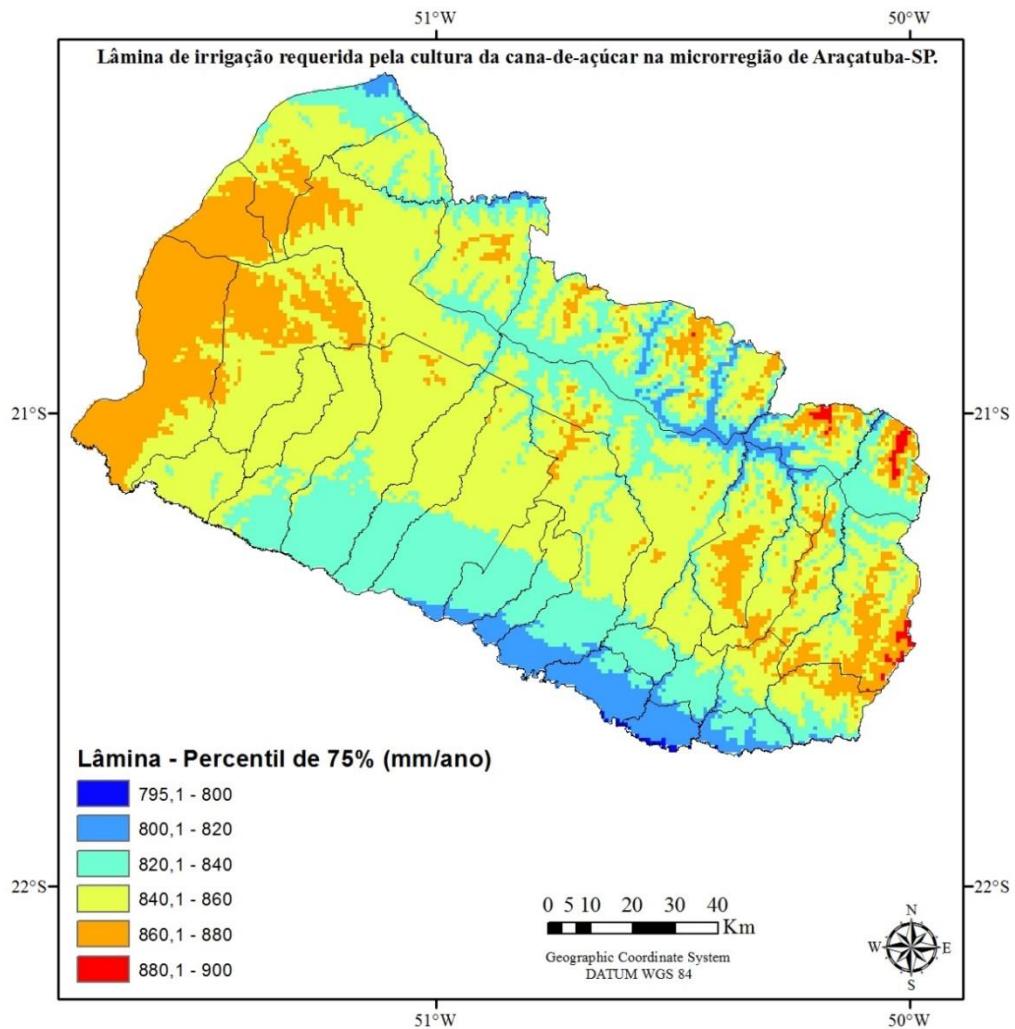


Figura 9 - Lâmina de irrigação requerida para a cultura da cana-de-açúcar, considerando-se o percentil de 75%, na microrregião de Araçatuba, SP.

A Figura 10 traz a espacialização dos valores de déficit hídrico considerando percentil de 80%. Diferente dos mapas apresentado anteriormente, as faixas ao longo da microrregião passam a ficam menos evidentes, e o número de classes aumenta, consequentemente, a distribuição passar a ser caracterizada por grandes manchas homogêneas sobre os municípios. O padrão continua sendo o mesmo, em que os municípios localizados mais ao Sul possuem os menores valores de lâmina requerida, e os municípios mais ao Oeste, possuem valores mais elevado de lâminas requerida.

O município com o maior valor foi sendo Castilho, com 1011,33 mm ano<sup>-1</sup>, e Santópolis do Aguapei com o menor valor, de 904,34 mm ano<sup>-1</sup>. O valor médio entre todos os municípios foi de 950,73 mm ano<sup>-1</sup>.

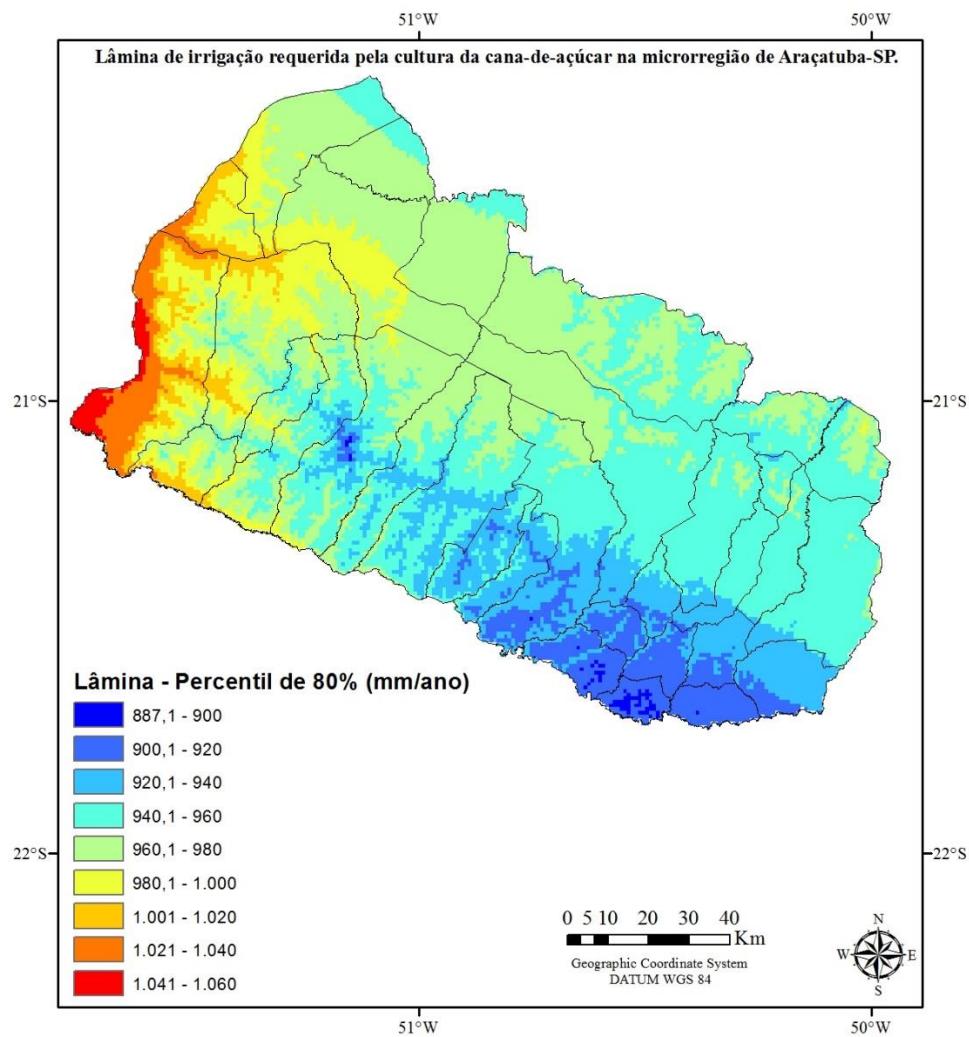


Figura 10 - Lâmina de irrigação requerida para a cultura da cana-de-açúcar, considerando-se o percentil de 80%, na microrregião de Araçatuba, SP.

A Figura 11 traz a espacialização dos valores de déficit hídrico considerando percentil de 90%. Observa-se o mesmo padrão de distribuição das manchas de déficit hídrico, quando comparado ao mapa de percentil de 80%, e um maior número de classes, o que evidencia essas manchas. O município que apresentou o maior valor foi Castilho, com

1116,24 mm ano<sup>-1</sup>, e o menor foi Santópolis de Aguapei, com 1006,32 mm ano<sup>-1</sup>. O valor médio entre os municípios foi de 1052,68 mm ano<sup>-1</sup>.

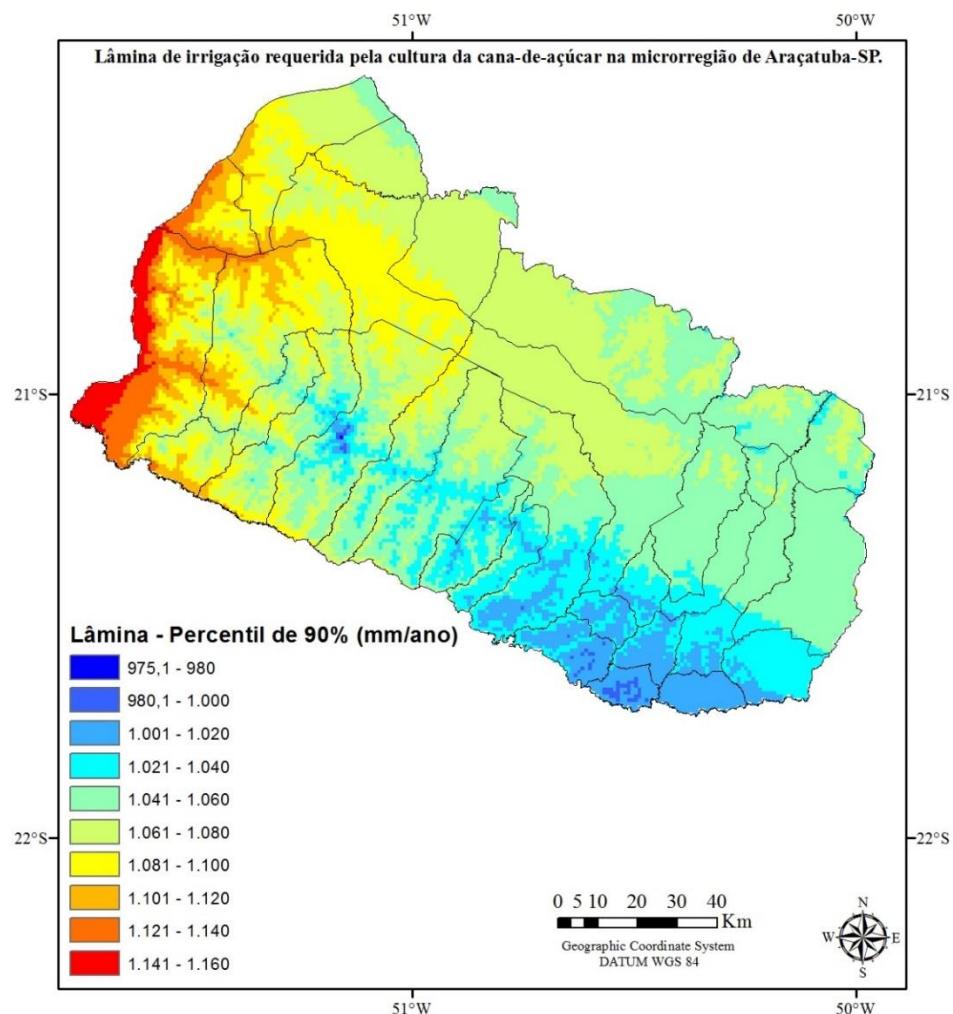


Figura 11- Lâmina de irrigação requerida para a cultura da cana-de-açúcar, considerando-se o percentil de 90%, na microrregião de Araçatuba, SP.

Por meio dos mapas pode-se constatar um padrão de deficiência hídrica, pois o déficit passa aumentar a medida que os municípios se localizam mais em direção Noroeste da microrregião de Araçatuba, SP. Essa distribuição também é constatada ao se observar a Figura 6, em que a vazão  $Q_{7,10}$  passa a diminuir a medida que os municípios se localizam ao Noroeste da microrregião.

Os mapas das lâminas requeridas de irrigação demonstram o comportamento do déficit hídrico ao longo da região estudada. Essas informações podem ser utilizadas para

auxiliar na tomada de decisão no planejamento de expansão das áreas de canaviais, no manejo da irrigação dos canaviais irrigados e na alocação das regiões produtoras. Os mapas trazem além do conhecimento das lâminas requeridas de irrigação, o entendimento da distribuição das áreas que possuem maior risco de ocorrência de elevadas lâminas de déficit hídrico.

#### **4.3 Cenários de cobertura da lâmina requerida**

O cálculo da cobertura da lâmina requerida foi embasado pela equação (13), a qual leva em consideração a disponibilidade hídrica superficial, calculada a partir do volume hídrico disponível (50% da  $Q_{7,10}$ ), a área de cana, disponibilizada através do CANASAT, e em função da necessidade hídrica da cultura, em cada município. Para todos os cenários foi admitido que 100% da área de cana-de-açúcar seria irrigada, e os cenários foram criados a partir da elaboração de cinco níveis de atendimento da lâmina total requerida.

A Tabela 11 traz as porcentagens de cobertura das lâminas de irrigação requerida em função dos cinco cenários de lâmina aplicada. Pela Tabela 11, observa-se que a aplicação de uma lâmina correspondente a 20% da lâmina total requerida, pode ser coberta pela disponibilidade hídrica dos municípios na grande maioria dos casos. Em 20 municípios, a lâmina é totalmente coberta. A menor cobertura está no município de Itapura, onde apenas 61,78% da lâmina de 20% é coberta. Em relação à lâmina de 40%, apenas três municípios possuem disponibilidade hídrica suficiente para cobrir mais de 90% dessa lâmina. A maior parte dos municípios ficou no intervalo entre 45 e 55% de cobertura. O município com o maior porcentual de cobertura é Buritama.

A lâmina de 60% não é coberta em mais de 70% em nenhum dos municípios, e os valores mais altos estão próximo de 62%, e os valores médios entre 35% e 45% de cobertura. Valores menores são observados para a lâmina de 80%, e para essa lâmina o maior valor de cobertura é de 45,35%. O município com a maior disponibilidade hídrica continua sendo Buritama.

A lâmina para cobrir 100% da necessidade hídrica da cana-de-açúcar em 100% da área de canavial em cada município, mostra que o maior valor de lâmina coberta é de 36,85% e o menor de 11,46%. A maioria dos municípios apresenta-se na casa dos 22% de

cobertura da lâmina total necessária, e apenas dois municípios estiveram na classe de cobertura acima 35%, Buritama e Birigui.

Os mapas das % de cobertura de diferentes lâminas requeridas de irrigação estão disponíveis após a Tabela 11.

#### **4.4 Cenários de % de áreas irrigáveis de cana-de-açúcar por município**

Os cenários de % de Áreas Irrigáveis de cana-de-açúcar em cada município, foi calculado a partir da Equação (14). Esse cálculo leva em conta a área de cana-de-açúcar, disponível no site do programa CANASAT, a disponibilidade hídrica superficial, calculada a partir do volume hídrico disponível (50% da  $Q_{7,10}$ ) e a necessidade hídrica da cultura em cada município.

Os valores de porcentagem das áreas irrigáveis de cana-de-açúcar por município para cada uma das cinco diferentes lâminas de irrigação são apresentadas na Tabela 12. Como explicado acima, esses valores são os mesmos da porcentagem de cobertura da lâmina requerida, todavia, expressos de uma forma diferente. Sendo assim, as mesmas interpretações feitas para os mapas de cobertura da lâmina requerida podem ser feitas para os mapas de áreas irrigáveis.

Dessa forma, aplicando uma lâmina de 20% da lâmina total requerida, 20 municípios apresentam a cobertura de 100% da área total de cana-de-açúcar, e 28 municípios apresentam pelo menos 70% de áreas irrigáveis. Assim como observado anteriormente, à medida que os valores da lâmina aplicada aumentam, a % da área irrigável diminui.

Ao considerar a aplicação da lâmina total, nenhum dos municípios possuem área irrigável acima de 50%. O maior valor observado foi para 36,85%, para o Birigui, e o menor valor de 11,85% para Itapura. O valor médio de % de área irrigável é de 22,32%. Um total de 21 dos municípios possuem área irrigável maior que 20%, e cinco municípios possuem % de área irrigável menor que 15%.

Observa-se que os municípios que possuem os menores valores estão localizados ao Noroeste da microrregião, o que corresponde a região que possui o menor volume de disponibilidade hídrica superficial.

A Tabela 12 traz os valores das porcentagens de áreas irrigáveis para todos os municípios, e as Figuras 17 a 21 apresentam essas informações espacializadas.

Tabela 11- Porcentagem de cobertura da lâmina de irrigação requerida pela cultura da cana-de-açúcar na microrregião de Araçatuba, SP, de acordo com diferentes níveis de irrigação.

Número	Municípios	Lâmina de Irrigação (%)				
		20	40	60	80	100
		% Área Irrigável				
1	Alto Alegre	100,00	51,23	34,15	25,61	20,49
2	Andradina	70,14	35,07	23,38	17,53	14,03
3	Araçatuba	100,00	59,87	39,91	29,93	23,95
4	Bento De Abreu	79,35	39,67	26,45	19,84	15,87
5	Bilac	100,00	68,73	45,82	34,37	27,49
6	Birigui	100,00	92,13	61,42	46,07	36,85
7	Braúna	100,00	54,12	36,08	27,06	21,65
8	Brejo Alegre	100,00	60,94	40,62	30,47	24,37
9	Buritama	100,00	90,71	60,47	45,35	36,28
10	Castilho	100,00	53,34	35,56	26,67	21,34
11	Clementina	100,00	57,43	38,29	28,72	22,97
12	Coroados	100,00	56,96	37,97	28,48	22,78
13	Gabriel Monteiro	100,00	71,69	47,80	35,85	28,68
14	Glicério	96,47	48,23	32,16	24,12	19,29
15	Guaraçaí	100,00	58,15	38,77	29,07	23,26
16	Guararapes	87,71	43,85	29,24	21,93	17,54
17	Ilha Solteira	57,81	28,91	19,27	14,45	11,56
18	Itapura	57,31	28,65	19,10	14,33	11,46
19	Lavínia	100,00	50,02	33,34	25,01	20,01
20	Luiziânia	100,00	77,43	51,62	38,72	30,97
21	Mirandópolis	100,00	57,01	38,00	28,50	22,80
22	Murutinga Do Sul	100,00	84,48	56,32	42,24	33,79
23	Nova Independência	89,10	44,55	29,70	22,28	17,82
24	Penápolis	81,39	40,70	27,13	20,35	16,28
25	Pereira Barreto	84,42	42,21	28,14	21,11	16,88
26	Piacatu	100,00	90,35	60,23	45,18	36,14
27	Rubiácea	100,00	56,57	37,71	28,28	22,63
28	Santo Antônio Do Aracanguá	100,00	52,33	34,89	26,16	20,93
29	Santópolis Do Aguapeí	100,00	66,93	44,62	33,46	26,77
30	Sud Mennucci	96,70	48,35	32,23	24,18	19,34
31	Suzanápolis	66,64	33,32	22,21	16,66	13,33
32	Valparaíso	61,78	30,89	20,59	15,44	12,36
33	Zacarias	67,03	44,69	33,51	33,51	26,81

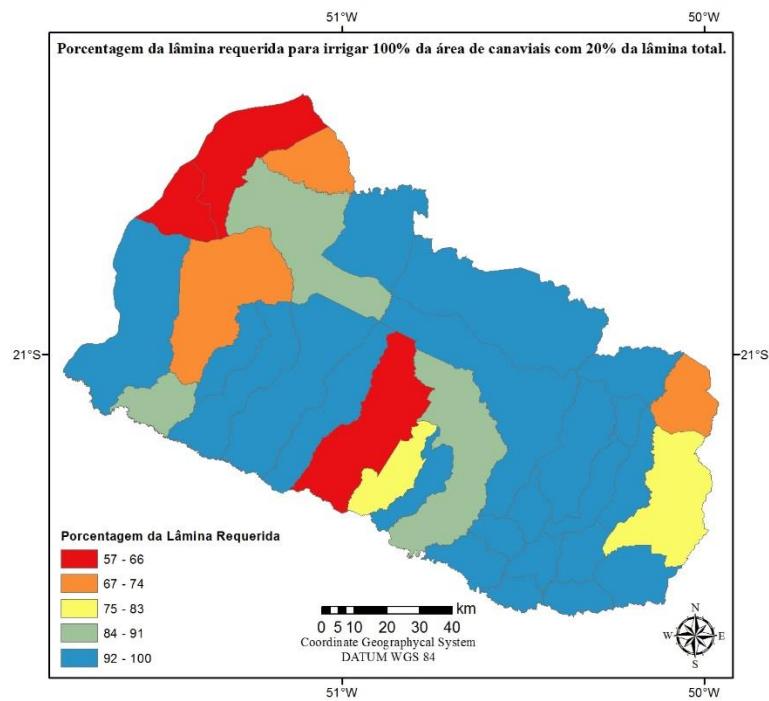


Figura 12- Distribuição da porcentagem de cobertura da lâmina de 20% em relação a necessidade total da cultura.

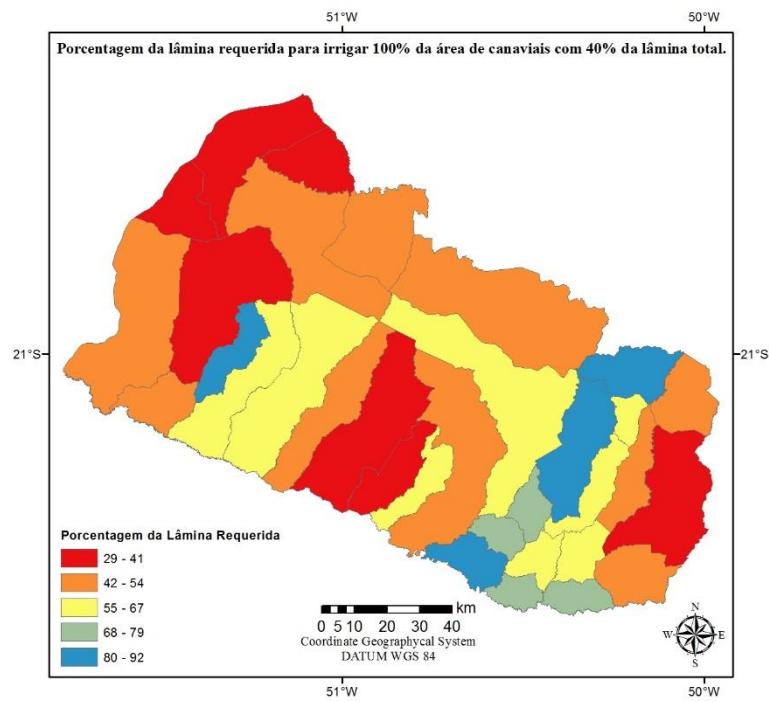


Figura 13- Distribuição da porcentagem de cobertura da lâmina de 40% em relação a necessidade total da cultura.

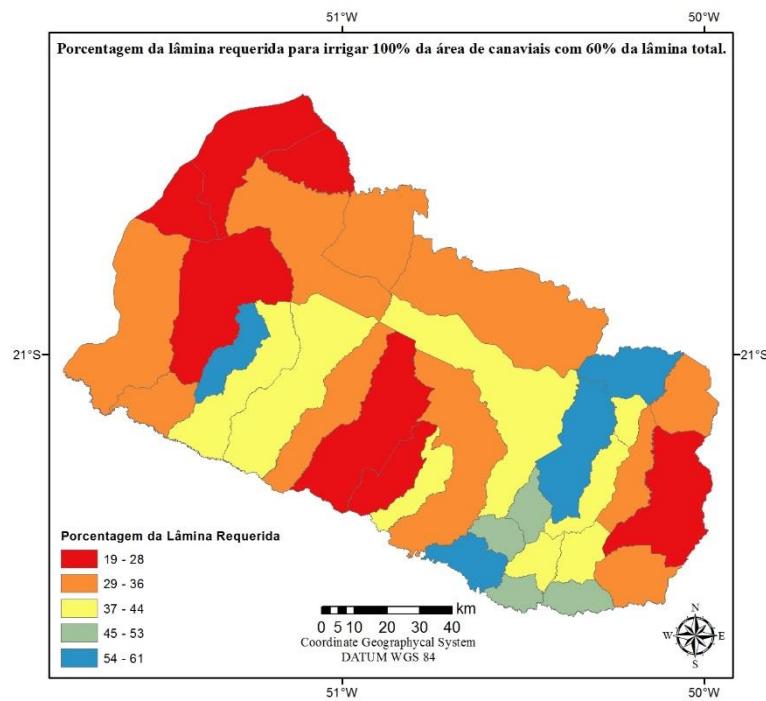


Figura 14 - Distribuição da porcentagem de cobertura da lâmina de 60% em relação a necessidade total da cultura da cana-de-açúcar, na microrregião de Araçatuba, SP.

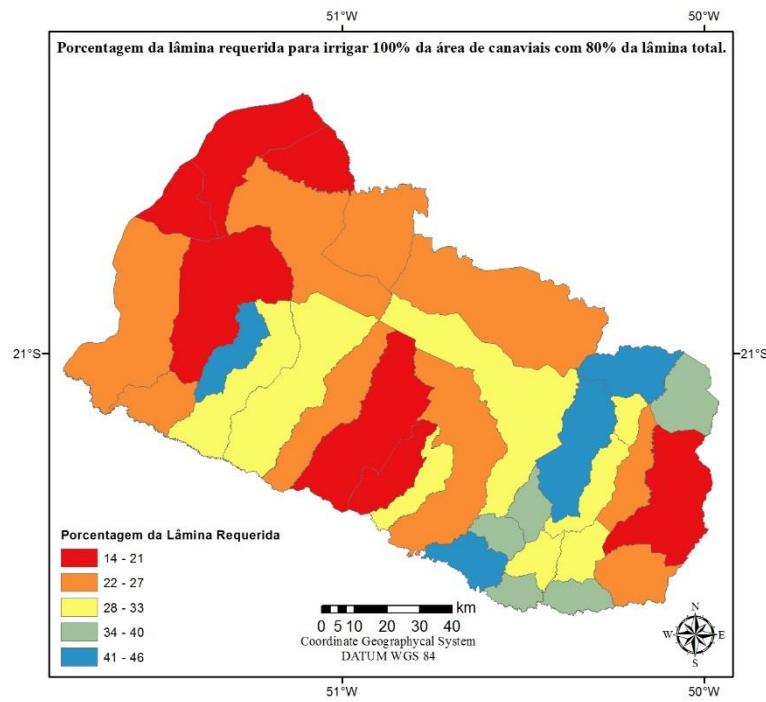


Figura 15 - Distribuição da porcentagem de cobertura da lâmina de 80% em relação a necessidade total da cultura da cana-de-açúcar, na microrregião de Araçatuba, SP.

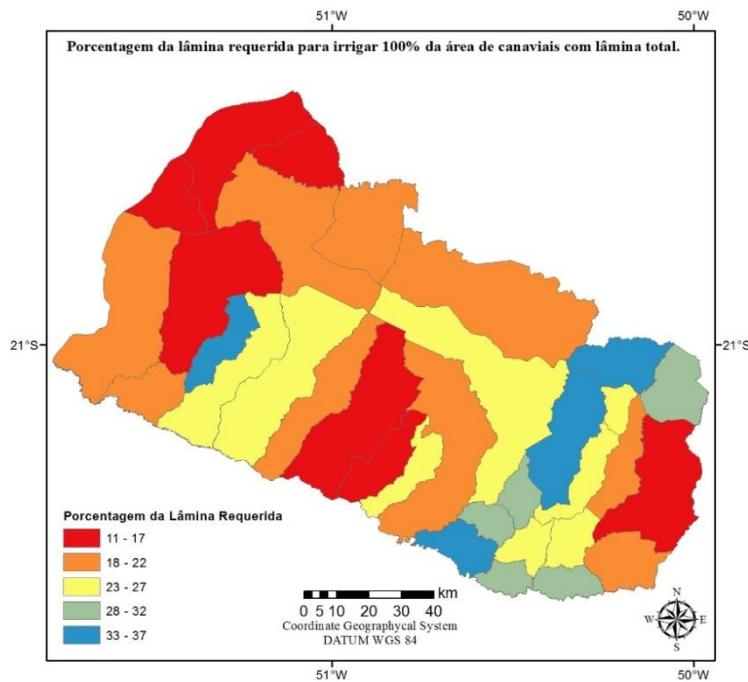


Figura 16 - Distribuição da porcentagem de cobertura da lâmina de 100% em relação a necessidade total da cultura da cana-de-açúcar, na microrregião de Araçatuba, SP.

Tabela 12- Porcentagem de área irrigável da cultura da cana-de-açúcar na microrregião de Araçatuba, SP, de acordo com diferentes níveis de irrigação.

Número	Municípios	Lâmina de Irrigação (%)				
		20	40	60	80	100
		% Área Irrigável				
1	Alto Alegre	100,00	51,23	34,15	25,61	20,49
2	Andradina	70,14	35,07	23,38	17,53	14,03
3	Araçatuba	100,00	59,87	39,91	29,93	23,95
4	Bento De Abreu	79,35	39,67	26,45	19,84	15,87
5	Bilac	100,00	68,73	45,82	34,37	27,49
6	Birigui	100,00	92,13	61,42	46,07	36,85
7	Braúna	100,00	54,12	36,08	27,06	21,65
8	Brejo Alegre	100,00	60,94	40,62	30,47	24,37
9	Buritama	100,00	90,71	60,47	45,35	36,28
10	Castilho	100,00	53,34	35,56	26,67	21,34
11	Clementina	100,00	57,43	38,29	28,72	22,97
12	Coroados	100,00	56,96	37,97	28,48	22,78
13	Gabriel Monteiro	100,00	71,69	47,80	35,85	28,68
14	Glicério	96,47	48,23	32,16	24,12	19,29
15	Guaraçaí	100,00	58,15	38,77	29,07	23,26
16	Guararapes	87,71	43,85	29,24	21,93	17,54
17	Ilha Solteira	57,81	28,91	19,27	14,45	11,56
18	Itapura	57,31	28,65	19,10	14,33	11,46
19	Lavínia	100,00	50,02	33,34	25,01	20,01
20	Luiziânia	100,00	77,43	51,62	38,72	30,97
21	Mirandópolis	100,00	57,01	38,00	28,50	22,80
22	Murutinga Do Sul	100,00	84,48	56,32	42,24	33,79
23	Nova Independência	89,10	44,55	29,70	22,28	17,82
24	Penápolis	81,39	40,70	27,13	20,35	16,28
25	Pereira Barreto	84,42	42,21	28,14	21,11	16,88
26	Piacatu	100,00	90,35	60,23	45,18	36,14
27	Rubiácea	100,00	56,57	37,71	28,28	22,63
28	Santo Antônio Do Aracanguá	100,00	52,33	34,89	26,16	20,93
29	Santópolis Do Aguapeí	100,00	66,93	44,62	33,46	26,77
30	Sud Mennucci	96,70	48,35	32,23	24,18	19,34
31	Suzanápolis	66,64	33,32	22,21	16,66	13,33
32	Valparaíso	61,78	30,89	20,59	15,44	12,36
33	Zacarias	67,03	44,69	33,51	33,51	26,81

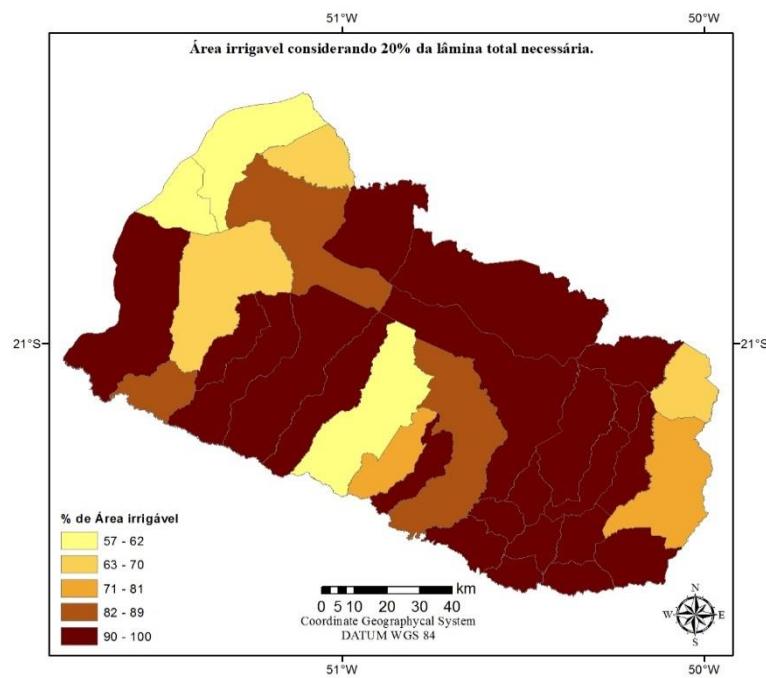


Figura 17 - Porcentagem de área irrigável da cultura da cana-de-açúcar na microrregião de Araçatuba, SP, considerando 20% da lâmina total necessária.

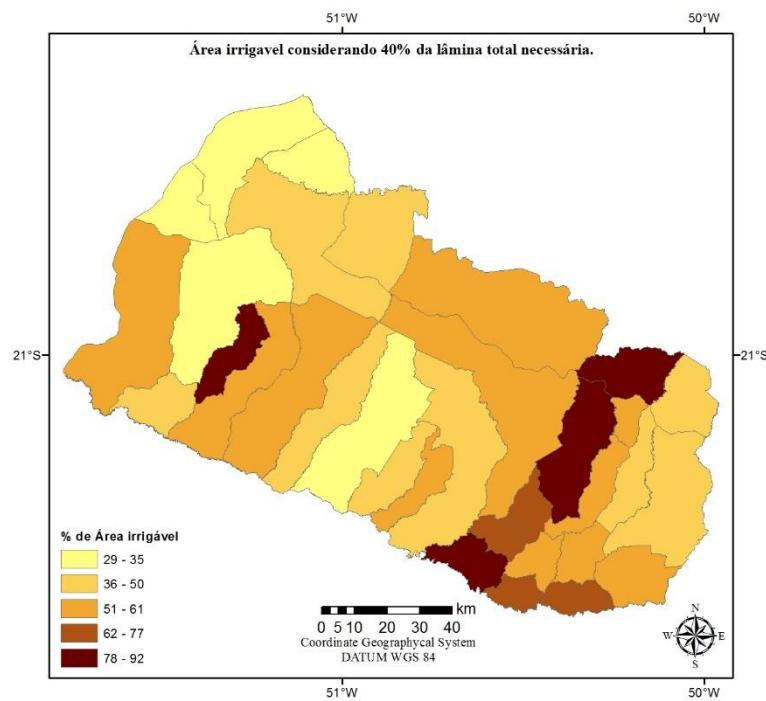


Figura 18 - Porcentagem de área irrigável da cultura da cana-de-açúcar na microrregião de Araçatuba, SP, considerando 40% da lâmina total necessária

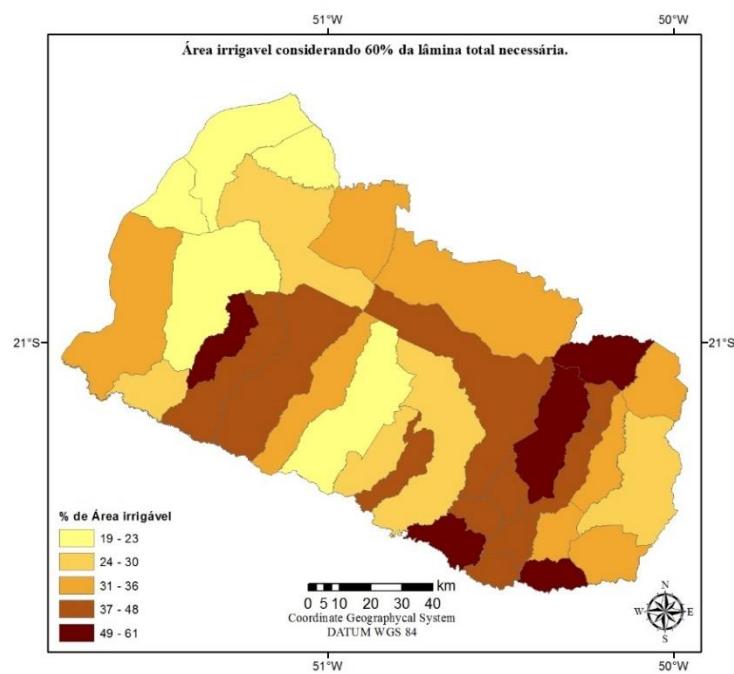


Figura 19 - Porcentagem de área irrigável da cultura da cana-de-açúcar na microrregião de Araçatuba, SP, considerando 60% da lámina total necessária.

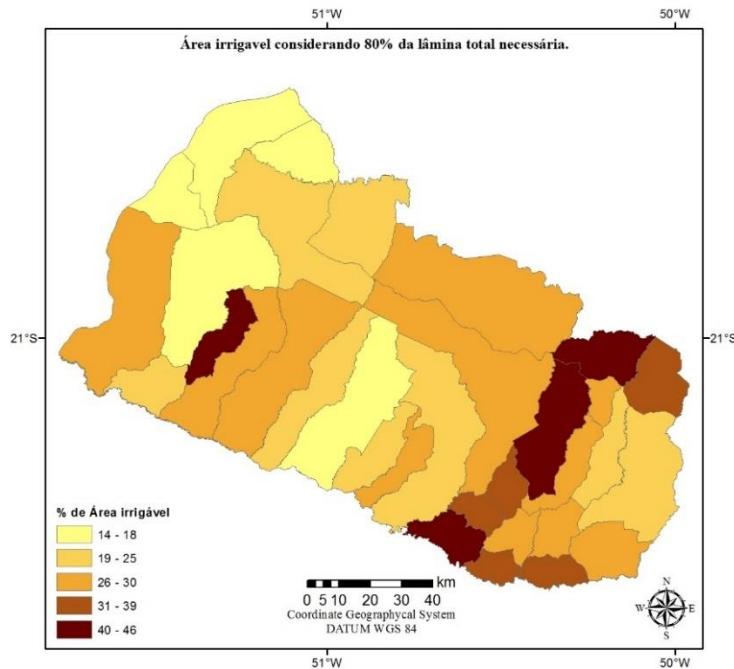


Figura 20 - Porcentagem de área irrigável da cultura da cana-de-açúcar na microrregião de Araçatuba, SP, considerando 80% da lámina total necessária.

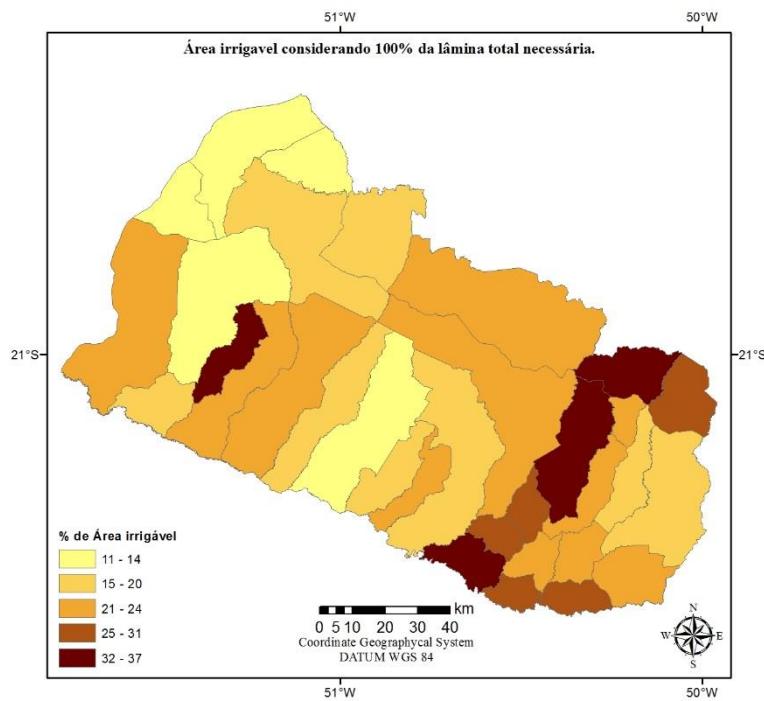


Figura 21 - Porcentagem de área irrigável da cultura da cana-de-açúcar na microrregião de Araçatuba, SP, considerando 100% da lâmina total necessária.

É importante ter em mente que os mapas de % de cobertura da lâmina requerida e % das áreas irrigáveis foram gerados a partir de dados de áreas de cana-de-açúcar da safra de 2013/2014, e possíveis mudanças nesses valores de áreas acarretará em mudanças nos mapas gerados.

## 5. CONCLUSÕES

Como apresentado pelos resultados, a irrigação da cana-de-açúcar na microrregião de Araçatuba-SP é possível apenas considerando parcialmente a lâmina aplicada ou a área a ser irrigada. A metodologia de espacialização geográfica dos dados demonstrou-se eficiente em analisar disponibilidade e necessidade hídrica da cultura na região.

De forma específica conclui-se deste trabalho que:

- a) Através dos dados meteorológicos pode-se identificar o déficit hídrico médio da cultura para todos os municípios, e utilizando os percentis observou-se o comportamento da necessidade hídrica da cultura ao longo da microrregião. Pelos mapas constatou-se a variação do déficit em função da Latitude, Longitude e Altitude. Os maiores valores de déficit hídrico estão localizados na região Noroeste da microrregião de Araçatuba, e os municípios com os menores valores de déficit hídrico estão localizados a Sudoeste da microrregião. Levando em conta a lâmina média requerida (Percentil 50%), o valor médio dos 33 municípios é de 523,03 mm ano<sup>-1</sup>. Esse valor aumenta à medida que nível do percentil aumenta. O município com o menor valor foi Santópolis do Aguapeí (482,36 mm ano<sup>-1</sup>), e o maior valor foi Castilho (533,84 mm ano<sup>-1</sup>). A espacialização dos três primeiros percentis (50, 60 e 75%) resulta na presença de faixas homogêneas ao longo da microrregião, em contrapartida, a espacialização os percentis mais altos (80 e 90%) faz com que essas faixas passem a ser menos evidentes, e um número maior de classes de déficit hídrico é obtido, consequentemente, observa-se um padrão de manchas sobre a região de estudo ao invés das faixas homogêneas.
- b) A disponibilidade hídrica superficial foi analisada através da vazão ecológica  $Q_{7,10}$ , e por meio da técnica de espacialização utilizada no trabalho foi possível calcular a nível de município a disponibilidade hídrica superficial, o volume hídrico disponível foi calculado a partir da quantidade máxima outorgável (50%  $Q_{7,10}$ ). O município com o menor volume hídrico disponível foi Ilha Solteira (58,72 mm ano<sup>-1</sup>) e o município com o maior valor foi Birigui (193,26 mm ano<sup>-1</sup>). Há um padrão na espacialização da  $Q_{7,10}$ , em que a vazão ecológica específica passa a diminuir ao se deslocar para a região Noroeste da microrregião.

c) Através dos mapas de % de Cobertura de Lâmina Requerida e de % de Área Irrigável, conclui-se que não há disponibilidade hídrica para cobrir todo o déficit da cultura na microrregião de Araçatuba-SP. O valor de % máxima de cobertura da lâmina requerida total, considerando 100% da área de cana-de-açúcar, é 36,85%. A mesma interpretação serve para a % de área irrigável, ou seja, a aplicação da lâmina total requerida pode ser realizada em no máximo 36,85% da área de cana-de-açúcar de um dos municípios. Esse município é o de Birigui, SP.

Sendo assim, o presente estudo é uma ferramenta de extrema importância para a tomada de decisão e planejamento do cultivo irrigado de cana-de-açúcar na área estudada. Ressalta-se também que o conhecimento da disponibilidade hídrica e da necessidade hídrica da cultura contribui para o melhor aproveitamento dos recursos hídricos, e assim, para a preservação desse recurso natural essencial para a vida Humana. Por fim, trabalhos aprofundados dessa natureza para outras regiões e outras culturas trariam enorme contribuição para sociedade brasileira.

## **6. REFERÊNCIAS**

- ALLEN, R. G. et al. **FAO Irrigation and Drainage Paper**. 5. ed. Roma: FAO, 1990.
- ALLEN, R. G. . et al. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, v. 81, p. 650–662, 1989.
- ALVES, S.; KATIA, T.; JESUS, R. E. DE. Déficit hídrico e consumo de água para processamento da cana-de- açúcar : o caso da bacia do PCJ ( UGRHI 5 ). p. 7, maio 2014.
- ANA. **Agência Nacional das Águas- Irrigação no Brasil**. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/>>. Acesso em: 25 out. 2016.
- ANA. **Manual de Procedimentos Técnicos e Administrativos de outorga de direito do uso de recursos hídricos da Agência Nacional das Águas**. 3. ed. Brasília: Agência Nacional das Águas, 2013.
- BRASIL. **Política Nacional dos Recursos Hídricos**. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L9433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm)>. Acesso em: 30 out. 2016.
- BULL, T. **THE SUGARCANE PLANT**. Disponível em: <[http://www.sugarresearch.com.au/icms\\_docs/166939\\_Chapter\\_4\\_The\\_Sugarcane\\_Plant.pdf](http://www.sugarresearch.com.au/icms_docs/166939_Chapter_4_The_Sugarcane_Plant.pdf)>. Acesso em: 30 out. 2016.
- CAMARA, G. M. S.; OLIVEIRA, E. A. M. **A produção de cana-de-açúcar**. 1. ed. Piracicaba-SP: FEALQ, 1993.
- CANASAT. **Monitoramento da Cana-de-açúcar**. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/laf/canasat/cultivo.html>>. Acesso em: 10 set. 2016.
- CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira (Cana-de-Açúcar)**. 3. ed. Brasília-DF: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), 2016.
- DAEE. **Departamento de Águas e Energia**. Disponível em: <<http://www.daee.sp.gov.br/>>. Acesso em: 25 out. 2016.
- DIAS, H. B. **Potencial do uso de irrigação da cana-de-açúcar no Brasil**. Tese apresentada para obtenção de título de Mestre. ESALQ, 2016.
- DONZELI, J. .; COSTA, V. . **Impacto da produção de Etanol no balanço hídrico nas regiões de expansão**. Disponível em: <<http://ctbe.cnpem.br/workshop-impacto-producao-etanol-recursos-hidricos-regioes-expansao/>>. Acesso em: 29 out. 2016.
- DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Efeito da água no rendimento das culturas. In: **Estudos FAO: irrigação e drenagem**, 33. Roma: FAO, 1994. p. 212.

- EMBRAPA. Brasil em Relev. Disponível em:  
<<https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/relevobr/download/>>. Acesso em: 10 set. 2016.
- FAUCONNIER, R.; BASSEREAU, D. La canne à sucre. **Collection techniques agricoles et productions tropicales**, v. 1, n. Maisonneuve et Larose, 1970.
- FRIZZONE, J. A.; MATIOLI, C. S.; REZENDE, R. Saccharum spp ., para a região Norte do Estado de São Paulo. **Acta Scientiarum**, v. 23, p. 7, 2001.
- GIFC. **Irrigação em cana-de-açúcar proporciona alta produtividade e longevidade ao canavia**. Disponível em:  
<<http://www.coopercitrus.com.br/?pag=revista&p=materia&codigo=6386>>. Acesso em: 29 out. 2016.
- IAC. **Mapa Pedológico do Estado de São Paulo**. Disponível em:  
<[www.iac.sp.gov.br/solossp](http://www.iac.sp.gov.br/solossp)>. Acesso em: 2 nov. 2016.
- IBGE. **Área Municípios**. Disponível em: <[www.ibge.gov.br/home/geociencias/](http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/)>. Acesso em: 1 nov. 2016.
- 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.
- MAPA. **Plano para Expansão, aprimoramento e Desenvolvimento da Agricultura Irrigada**. Disponível em:  
<[www.agricultura.gov.br/arq\\_editor/file/camaras\\_setoriais/Carne\\_bovina/44RO/DES ENVOLVIMENTO SUSTENTAVEL E AGRICULTURA IRRIGADA - SMC-MAPA.pdf](http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/camaras_setoriais/Carne_bovina/44RO/DES ENVOLVIMENTO SUSTENTAVEL E AGRICULTURA IRRIGADA - SMC-MAPA.pdf)>. Acesso em: 29 out. 2016.
- MARIN, F. R. et al. Cana-de-açúcar. In: **Agrometeorologia dos Cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. 1. ed. Brasília: Instituto Nacional de Meteorologia; Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento., 2009. p. 109–130.
- MARIN, F. R. **Relação entre cultura e clima**. Disponível em:  
<[www.agencia.cnptia.embrapa.br/](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/)>. Acesso em: 26 out. 2016.
- MONTEIRO, L. A.. **Modelagem agrometeorológica como base para a definição de ambientes de produção para a cultura da cana-de-açúcar no Estado de São Paulo**. Tese apresentada para obtenção de título de Mestre. Escolha Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2012.
- MONTEITH, J. L. **Principle of Environments Physics**. 1. ed. New York: Elsevier, 1973.

- NITSCH, M. O programa de biocombustíveis Proalcool no contexto da estratégia energética brasileira. **Revista de Economia Política**, v. 11, p. 16, 1991.
- NOVACANA. **Aspectos do Plantio de cana-de-açúcar**. Disponível em: <<https://www.novacana.com>>. Acesso em: 26 out. 2016.
- PECEGE. **Custos de Produção de cana-de-açúcar, açúcar, etanol e bioeletroicidade no Brasil**. 9. ed. Piracicaba-SP: PECEGE, 2016.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Meteorologia Agrícola**. 1. ed. Piracicaba: ESALQ, 2007.
- PEREIRA, R. M. et al. Viabilidade econômica da irrigação de cana-de-açúcar no cerrado Brasileiro. **Irriga**, v. 1, n. 2, p. 149–157, 2015.
- PERES, J. G. **Determinação dos Coeficientes de cultura (Kc): ciclo de cana soca**. [s.l.] Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz-ESALQ, 1988.
- PRADO, H. DO. **Pedologia Fácil- Aplicações em Solos Tropicais**. 4. ed. Piracicaba: Fundag-Fundação de Apoio a Pesquisa., 2013.
- RAO, P.; VERED, E. **Cana-de-açúcar: Clima**. Disponível em: <[www.sugarcaneplants.com/p](http://www.sugarcaneplants.com/p)>. Acesso em: 28 out. 2016.
- RFA. **World Fuel Ethanol Production**. Disponível em: <<http://ethanolrfa.org>>. Acesso em: 25 out. 2016.
- SAMPAIO, S.; CORRÊA, M.; BÔAS, V. Effective rainfall study in the municipality of Lavras, MG. **Revista Brasileira de ...**, p. 210–213, 2000.
- SCARPARI, M. S.; BEAUCLAIR, E. G. F. Sugarcane maturity estimation through edaphic-climatic parameters. **Scientia Agricola**, v. 61, n. 5, p. 486–491, 2004.
- SCHMIDIT, W. **Agricultura irrigada e o licenciamento ambiental**. Tese apresentada para obtenção de título de Doutor. ESALQ- Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2007.
- SILVA, M. D. A; ARANTES, M. T.; RHEIN, A. F. D. L. Potencial produtivo da cana-de-açúcar sob irrigação por gotejamento em função de variedades e ciclos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 3, p. 241–249, 2014.
- SILVA, T. G. F. DA; MOURA, M. S. B. DE; ZOLNIER, S. Water requirement and crop coefficient of irrigated sugarcane in a semi-arid region. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 1, p. 64–71, 2012.

- SOUZA, A. P.; GASPAR, M.; SILVA, E. A.; ULIAN, E. C . W.; A. J.; NISHIYAMA JR., M. Y.; SANTOS, R. V.; TEIXEIRA, M. M. ; SOUZA, G. M.; BUCKERIDGE, M. S. Elevated CO<sub>2</sub> increases photosynthesis, biomass and productivity, and modifies gene expression in sugarcane. **Plant, Cell & Environment**, v. 31, p. 1116–1127, 2008.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2006.
- THORNTHWAITE, C. W. .; MATHER, J. R. **The water balance**. 1. ed. New Jersey: Drexel Institution of Technology, 1995.
- UDOP. **A História da Cana-de-açúcar - Da Antiguidade aos Dias Atuais**. Disponível em: <<http://www.udop.com.br/>>. Acesso em: 25 out. 2016.
- USDA. **Sugar : World Markets and Trade Global Sugar Consumption To Again Outpace Production , Draw Inventories Lower in 2016 / 17**. [s.l: s.n.].
- WILKINSON, J. **O setor sucroalcooleiro brasileiro na atual conjuntura nacional e internacional**. Rio de Janeiro: [s.n.].
- WOLFF, W. **Avaliação e nova proposta de regionalização hidrológica para o estado de São Paulo**. Tese apresentada para obtenção de título de Mestre. ESALQ- Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz., 2013.
- WOLFF, W. **Regionalização de Vazões**. Disponível em: <<http://www.leb.esalq.usp.br/wolff/rv/>>. Acesso em: 10 out. 2016.
- XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, v. 2659, n. October 2015, p. 2644–2659, 2015.
- XAVIER, M. A. et al. **Sistema de Multiplicação MPB e integração com o setor sucroenergético**. Ribeirão Preto: 2014