

LARISSA CAROLINA CORRAIDE DA SILVA

**CAPTAÇÃO DE ÁGUA DA ATMOSFERA – ANÁLISE DO POTENCIAL  
BRASILEIRO E DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2018

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

S586c  
2018  
Silva, Larissa Carolina Corraide da, 1991-  
Captação de água da atmosfera – análise do potencial  
brasileiro e desenvolvimento de protótipos / Larissa Carolina  
Corraide da Silva. – Viçosa, MG, 2018.  
xix, 156 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndice.

Orientador: Delly Oliveira Filho.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Água. 2. Orvalho- Captação. 3. Condensadores (Vapor).  
4. Vapor d'água. I. Universidade Federal de Viçosa.  
Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.


CDD 22. ed. 628.13

LARISSA CAROLINA CORRAIDE DA SILVA

**CAPTAÇÃO DE ÁGUA DA ATMOSFERA – ANÁLISE DO POTENCIAL  
BRASILEIRO E DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPOS**


Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

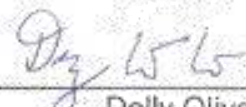
APROVADA: 19 de dezembro de 2018.

  
\_\_\_\_\_  
Joyce Correna Carlo

  
\_\_\_\_\_  
Natalia dos Santos Renato

  
\_\_\_\_\_  
Sérgio Zolnier

  
\_\_\_\_\_  
Paulo Marcos de Barros Monteiro  
(Coorientador)

  
\_\_\_\_\_  
Delly Oliveira Filho  
(Orientador)

*À minha mãe, ao meu pai (in memoriam), à vovó Lia (in memoriam), à minha irmã,  
e ao meu marido.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida.

Agradeço a minha mãe, minha guerreira, que esteve comigo em todos os momentos, me apoiando, me ajudando e entendendo cada momento da minha ausência. Agradeço também ao meu pai (*in memoriam*) pelos ensinamentos e por ter se tornado uma fonte de inspiração para mim. Agradeço a minha irmã, Lailla, por ser meu exemplo, por sempre me ajudar e por acreditar em mim. À minha família, especialmente ao meu tio Moacir, Regina e Marco Túlio, por sempre me receberem com um sorriso no rosto a cada visita, me dando mais força para continuar.

Ao meu marido, Matheus, por todo o amor, companheirismo, incentivo e ajuda ao longo do desenvolvimento desta pesquisa com seus sábios conhecimentos. Obrigada pela paciência, por ter acreditado em mim, me ensinado e pela parceria nos trabalhos desenvolvidos.

Ao meu orientador, Professor Delly Oliveira Filho, pela oportunidade, por ter confiado em meu trabalho, e pela experiente orientação.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola por proporcionar condições para o desenvolvimento desse trabalho.

À CAPES, pelo financiamento da pesquisa.

Aos meus colegas de laboratório, especialmente o Arthur, Patrícia e Pedro, pela parceria nas pesquisas, pelo ambiente de trabalho e pela ajuda na realização dos experimentos. Agradeço também ao Darlon pelo apoio durante essa pesquisa, por sempre estar disponível para tirar todas as minhas dúvidas e até mesmo, pela companhia na volta para casa.

Agradeço também aos meus amigos e a todos os outros que me ajudaram ao longo da minha caminhada até aqui, aos que contribuíram com o desenvolvimento da minha pesquisa ou que pelo simples bom dia diário contribuíam para um ótimo ambiente de trabalho. Meu muito obrigada!

## BIOGRAFIA

**Larissa Carolina Corraide da Silva**, filha de José Antônio da Silva e Mirtes Maria Corraide da Silva, nasceu em Itabirito, Minas Gerais.

Em 2007, iniciou o curso técnico de informática industrial com ênfase em automação concomitante ao ensino médio no Centro de Educação Tecnológica de Minas Gerais- CET/CEFET - Itabirito, sendo diplomada em dezembro de 2009.

Em agosto de 2010, iniciou a graduação em Engenharia de Controle e Automação na Universidade Federal de Ouro Preto. Participou do programa Ciências sem Fronteiras durante o período de agosto de 2013 e dezembro de 2014 nos Estados Unidos da América. Durante o segundo semestre de 2013 estudou inglês na *State University of New York – Nassal Community College*. Já durante o ano de 2014, cursou disciplinas acadêmicas relacionada a graduação na *Arizona State University*. Em março de 2015, iniciou estágio na Fundação Gorceix, Ouro Preto, Minas Gerais, na área de desenvolvimento e pesquisa voltada para desenvolvimento de softwares em C# e programação de microcontroladores. Em agosto de 2016, graduou-se em Engenharia de Controle e Automação pela Universidade Federal de Ouro Preto.

Cursou disciplinas isoladas no programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais durante o segundo semestre de 2016.

Em março de 2017, iniciou o mestrado acadêmico em Engenharia Agrícola com concentração em Energia na Agricultura no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, defendendo a dissertação em dezembro de 2018.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE QUADROS .....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>xi</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS .....</b>	<b>xv</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>xvi</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xviii</b>
<b>Capítulo 1: Considerações iniciais.....</b>	<b>1</b>
1.1 Introdução Geral .....	1
1.2 Objetivos .....	3
1.2.1 Objetivo geral.....	3
1.2.2 Objetivos específicos .....	3
1.3 Estrutura da dissertação .....	4
1.4 Limitações da pesquisa.....	4
1.5 Contribuições da pesquisa .....	5
1.6 Referências bibliográficas .....	5
<b>Capítulo 2: Estado da arte da captação de água do ar atmosférico.....</b>	<b>7</b>
2.1 Introdução .....	7
2.2 Objetivos .....	8
2.3 Metodologia.....	8
2.4 Nevoeiro.....	8
2.5 O orvalho e as características ambientais.....	10
2.5.1 Formação de orvalho .....	13
2.5.2 Interação com o ecossistema.....	15
2.5.3 Uso para irrigação .....	15
2.6 Tecnologias para captação de água atmosférica.....	18

2.6.1 Resfriamento radiativo passivo .....	18
2.6.2 Tecnologias com elementos ativos .....	27
2.6.3 Sistemas de captação utilizando materiais porosos.....	31
2.7 Conclusões .....	32
2.8 Referências bibliográficas .....	33
<b>Capítulo 3: Estimativa da captação de orvalho por meio de resfriamento radiativo passivo e avaliação do seu potencial para uso na agricultura .....</b>	<b>40</b>
3.1 Introdução .....	40
3.2 Objetivos .....	42
3.3 Metodologia.....	42
3.3.1 Local de estudo.....	42
3.3.2 Análise variáveis meteorológicas .....	43
3.3.3 Estimativa do potencial de orvalho.....	45
3.3.4 Potencial de orvalho para uso na irrigação .....	47
3.4 Resultados e discussão .....	52
3.4.1 Análise de variáveis meteorológicas .....	52
3.4.2 Potencial de captação de orvalho .....	63
3.4.3 Potencial de orvalho para irrigação .....	66
3.5 Conclusões .....	68
3.6 Referências bibliográficas .....	69
<b>Capítulo 4: Mapeamento do potencial de orvalho no Brasil .....</b>	<b>72</b>
4.1 Introdução .....	72
4.2 Objetivos .....	73
4.2.1 Objetivo específicos .....	73
4.3 Metodologia.....	73
4.3.1 Métricas de mapeamento.....	76

4.3.2 Mapa interativo.....	80
4.4 Resultados e discussão .....	81
4.4.1 Mapeamento do resfriamento necessário para condensação do vapor de água.....	81
4.4.2 Mapeamento razão de mistura.....	84
4.4.3 Mapeamento disponibilidade hídrica .....	86
4.4.4 Mapeamento da energia necessária para a condensação do vapor de água.....	88
4.4.5 Mapeamento estimativa de rendimento de orvalho.....	90
4.4.6 Mapa iterativo.....	92
4.5 Conclusões .....	96
4.6 Referências bibliográficas .....	96
<b>Capítulo 5: Captação de orvalho via resfriamento radiativo passivo .....</b>	<b>98</b>
5.1 Introdução .....	98
5.2 Objetivos .....	99
5.2.1 Objetivos específicos .....	99
5.3 Metodologia .....	100
5.3.1 Condensadores de água de orvalho .....	100
5.3.2 Validação de modelo .....	104
5.4 Resultados e Discussão .....	107
5.4.1 Variáveis Meteorológicas .....	107
5.4.2 Dias com presença de orvalho.....	108
5.4.3 Rendimento de água coletada .....	110
5.4.4 Comparação das superfícies condensadoras .....	115
5.4.5 Validação do modelo de rendimento de orvalho .....	115
5.5 Conclusões .....	120

5.6 Referências bibliográficas .....	121
<b>Capítulo 6: Condensador de vapor de água utilizando módulos termoelétricos.....</b>	<b>124</b>
6.1 Introdução .....	124
6.2 Objetivos .....	126
6.3 Materiais e Método.....	126
6.3.1 Módulo termoelétrico.....	126
6.3.2 Velocidade do fluxo de ar .....	129
6.3.3 Sistema de condensação experimental.....	129
6.3.4 Sistema automático para captação de água e aquisição de dados .....	134
6.4 Resultados e discussão .....	135
6.4.1 Análise do módulo termoelétrico.....	135
6.4.2 Fluxo de ar no sistema condensador .....	138
6.4.3 Sistema automático do condensador de vapor de água .....	139
6.5 Conclusões .....	150
6.6 Referências bibliográficas .....	151
<b>Capítulo 7: Conclusão Geral.....</b>	<b>154</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>156</b>
APÊNDICE A – Registro do Software <i>PsyCalculator</i> .....	156

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 2.1:</b> Resumo de alguns estudos utilizando condensadores planares, com resfriamento radiativo passivo .....	23
<b>Quadro 3.1:</b> Conversão de nebulosidade de decimal para oktas.....	46
<b>Quadro 3.2:</b> Desvio padrão da temperatura média mensal do ar ambiente, da temperatura média mensal de ponto de orvalho, da umidade relativa média mensal do ar e da velocidade média mensal do vento entre 23 horas e 06 horas para o período de 2006 a 2017 para Viçosa, MG ..	61
<b>Quadro 4.1:</b> Resfriamento médio do ar para condensação e umidade relativa média para os estados brasileiros entre 23 horas e 06 horas no período de maio de 2017 até maio de 2018 .....	83
<b>Quadro 4.2:</b> Razão de mistura média para os estados brasileiros entre 23 horas e 06 horas no período de maio de 2017 até maio de 2018 .....	85
<b>Quadro 4.3:</b> Disponibilidade hídrica média e velocidade do vento média a 10 m de altitude para os estados brasileiros entre 23 horas e 06 horas no período de maio de 2017 até maio de 2018 .....	88
<b>Quadro 4.4:</b> Demanda de energia média para a condensação para os estados brasileiros entre 23 horas e 06 horas no período de maio de 2017 até maio de 2018.....	90
<b>Quadro 4.5:</b> Estimativa de produção de orvalho média sob céu limpo para os estados brasileiros entre 23 horas e 06 horas no período de maio de 2017 até maio de 2018 .....	92
<b>Quadro 5.2:</b> Variáveis meteorológicas médias noturnas para a cidade de Viçosa durante os períodos de experimentos, i. e. durante o período de 21 de agosto de 2018 a 21 de setembro de 2018 ( no inverno) e de 22 de setembro a 23 de outubro de 2018 (na primavera) .....	108
<b>Quadro 5.3:</b> Resultados da análise estatística teste – t com nível de significância de 5% (OPUR e plástico preto, OPUR e alumínio anodizado, OPUR e fita adesiva de polipropileno, OPUR e plástico polipropileno (celofane) .....	114
<b>Quadro 6.1:</b> Especificações de desempenho do módulo.....	127

<b>Quadro 6.2:</b> Estimativa do custo médio do litro de água condensada (R\$) em função da tensão de alimentação do módulo e faixa de umidade relativa média .....	147
<b>Quadro 6.3:</b> Coeficiente de extração de água médio (%) em função da tensão de alimentação do módulo e faixa de umidade relativa média .....	149
<b>Quadro 6.4:</b> Coeficiente de performance médio do módulo (%) em função da tensão de alimentação do módulo e faixa de umidade relativa .....	150

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1:</b> Distribuição dos recursos hídricos no mundo. ....	1
<b>Figura 2.1:</b> Captação de água de nevoeiro utilizando telas na Espanha. ....	9
<b>Figura 2.2:</b> Influência da nebulosidade no processo de resfriamento radiativo passivo. ....	12
<b>Figura 2.3:</b> Processo de formação do orvalho.....	13
<b>Figura 2.4:</b> Condições de molhabilidade de acordo com o ângulo de contato. ....	14
<b>Figura 2.5:</b> Sistema para irrigação com o uso de superfícies condensadoras.....	16
<b>Figura 2.6:</b> Projeto da Warka Water desenvolvido para captação de nevoeiro, orvalho e água de chuva. ....	19
<b>Figura 2.7:</b> Exemplo de superfície condensadora comumente utilizada para captação de orvalho. ....	20
<b>Figura 3.1:</b> Localização do campus e da estação meteorológica da UFV. ....	43
<b>Figura 3.2:</b> Diferenças entre a temperatura média mensal do ar ambiente e a temperatura média mensal do ponto de orvalho entre 23 horas e 06 horas para o período de 2006 a 2017 para Viçosa, MG. ....	54
<b>Figura 3.3:</b> Umidade relativa do ar média mensal entre 23 horas e 06 horas para o período de 2006 a 2017 para Viçosa, MG. ....	54
<b>Figura 3.4:</b> Velocidade média mensal do vento à 10 metros de elevação entre 23 horas e 06 horas para o período de 2006 a 2017 para Viçosa, MG. .	55
<b>Figura 3.5:</b> Rosa dos ventos mensal para a cidade de Viçosa (Janeiro a Junho) entre 23 horas e 06 horas para o período de 2006 a 2017 para Viçosa, MG.....	56
<b>Figura 3.6:</b> Rosa dos ventos mensal para a cidade de Viçosa (Julho a Dezembro) entre 23 horas e 06 horas para o período de 2006 a 2017 para Viçosa, MG.....	57
<b>Figura 3.7:</b> Diferença da temperatura média de ponto de orvalho e temperatura do ar ambiente média ao longo do dia (A) verão e (B) outono para o período de 2006 a 2017 para Viçosa, MG. ....	59

<b>Figura 3.8:</b> Diferença da temperatura de ponto de orvalho média e temperatura do ar ambiente média ao longo do dia (C) inverno e (D) primavera para o período de 2006 a 2017 para Viçosa, MG. ....	60
<b>Figura 3.9:</b> Mapeamento do rendimento de orvalho mensal (mm) na região do mar mediterrâneo para o mês de outubro.....	65
<b>Figura 4.1:</b> Mapeamento do resfriamento médio do ar necessário para condensação do vapor de água no território brasileiro entre 23 horas e 06 horas no período de maio de 2017 até maio de 2018. ....	81
<b>Figura 4.2:</b> Mapeamento da umidade relativa média do ar no território brasileiro entre 23 horas e 06 horas no período de maio de 2017 até maio de 2018.....	82
<b>Figura 4.3:</b> Mapeamento da razão de mistura média do ar no território brasileiro entre 23 horas e 06 horas no período de maio de 2017 até maio de 2018.....	84
<b>Figura 4.4:</b> Mapeamento da disponibilidade hídrica no território brasileiro entre 23 horas e 06 horas no período de maio de 2017 até maio de 2018. ....	86
<b>Figura 4.5:</b> Mapeamento do fluxo de calor para condensação do vapor de água no território brasileiro entre 23 horas e 06 horas no período de maio de 2017 até maio de 2018. ....	89
<b>Figura 4.6:</b> Mapeamento da produção de orvalho média em condição de céu limpo no território brasileiro entre 23 horas e 06 horas no período de maio de 2017 até maio de 2018. ....	91
<b>Figura 4.7:</b> Visão geral do mapa interativo desenvolvido mostrando a localização das 418 estação meteorológica analisadas no território brasileiro. ...	94
<b>Figura 4.8:</b> Mapeamento dos parâmetros analisados para cada uma das 418 estação meteorológica ao longo do território Brasileiro no mapa interativo. ....	95
<b>Figura 5.1:</b> Estrutura de captação de orvalho, cotação em cm. ....	101
<b>Figura 5.2:</b> Condensadores de orvalho instalados no local do experimento (A): Plástico OPUR, (B): Plástico preto, (C): Alumínio anodizado, (D): plástico polipropileno tipo celofane e (E): fita adesiva de empacotamento. ....	101

<b>Figura 5.3:</b> Sistema de coleta do vapor de água condensado utilizado no experimento.....	103
<b>Figura 5.4:</b> Formação de orvalho na superfície condensadora plástico preto.....	110
<b>Figura 5.5:</b> Quantidade de água de orvalho e de chuva coletada no período de inverno estudado para as superfícies condensadoras estudadas em Viçosa, MG.....	110
<b>Figura 5.6:</b> Quantidade de água de orvalho e de chuva coletada no período estudado de primavera para as superfícies condensadoras estudadas em Viçosa, MG.....	111
<b>Figura 5.7:</b> Relação entre os valores acumulados estimados e os valores acumulados medidos experimentalmente para o plástico preto. ....	116
<b>Figura 5.8:</b> Relação entre os valores acumulados estimados e os valores acumulados medidos experimentalmente para o plástico tipo polipropileno (celofane). ....	117
<b>Figura 5.9:</b> Relação entre os valores acumulados estimados e os valores acumulados medidos experimentalmente para o plástico OPUR....	117
<b>Figura 5.10:</b> Relação entre os valores acumulados estimados e os valores acumulados medidos experimentalmente para a fita adesiva de polipropileno. ....	118
<b>Figura 5.11:</b> Relação entre os valores acumulados estimados e os valores acumulados medidos experimentalmente para o alumínio anodizado. ....	118
<b>Figura 5.12:</b> Proximidade da área de experimento com a lagoa.....	119
<b>Figura 6.1:</b> Componentes do módulo termoelétrico. ....	125
<b>Figura 6.2:</b> Montagem com o módulo Peltier, dissipador de calor e ventoinha...	128
<b>Figura 6.3:</b> Sistema condensador, (a) módulos termoelétricos, (b) dissipador de calor, (c) ventoinha para dissipar o calor, (d) ventoinha para renovação do ar, (e) pluviômetro de báscula. ....	130
<b>Figura 6.4:</b> Esquema de funcionamento do sistema automático para captação de água e aquisição de dados.....	134
<b>Figura 6.5:</b> Esquema de acionamento do cooler responsável pelo fluxo de ar. ...	135

<b>Figura 6.6:</b> Relação entre corrente versus tensão do módulo termoeletrico utilizado nesta pesquisa. ....	136
<b>Figura 6.7:</b> Relação entre temperatura da superfície fria versus tensão no módulo termoeletrico utilizado neste estudo. ....	137
<b>Figura 6.8:</b> Imagem termográfica do módulo termoeletrico alimentado em 8 V. .	138
<b>Figura 6.9:</b> Relação entre o fluxo de ar e a tensão da ventoinha.....	138
<b>Figura 6.10:</b> Fluxograma do funcionamento do programa desenvolvido no Arduino. ....	139
<b>Figura 6.11:</b> Tela de configuração da comunicação serial do software de aquisição de dados e a plataforma Arduino.....	140
<b>Figura 6.12:</b> Fluxograma do funcionamento do software supervisorio desenvolvido. ....	141
<b>Figura 6.13:</b> Tela principal do programa supervisorio desenvolvido. ....	142
<b>Figura 6.14:</b> Quantidade de água condensada coletada em função da tensão de alimentação do módulo termoeletrico: (A) 8 V (B) 6V e (C) 4 V. ....	143
<b>Figura 6.15:</b> Consumo do sistema para condensação de água em função da alimentação do módulo termoeletrico (A) 8 V (B) 6V e (C) 4 V. ....	146

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

°C - Graus Celsius;

Ah – Ampere-hora;

ANA – Agencia Nacional de Águas;

COP – Coeficiente de *performance*;

DEA - Departamento de Engenharia Agrícola;

ETc - Evapotranspiração da cultura;

ETo - Evapotranspiração de referência;

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia;

Kc - Coeficiente da cultura;

MMA - Ministério do Meio Ambiente;

MOF - *Metal-Organic framework*;

OPUR - *International Organization for Dew Utilization*;

PET - Polietileno Tereftalato;

UFV- Universidade Federal de Viçosa;

WWAP - *World Water Assessment Programme*;

## RESUMO

SILVA, Larissa Carolina Corraide da, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2018. **Captação de água da atmosfera – análise do potencial brasileiro e desenvolvimento de protótipos.** Orientador: Delly Oliveira Filho. Coorientadores: Paulo Marcos de Barros Monteiro e Hewlley Maria Acioli Imbuzeiro.

A água é elemento indispensável para a vida na Terra. Porém, a má distribuição dos recursos hídricos juntamente com o crescimento da demanda hídrica contribuem para a escassez de água em diversas regiões. Diante destas circunstâncias, torna-se necessário o estudo de fontes complementares de água. A condensação do vapor de água presente no ar atmosférico tem uma grande importância de estudo, uma vez que a atmosfera possui uma quantidade de água comparável com toda a água doce superficial e subterrânea, excluindo geleiras. Cerca de 98% dos 13.000 km<sup>3</sup> de água doce são vapor de água. Assim, essa dissertação estuda os diferentes métodos utilizados para a captação de água do ar atmosférico, assim como apresenta (i) uma revisão do potencial de aproveitamento água da atmosfera como uma fonte suplementar para consumo doméstico e/ou irrigação, (ii) estimativa do rendimento de orvalho e análise do potencial de captação para utilização na agricultura, (iii) mapeamento do potencial captação de orvalho no território brasileiro, (iv) análise do rendimento de orvalho utilizando protótipos com plásticos e chapas metálicas como superfícies condensadoras para captação de orvalho por meio do resfriamento radiativo passivo, bem como o uso de módulos termoelétricos como superfície condensadora para a cidade de Viçosa- MG. Observou-se diferentes tecnologias utilizadas em diversos países do mundo, como: o resfriamento passivo, módulos termoelétricos, sistemas de climatização, uso de materiais porosos, uso de gelo e de refrigeradores como superfícies condensadoras. A estimativa de rendimento anual de orvalho para a cidade de Viçosa com média anual noturna de temperatura e de umidade relativa do ar de cerca de 16,36 °C e 92,73% respectivamente, foi de cerca de 47,18 mm. Comparando-se as estimativas de rendimento de água da atmosfera de todas as microrregiões dos estados do Brasil, observou-se que o estado que apresentou o maior potencial para captação de orvalho foi o estado do Amapá, provavelmente a

sua maior quantidade de vapor de água na atmosfera deve ter influenciado neste resultado. Sobre o experimento de rendimento de orvalho por meio do resfriamento radiativo, observou-se uma média diária de orvalho para o plástico padrão OPUR de 0,151 mm/dia, 0,127 mm/dia para o plástico preto, 0,046 mm/dia para o alumínio anodizado, 0,140 mm/dia para a fita adesiva e 0,135 mm/dia para o plástico de polipropileno (celofane). Finalmente para o experimento ativo usando módulos termoelétricos, nota-se que a maior quantidade de água que poderia ser coletada foi de cerca de 2,04 L/m<sup>2</sup>/h com um consumo de cerca de 7,20 kWh. Assim, a captação de água presente na atmosfera se mostrou ser uma fonte viável, que embora seja coletada em pequena quantidade, pode ser essencial para complementar os recursos hídricos durante períodos prolongados de seca, podendo ser utilizada para irrigação, dessedentação animal e/ou consumo humano.

## ABSTRACT

SILVA, Larissa Carolina Corraide da, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2018. **Atmospheric water harvesting - Brazilian potential analysis and prototypes development.** Advisor: Delly Oliveira Filho. Co-advisors: Paulo Marcos de Barros Monteiro and Hewlley Maria Acioli Imbuzeiro.

Water is an indispensable element for life on Earth. However, the uneven distribution of water resources and the growth of water demand contribute to water scarcity in several regions. Given these circumstances, it is necessary to study complementary sources of water. The water vapor condensation has a high importance for study since the atmosphere has an amount of water comparable to all surface freshwater and groundwater, excluding glaciers. About 98% of the 13,000 km<sup>3</sup> of freshwater is water vapor. Thus, this dissertation studies the different methods used to harvest water from air. In addition, it presents (i) a review of the water harvesting from atmosphere potential as an additional source for domestic consumption and/or irrigation; (ii) estimation of dew yield and analysis of its potential for use in agriculture; (iii) mapping dew harvesting potential in the Brazilian territory; (iv) analysis of dew yield using prototypes with plastics and metal sheets as condenser surfaces using passive radiative cooling, as well as the use of thermoelectric modules as a condensing surface for the city of Viçosa-MG. It was observed that different technologies were used in several countries of the world, including: passive cooling, thermoelectric modules, air conditioning systems, porous materials, ice and refrigerators as condensing surfaces. The estimated annual dew yield for Viçosa, with annual average temperature and relative humidity of about 16.36 °C and 92.73 %, respectively, was about 47.18 mm. Comparing the atmospheric water yield estimated for the microregions of the Brazilian states, it was observed that the state that presented the greatest potential for dew harvest was the state of Amapá, probably its highest amount of water vapor in the atmosphere should have significantly influenced this result. A dew yield for the OPUR plastic of 0.151 mm, 0.127 for the black plastic, 0.046 mm for the anodized aluminum, 0.140 for the adhesive tape and 0.135 for polypropylene plastic (cellophane) was observed on the radiative cooling experiment. Finally, for the active experiment using thermoelectric

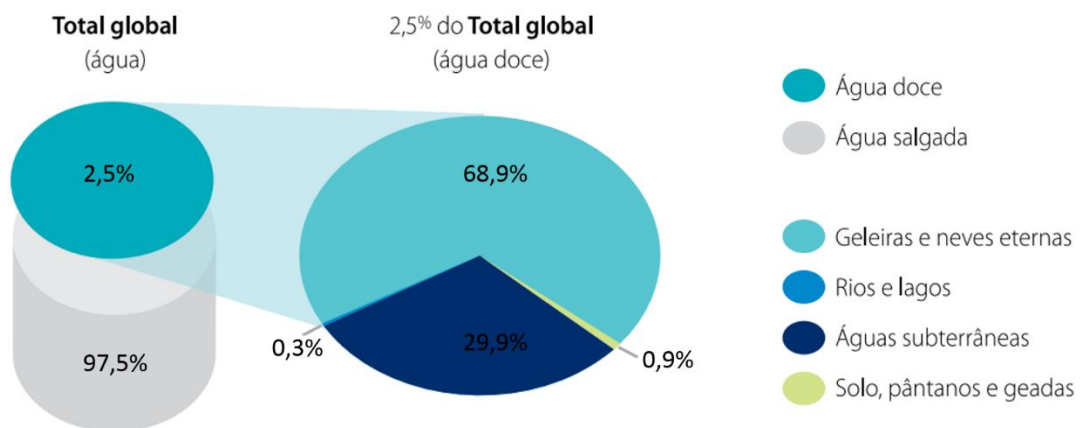
modules, it is noted that the largest amount of water that could be collected was about 2.04 L/m<sup>2</sup>/h with a consumption of about 7.20 kWh. Thus, atmospheric water harvesting proved to be a viable source, and although it is collected in a small quantity, it may be essential to complement the water resources during prolonged periods of drought, and can be used for irrigation, animal watering and / or consumption human.

## Capítulo 1: Considerações iniciais

### 1.1 Introdução Geral

A água é um recurso imprescindível para a sobrevivência dos seres vivos. Além disso, a água também possui um papel importante em áreas comerciais e industriais, uma vez que ela se faz necessária em praticamente todas as etapas da cadeia produtiva, e também na agricultura devido a irrigação de culturas.

O crescimento da demanda hídrica é influenciado pelo aumento populacional, urbanização, políticas de segurança alimentar e energética e industrialização. Consequentemente, a exploração da água vem sendo crescente com o passar dos anos (WWAP, 2015). Associado ao crescente consumo da água, está a má distribuição dos recursos hídricos no planeta, onde apenas 0,0075% da água disponível no planeta se encontra nos rios e lagos, ou seja, de mais fácil captação e apropriação para o consumo. Já o restante se encontra em maior parte nos oceanos (97,5%), ou em geleiras, águas subterrâneas, solos e pântanos (Figura 1.1). Do recurso hídrico disponível, o setor agrícola é responsável por cerca de 70% do uso da água do mundo, enquanto o uso doméstico utiliza cerca de 8% e a indústria em torno de 22% ( WWAP, 2017).



**Figura 1.1:** Distribuição dos recursos hídricos no mundo.

Fonte: MMA (2017).

Assim, a má distribuição dos recursos hídricos juntamente com o crescimento da demanda hídrica contribuem para a escassez de água em diversas regiões.

Estima-se que em 2025, mais da metade da população mundial deverá sofrer com falta de água em suas residências (TAVARES; ARAÚJO, 2016). Ademais, estima-se que em 2030 haverá um *déficit* de cerca de 40 % entre a procura e a disponibilidade de água (WWAP, 2015).

A escassez de água é muitas vezes associada erroneamente como sendo apenas problemas de climas áridos e/ou em áreas onde a disponibilidade de água é baixa. Porém, ela pode também ocorrer em áreas com grande precipitação anual, mas que devido a uma grande densidade populacional ou um consumo excessivo de água destinada ao consumo residencial, agrícola ou industrial, o fornecimento de água se torna escasso (GHAFFARIANHOSEINI *et al.*, 2016). Além disso, casos de depleção dos recursos hídricos subterrâneos também ocorrem em regiões onde a taxa de recarga do lençol freático é menor do que a utilização de água, deste mesmo manancial, para irrigação em outras épocas do ano, o que pode gerar esgotamento de aquíferos por causa do uso excessivo (ABAS, 2018). Assim, a escassez de água, em uma dada região, pode ter razões de balanço hídrico anual ou de “equilíbrio dinâmico” entre a recarga do lençol freático e seu uso.

Atualmente, há uma estreita relação entre o uso da água, energia e alimentos. Devido a grande preocupação com o desenvolvimento sustentável, esta relação vem sendo estudada e discutida em diversos eventos internacionais, como a Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável, a Rio+20 (GIATTI *et al.*, 2016). O nexo entre água e energia pode ser para o planejamento integrado dos recursos, tanto do setor hídrico quanto do setor energético, uma vez que há uma dependência direta da água para a geração de energia, bem como para praticamente todas as atividades econômicas (MARIANI; GUARENCHI; CAVALIERO, 2016).

Dois exemplos da importância da utilização da água podem ser evidentes na agricultura irrigada e na geração hidroelétrica. Sabe-se que culturas irrigadas produzem, em média, cerca de três vezes mais do que a agricultura de sequeiro (TRINDADE *et al.*, 2006) e também que o valor médio da produção da agricultura irrigada é muito maior do que a de sequeiro. Já a geração hidroelétrica requer, em muitos casos, a acumulação de água em reservatórios, que são sempre questionados também pelo uso consuntivo da água. No entanto, a própria

agricultura requer muita água, especialmente nos períodos com baixa precipitação pluviométrica, o que tornam os reservatórios imprescindíveis, em muitos casos. Assim, os reservatórios são essenciais para a geração de hidroeletricidade e para a irrigação (GALVAÃO; BERMAN, 2015; TORRES *et al.*, 2015).

Dessa forma, o estudo de fontes alternativas de água pode contribuir para minimização do consumo de energia elétrica e de água, uma vez que poderá haver uma redução de bombeamento de água em instalações rurais, pois a água pode ser captada da atmosfera próximo às culturas. Ademais, fontes alternativas de água em regiões secas podem contribuir para uma maior produção agrícola e, conseqüentemente, maior produção de energia elétrica. Outra vantagem da extração de água da atmosfera é que os comitês de bacia podem, teoricamente, cobrar pela utilização de recursos hídricos de mananciais. No entanto, não existem legislações para utilização de fontes alternativas de água, como a extração da água presente na atmosfera. Assim, este fato pode contribuir para aumentar a viabilidade de utilização deste recurso.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Estudar os diferentes métodos utilizados para a captação de água do ar atmosférico, assim como analisar o potencial brasileiro e desenvolver protótipos para a captação da água da atmosfera na cidade de Viçosa - MG.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- i. Estimar o rendimento de orvalho por meio do resfriamento radiativo para Viçosa-MG e avaliar o seu uso para irrigação de culturas na fase inicial de desenvolvimento;
- ii. Mapear em escala nacional o rendimento de orvalho e variáveis meteorológicas que influenciam na sua formação; e
- iii. Realizar experimentos utilizando elementos ativos e passivos para mensurar a quantidade de água coleta proveniente do vapor atmosférico.

### **1.3 Estrutura da dissertação**

Essa dissertação de mestrado é composta por 7 capítulos.

O Capítulo 1 introduz os temas abordados e apresenta as limitações e contribuições da presente pesquisa.

O capítulo 2 faz uma abordagem do estado da arte das diferentes tecnologias utilizadas para captação de água do ar atmosférico envolvendo métodos ativos e passivos.

O capítulo 3 analisa variáveis meteorológicas importantes para a formação de orvalho na cidade de Viçosa-MG, assim como estima o rendimento de orvalho por meio do resfriamento radiativo passivo e potencial para irrigação.

O capítulo 4 mapeia variáveis meteorológicas e estimativa de produção de orvalho por meio do resfriamento radiativo passivo no território brasileiro.

O capítulo 5 apresenta, em estudo experimental, o rendimento de orvalho com uso de diferentes superfícies condensadoras, por meio do resfriamento radiativo passivo, na cidade de Viçosa-MG.

O capítulo 6 apresenta também, em estudo experimental, a produção de orvalho usando módulos termoeletrônicos - método ativo - como superfície condensadora, para a cidade de Viçosa-MG.

O capítulo 7 apresenta a conclusão geral dessa pesquisa.

### **1.4 Limitações da pesquisa**

Os dados meteorológicos utilizados no experimento passivo para análise de rendimento de orvalho foram obtidos da estação meteorológica de Viçosa-MG situada cerca de 1,5 km do local do experimento. Dessa forma, as variáveis meteorológicas não foram medidas no local do experimento, o que pode reduzir a precisão das análises acerca da produção de orvalho.

Além disso, dados de nebulosidade para o período noturno são necessários para estimativa de rendimento de orvalho. Geralmente esses dados estão disponíveis nas estações convencionais, uma vez que são feitas visualmente por um operador. Porém, o número de estações convencionais está cada vez mais escasso no território nacional e banco de dados de nebulosidade noturnos são difíceis de serem obtidos. Dessa forma, nesta pesquisa foi suposta a melhor

condição de nebulosidade, ou seja, céu limpo. Não utilizou-se dados de satélites meteorológicos, que em geral informam sobre o índice de nebulosidade para a estimativa de distribuição espacial da produção de orvalho no território brasileiro. Pelo mesmo motivo, os dados de nebulosidade provenientes de previsões meteorológicas foram usados para a validação do modelo de estimativa de rendimento de água de orvalho para a cidade de Viçosa – MG.

### **1.5 Contribuições da pesquisa**

Essa pesquisa visou contribuir e incentivar o estudo de tecnologias de fontes complementares de água, uma vez que o Brasil não possui muitos estudos nessa área. Dessa forma, o país teria muitos benefícios se investisse em projetos de captação de água atmosférica. A principal motivação para esta pesquisa é o fato reconhecido que diversas regiões do país sofrem com problemas de escassez de água, tanto para a irrigação, dessedentação animal e uso humano.

Esta pesquisa apresenta, ainda, a distribuição do potencial de captação de orvalho, em escala nacional, baseado em um modelo presente na literatura para resfriamento radiativo passivo. Para tal, foi utilizado de banco de dados meteorológicos do território nacional sob a responsabilidade do Instituto Nacional de Meteorologia. O modelo utilizado foi também validado em experimento para a cidade de Viçosa, MG.

Foram desenvolvidos protótipos de captação de água da atmosfera usando tecnologia passiva e ativa, i. e. com e sem uso de energia elétrica.

Dessa forma, essa pesquisa pretendeu evidenciar a importância da captação de orvalho e a necessidade de investimento nessa tecnologia, a fim de consolidar projetos de captação de vapor de água atmosférico com o objetivo de suprir a demanda hídrica e de estudar o potencial de utilização deste recurso que tem sido negligenciado.

### **1.6 Referências bibliográficas**

GALVÃO, J.; BERMANN, C. Crise hídrica e energia: conflitos no uso múltiplo das águas. **Estudos Avançados**, v. 29, n. 84, p. 43 – 68, 2015, [doi : 10.1590/S0103-40142015000200004](https://doi.org/10.1590/S0103-40142015000200004).

GHAFFARIANHOSEINI, A.; TOOKEY, J.; GHAFFARIANHOSEINI, A.; YUSOFF, S.M.; HASSAN, N. B. State of the art of rainwater harvesting systems towards promoting green built environments: a review. **Desalination and Water Treatment**, v. 57, n. 1, p. 95–104, 2016, [doi:10.1080/19443994.2015.1021097](https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1021097).

GIATTI, L. L.; JACOBI, P.R.; FAVARO, A.K.M.I.; EMPINOTTI, V.L. O nexa água, energia e alimentos no contexto da Metrópole Paulista. *Estudos Avançados*, v. 30, n. 88, p. 43–61, 2016, [doi:10.1590/s0103-40142016.30880005](https://doi.org/10.1590/s0103-40142016.30880005).

MARIANI, L.; GUARENGHI, M. M.; CAVALIERO, C. Analysis of opportunities and challenges for the water-energy nexus Análise de oportunidades e desafios para o Nexa Água-Energia. **DMA Desenvolvimento e meio ambiente**, v.37, p.9-30, 2016 [doi: 0.5380/dma.v37i0.45046](https://doi.org/10.5380/dma.v37i0.45046).

MMA - Ministério do Meio Ambiente. **Água: um recurso cada vez mais ameaçado**. Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/estruturas/sedr\\_proecotur/publicacao/140\\_publicacao09062009025910.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/sedr_proecotur/publicacao/140_publicacao09062009025910.pdf)>. Acesso em: 5 nov. 2017.

TAVARES, J. M.; ARAÚJO, W. J. S. Água Potável: Escassez e desperdício. **Educação, Tecnologia e Cultura - E.T.C.**, v. 12, p. 10–17, 2016.

TORRES, C. J. F.; BRAMBILLA, M.; FONTES, A. S.; MEDEIROS, Y. D. P. Conflitos pelo uso da água para a irrigação, geração de energia hidroelétrica e manutenção do ecossistema aquático no baixo trecho do rio São Francisco. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 4, p. 195–210, 2015, [doi: 10.19177/rqsa.v4e02015195-210](https://doi.org/10.19177/rqsa.v4e02015195-210).

TRINDADE, M.; STONE, L. F.; HEINEMANN, A. B.; CÁNOVAS, A. D.; MOREIRA, J. A. A. Nitrogênio e água como fatores de produtividade do trigo no cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 1, p. 24-29, 2006.

WWAP - World Water Assessment Programme. **The United Nations World Water Development Report 2015**. Disponível em: <<http://unesdoc.unesco.org/images/0023/002318/231823E.pdf>>. Acesso em: 5 nov. 2017.

WWAP - World Water Assessment Programme. **The United Nations World Water Development Report 2017**. Disponível em: <<http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002475/247552e.pdf>>. Acesso em: 5 nov. 2017.

## Capítulo 2: Estado da arte da captação de água do ar atmosférico

### 2.1 Introdução

A crescente preocupação com o atendimento da demanda hídrica tem estimulado estudos para desenvolvimento de tecnologias com o objetivo de coletar, de maneira eficiente, a água presente no ar, sob as formas de orvalho e/ou de neblina (FESSEHAYE *et al.*, 2014). Esta preocupação pode ser evidenciada por meio das campanhas para a conscientização do uso racional da água que veem sido amplamente divulgadas, visto que este recurso é um elemento vital para os seres humanos, plantas e animais, além de ser um recurso finito no mundo.

Diante desta circunstância, torna-se necessário o estudo de fontes complementares de água, como a captação de água de chuva, dessalinização de água salgada e a condensação do vapor de água presente no ar atmosférico. Esta última tem um grande potencial a ser explorado, uma vez que a atmosfera possui uma quantidade de água comparável com toda a água doce superficial e subterrânea, excluindo geleiras. Estima-se que cerca de 98 % dos 13.000 km<sup>3</sup> de água doce presentes na atmosfera são vapor de água e apenas 2 % estão na fase líquida, como os nevoeiros (GIDO; FRIEDLER; BRODAY, 2016).

O uso da captação de orvalho, fonte complementar de água, é bem antigo e acredita-se que já foi realizado pelos gregos para abastecer a cidade de Theodosia, localizada atualmente na Ucrânia. No início do século XX, o estudo dessa prática foi retomado, porém, depois ignorado devido aos baixos rendimentos (TOMASZKIEWICZ *et al.*, 2015). Embora, na maioria das vezes, seja coletado um volume relativamente pequeno, este não pode ser desconsiderado, pois é uma fonte suplementar de água para as regiões áridas e semiáridas durante períodos secos (TOMASZKIEWICZ *et al.*, 2015). Além disso, algumas utilizações requerem quantidades bem menores do que outras, como a dessedentação humana em relação a irrigação.

Durantes anos de estudo, diferentes tecnologias para a coleta de água de vapor atmosférico veem sendo desenvolvidas, entre elas tecnologias que utilizam elementos passivos, como o resfriamento radiativo que utiliza uma superfície condensadora como plásticos, metais, vidros (MAESTRE-VALERO *et al.*, 2011;

SHARAN, 2011; KIDRON; STARINSKY, 2012) e as tecnologias que utilizam elementos ativos e, conseqüentemente consomem energia elétrica, como os módulos termoelétricos (MUÑOZ-GARCÍA *et al.*, 2013; NANDY *et al.*, 2014). Ultimamente, tecnologias que utilizam nano materiais porosos também vem sendo utilizadas para captação de água presente na atmosfera (HUANG *et al.*, 2018; KIM *et al.*, 2018).

## **2.2 Objetivos**

Diante deste cenário de depleção e de consumo consciente dos recursos hídricos, objetivou-se realizar um estudo do estado da arte da captação de água do ar atmosférico como uma fonte suplementar de água para consumo doméstico e/ou irrigação.

## **2.3 Metodologia**

As informações utilizadas neste trabalho foram obtidas de artigos científicos sobre a captação de água do ar atmosférico utilizando diferentes tecnologias ativas e passivas, entre elas o uso de superfícies condensadoras, módulos termoelétricos e nano materiais. O resultado deste trabalho permitirá a compreensão sobre as diferentes metodologias utilizadas para obtenção de fontes suplementares de água por meio da condensação de vapor de água, assim como variáveis meteorológicas que interferem na formação de orvalho com base em experiências e estudos em outros países que já adotam essas tecnologias.

## **2.4 Nevoeiro**

O estudo de captação de água de nevoeiro, utilizada principalmente em regiões áridas e semiáridas, iniciou no início do século XIX, na África do Sul. Posteriormente, diferentes tecnologias para facilitar a captação de neblina, como o uso de redes, foram desenvolvidas com o objetivo de complementar a demanda hídrica. Em Omã, cisternas foram construídas sob as árvores para coletar água de neblina para uso doméstico. Já em diversos países da América do Sul, como o Peru e o Chile, estruturas com o uso de telas são construídas para a captação de água (FESSEHAYE *et al.*, 2014).

Utiliza-se, tradicionalmente, uma malha de plástico para que parte das gotículas do nevoeiro sejam coletadas (Figura 2.1). Na malha, as gotículas se agrupam e quando atinge tamanhos maiores, escorrem devido à gravidade e são direcionadas para o sistema de armazenamento, podendo ser utilizadas tanto para uso doméstico quanto para irrigação, por exemplo (MONTECINOS *et al.*, 2018). Um dos problemas da utilização dessa tecnologia é a manutenção dos coletores, pois a radiação solar, ventos e outros fatores ambientais deterioram a composição do material dos coletores podendo exigir manutenção (HOLMES; RIVERA; JARA, 2015).



**Figura 2.1:** Captação de água de nevoeiro utilizando telas na Espanha.  
**Fonte:** BATISHA (2015).

Em um estudo realizado por Meunier e Beysens (2016), no Azerbaijão, durante um período de um ano de análise (abril de 2010 e março de 2011), foram coletados uma quantidade total de 6 L/m<sup>2</sup> de água de nevoeiro e 15 L/m<sup>2</sup> de água de orvalho utilizando superfícies condensadoras planares de 1 m<sup>2</sup>. Já em um estudo realizado na Califórnia utilizando diferentes tipos de telas, também com área de 1m<sup>2</sup>, a quantidade máxima de água total coletada durante os períodos de névoa em 2014 e 2015 foi de 18,5 litros para uma tela de inox revestida com material hidrofílico (FERNANDEZ *et al.*, 2018).

Em uma região da Arábia Saudita, observou-se uma captação de água de nevoeiro de cerca de 2 L/ m<sup>2</sup>/dia. Já no Chile, na região do Alto Patache, a média de rendimento foi de 6 L/m<sup>2</sup>/dia (média de 14 anos), sendo que a quantidade de água coletada variou entre 5,3 L/m<sup>2</sup>/dia e 13,4 L/m<sup>2</sup>/dia dependendo da localização,

estação do ano e tipo de sistema de captação utilizado. No Equador, Pachamama Grande, a eficiência de captação chega a 12 litros/m<sup>2</sup>/dia. Uma média de 12 L/m<sup>2</sup>/dia também pôde ser alcançada na Croácia, Velebit, durante a estação seca (verão). Já no Nepal, um sistema de tela para captação de neblina mostrou ser capaz de coletar 2,5 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> de tela durante 192 dias de nevoeiro, com o valor máximo de 118 L/m<sup>2</sup>/dia em um ano de análise (KARKEE, 2005; BATISHA, 2015).

Embora a captação de água de orvalho seja uma promissora fonte não convencional de água e apresente uma coleta de grandes quantidades de água, no Brasil, essa prática não vem sendo realizada até o momento.

## **2.50 orvalho e as características ambientais**

O orvalho, evento global e natural, acontece quando o vapor de água presente no ar atmosférico se condensa sobre uma superfície. A formação de orvalho é influenciada por condições meteorológicas como a umidade relativa, a temperatura do ambiente, a nebulosidade, diferença entre a temperatura do ar ambiente e a temperatura de ponto de orvalho, vento, altitude e características da superfície condensadora, como a emissividade do material e sua geometria.

A formação de orvalho muitas vezes é nomeada como precipitação, o que é incorreto visto que o orvalho se forma como resultado da condensação do vapor de água presente na atmosfera e não como uma precipitação. Portanto, o orvalho é formado e não precipitado (TOMASZKIEWICZ *et al.*, 2015).

Devido ao aumento da escassez hídrica em diversos lugares do planeta, o estudo da importância do aproveitamento do orvalho pode ser feito para diferentes áreas do mundo, especificamente em regiões áridas, onde os problemas com escassez de água são mais evidentes.

Segundo Zangvil (1996), em estudo realizado para o deserto de Neguev, Israel, aproximadamente em 200 noites observou-se a formação de orvalho. Porém, em algumas noites, as gotículas formadas não deslizam por gravidade nas superfícies condensadoras, portanto esse número se reduz para 120 a 180 noites (BEYSENS *et al.*, 2005).

Umidade relativa é o termo utilizado para indicar a relação entre a quantidade de vapor de água presente no ar e a quantidade máxima de vapor que poderia haver

na mesma temperatura, ou seja, em condição de saturação. O orvalho é geralmente formado quando a umidade relativa ultrapassa 90% (KONRAD *et al.*, 2015). No entanto, um estudo em Marrocos demonstrou que o vapor de água condensava principalmente quando a umidade relativa do ar estava entre 74 e 95% (LEKOUCH *et al.*, 2012).

A temperatura do ponto de orvalho, temperatura em que o ar necessita estar para que haja a condensação, se dá com base na umidade relativa e temperatura do ar ambiente e é necessária para se estimar tanto o potencial quanto o rendimento de produção de orvalho. Quando uma superfície resfria abaixo da temperatura de ponto de orvalho, o vapor de água presente no ar condensa na mesma.

Em superfícies condensadoras que utilizam o princípio do resfriamento radiativo passivo, a formação de orvalho geralmente acontece quando a diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura de ponto de orvalho é menor que 10 °C (BEYSENS, 2016).

A nebulosidade noturna é um importante fator para a formação de orvalho, visto que as nuvens reduzem o processo de resfriamento radiativo passivo, interferindo assim, no resfriamento da superfície condensadora. Durante a noite, a presença de nuvens faz com que a perda de calor da superfície seja minimizada, uma vez que parte desse calor emitido pela superfície condensadora é absorvido pelas nuvens e depois parte é irradiado de volta para a terra. A Figura 2.2 exemplifica o menor resfriamento do ar urbano que acontece em dias com alta nebulosidade. Esse mesmo princípio ocorre em uma superfície condensadora para captação de água de orvalho.

Durante a noite, a superfície da Terra emite energia em forma de radiação de ondas longas e não recebe quantidade de radiação de ondas curtas suficiente para aquecer a superfície. A nuvem absorve essa radiação de ondas longas e irradia parte desse calor de volta para a superfície, não deixando que ele seja totalmente liberado para o espaço. Assim, as nuvens funcionam como uma cobertura, uma vez que menos calor escapa para o espaço e, conseqüentemente, a superfície condensadora não resfria como em dias de céu limpo. Portanto, em geral, uma maior quantidade de orvalho é coletada quanto mais limpo estiver o céu. Estudos tanto em áreas continentais quanto em áreas costeiras comprovaram que o

rendimento de orvalho é diretamente proporcional à transparência e visibilidade do céu, devido à nebulosidade ou outras razões, como por exemplo, a presença de poluição ambiental (KHALIL *et al.*, 2016).



**Figura 2.2:** Influência da nebulosidade no processo de resfriamento radiativo passivo.  
**Fonte:** PERGORIM (2016).

Para se ter a condensação de água em uma superfície, será necessário que a mesma se resfrie até a temperatura de ponto de orvalho. Dessa forma, alta emissividade térmica, especialmente com comprimentos de onda de 8 a 13  $\mu\text{m}$  na janela atmosférica aumenta a condensação (ALNASER; BARAKAT, 2000).

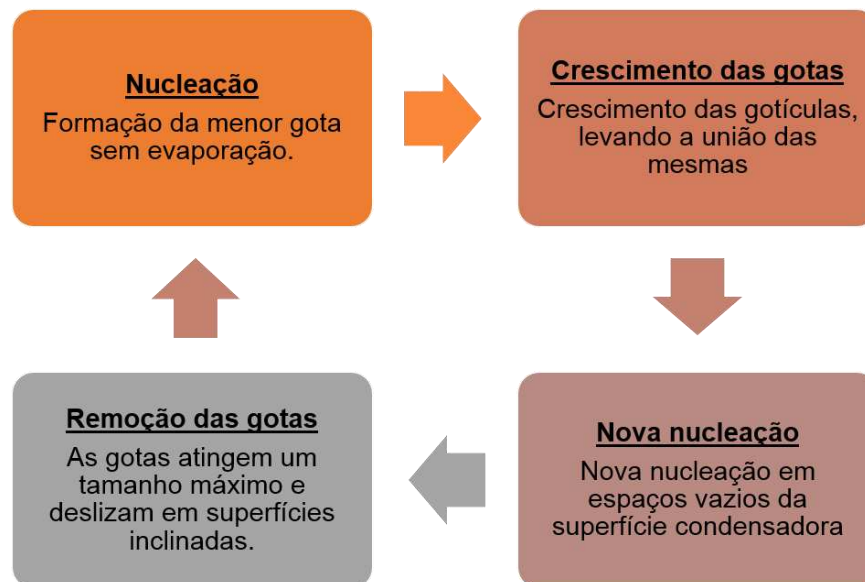
A velocidade do vento, também é um fator que interfere na formação de orvalho. Apesar de ser necessário para renovação do ar, o vento, que existe devido à transferência de calor por convecção natural na atmosfera, pode também prejudicar a formação de orvalho. O vento ao alcançar uma superfície condensadora poderá acelerar o processo de evaporação do vapor de água condensado e mover o ar saturado para longe da superfície. Caso a temperatura do ar aumente acima da temperatura de ponto de orvalho, o vento poderá vir a secar o orvalho. Foi avaliada a formação de orvalho na superfície, tendo como fator a velocidade do vento e concluiu-se que a condensação de vapor de água cessa para valores de velocidade do ar maiores do que 4,4 m/s, medida à 10 metros de altura acima do solo. Além disso, o formato dos condensadores e/ou possíveis obstáculos em suas proximidades podem prejudicar ou ajudar o fluxo de ar (BEYSENS, 2016). Dessa forma, a velocidade do vento deve apresentar uma velocidade suficiente para

manter a transferência de vapor para a superfície condensadora, sem, no entanto, evaporar o orvalho (RICHARDS, 2009). Um estudo realizado no sudeste do Marrocos mostrou que o orvalho era formado quando a velocidade do vento estava entre 0,15 e 0,7 m/s (KHALIL *et al.*, 2016).

### 2.5.1 Formação de orvalho

A primeira condição para a formação do orvalho é que a temperatura da superfície de condensação seja igual ou menor que a temperatura de ponto de orvalho.

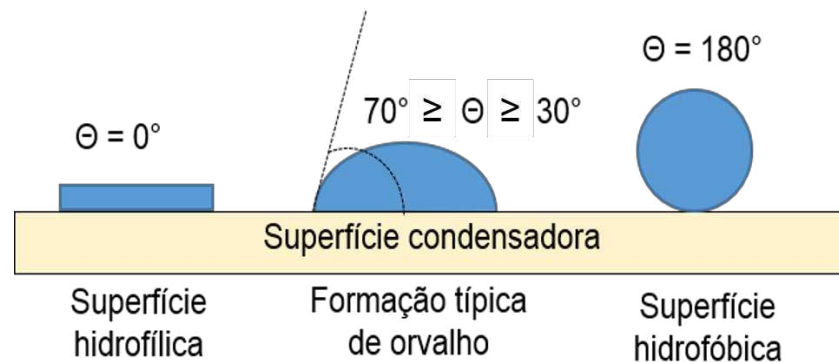
O processo de formação de orvalho pode ser descrito por quatro processos físicos, que são: nucleação, crescimento, nova nucleação e remoção de gotículas, como mostrado na Figura 2.3.



**Figura 2.3:** Processo de formação do orvalho.  
**Fonte:** Adaptado de TOMASZKIEWICZ *et al.* (2015).

A nucleação é a formação da menor gota possível, termodinamicamente estável, ou seja, que não evapora. A nucleação depende das propriedades de molhamento da superfície e do ângulo de contato, ângulo este que se forma entre o líquido e a superfície e que pode variar de zero a cento e oitenta graus. Um ângulo de contato zero significa um achatamento da gota e um molhamento da superfície por completo. Neste caso, o material da superfície condensadora é hidrofílica. Já

um ângulo de contato de cento e oitenta graus indica uma completa rejeição do líquido pelo sólido, assim a gota mantém sua forma esférica, o que indica que a superfície é hidrofóbica. O ângulo de contato típico na formação de orvalho ao ar livre está entre trinta e setenta graus. Estas condições são conhecidas como molhabilidade de superfícies (HILLEL, 1971; BEYSENS, 1995; TOMASZKIEWICZ et al., 2015).



**Figura 2.4:** Condições de molhabilidade de acordo com o ângulo de contato.  
**Fonte:** TOMASZKIEWICZ *et al.* (2015); BEYSENS (1995); HILLEL (1971).

Após a formação inicial da gota, elas crescem, se tocam e, conseqüentemente, se unem. Logo, após a coalescência de duas gotas, é formada uma nova com o mesmo volume da soma das duas gotas iniciais. O padrão de formação das gotas e distribuição espacial das gotas na superfície dependem das propriedades da superfície de condensação (BEYSENS, 1995).

A nova nucleação ocorre em espaços vazios entre as gotas e a superfície, assim como nos lugares onde as gotículas foram removidas devido ao efeito da gravidade. As novas gotículas que se formam possuem as mesmas características de crescimento que as anteriores (BEYSENS, 1995; TOMASZKIEWICZ *et al.*, 2015).

Em superfícies inclinadas, as gotas, devido ao seu peso, deslizam quando atingem um tamanho máximo. Geralmente, o deslizamento das gotas ocorre quando o tamanho da gota alcança cerca de 0,3 mm. A facilidade de deslizamento das gotas depende da superfície na qual elas se condensaram (TOMASZKIEWICZ *et al.*, 2015).

### **2.5.2 Interação com o ecossistema**

A interação entre o orvalho e as plantas tem sido objeto de estudo durante muitos anos (STONE, 1963). Em geral, o orvalho representa uma pequena, mas importante quantidade para o ciclo da água no ecossistema, uma vez que este pode ser uma fonte primária de água para líquens, pequenos arbustos e crostas biológicas de solo em áreas desérticas, ou uma fonte adicional de água que pode ser absorvida pela superfície da planta. Além disso, tanto o orvalho quanto os nevoeiros afetam a evapotranspiração das plantas. Os “pelos” presentes nas plantas contribuem para a formação de orvalho, reduzem a transpiração e previnem a evaporação do orvalho (KONRAD *et al.*, 2015; TOMASZKIEWICZ *et al.*, 2017).

O orvalho é uma fonte de água para insetos e pequenos animais, principalmente os que habitam o deserto e se alimentam de vegetação no início da manhã, como exemplo, o besouro da Namíbia, África, *Diacamma rugosum*, uma formiga encontrada na Índia, que coleta uma quantidade substancial de orvalho para suprir suas necessidades hídricas e o caracol *Trochoidea seetzenii* encontrado no deserto de Negev, Israel (AGAM; BERLINER, 2006; MIDDLETON, 2009).

Por outro lado, alguns estudos diminuem a importância do orvalho porque este tem potencial para aumentar doenças causadas por fungos em plantas, uma vez que o desenvolvimento de bactérias e fungos pode ser influenciado pela presença de orvalho (AGAM; BERLINER, 2006). Além disso, em geral, orvalho não se forma sob solo nu, portanto, não contribui significativamente, para o regime hídrico no planeta (TOMASZKIEWICZ *et al.*, 2015). Além disso, em práticas agrícolas, onde se faz necessário o uso de defensivos agrícolas, o orvalho é uma variável que pode interferir negativamente, pois pode ocorrer diluição e/ou escorrimento do produto devido ao excesso de água na superfície da planta alterando assim, a atuação do defensivo (MOREIRA *et al.*, 2015).

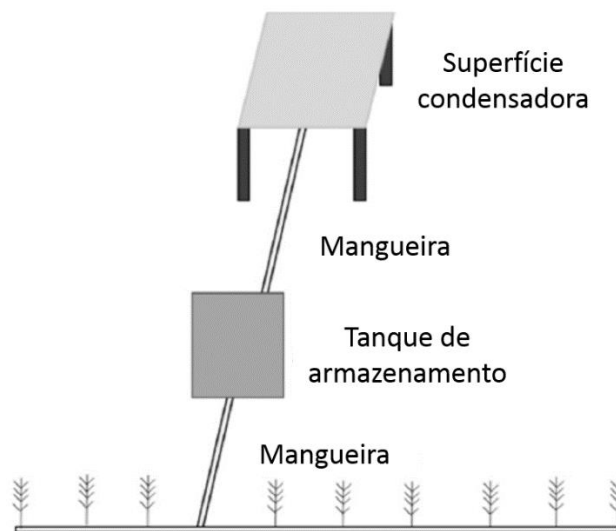
### **2.5.3 Uso para irrigação**

A captação de orvalho vem sendo estudada como potencial para uso complementar na irrigação. É importante ressaltar que o uso de água para a irrigação constitui o maior uso final de água pela humanidade e que recursos hídricos são escassos em muitas áreas agrícolas. Além disso, o orvalho é muito

importante para a agricultura, visto que pode ser utilizado para cultivar plantas que não necessitam de grandes quantidades de água (KOUNOUHEWA; AWANOU, 1999).

O uso de irrigação por gotejamento foi proposto por Alnaser e Barakat (2000), em Bahrain, por ser atraente para algumas situações agrícolas, pois economiza água e pode fornecer às plantas a quantidade exata de água que necessitam, com o mínimo de consumo energético e de água. Três superfícies condensadoras foram testadas, alumínio, vidro e polietileno. O máximo valor de orvalho coletado foi de 1 L por dia no inverno e 0,4 L no verão usando uma superfície condensadora de 1 m<sup>2</sup>. Dessa forma, a água de orvalho poderia ser utilizada para uma pequena escala de irrigação, podendo ser facilmente utilizada em jardins e hortas.

Em seu trabalho Tomaszkiwicz *et al.* (2017) observaram que a captação de orvalho seria eficaz para mitigar a mortalidade de mudas. Além de serem sistemas simples (Figura 2.5), baratos e com mínimo impacto ao ambiente. Locais ao longo do mar mediterrâneo e durante estações secas demonstraram um ótimo potencial para a captação de orvalho, cuja taxa de formação de orvalho foi de cerca de 42 % das noites. Com média de 0,13 L/m<sup>2</sup>/dia, 100 m<sup>2</sup> de superfície condensadora deveriam ser utilizados para irrigar 50 mudas de árvores, que juntamente com a água de chuva, fariam papel vital para o desenvolvimento das plantas.



**Figura 2.5:** Sistema para irrigação com o uso de superfícies condensadoras  
**Fonte:** TOMASZKIEWICZ *et al.* (2017)

Além disso, trabalhos que estudam o reaproveitamento da água por meio da condensação do vapor de água presente no ar atmosférico devido à evapotranspiração são realizados em diversos países, especialmente os países áridos ou semiáridos. Como exemplo, uma estufa composta por compartimento de evaporação de água, compartilhamento de condensação e centrais de aquecimento e arrefecimento, foi desenvolvida em Almeria (sul da Espanha) com o objetivo de recuperar parte da água gasta em irrigação. A estufa recuperou cerca de 70% da água usada na irrigação e apresentou um baixo consumo de energia (SPEETJENS; STIGTER; VAN STRATEN, 2010). Na China um sistema foi desenvolvido para retirar vapor de água presente no ar úmido utilizando materiais biomiméticos, ou seja, materiais sintéticos que reproduzem características encontradas em materiais biológicos. Além disso, painéis solares foram projetados no telhado com o objetivo de gerar energia elétrica, uma vez que água e energia elétrica são objetos de estudo para um desenvolvimento sustentável (CHEN; CAI, 2012).

Além destes estudos e protótipos para utilização de orvalho na agricultura, há o DRIPS (*Deep Root Irrigation Precipitation System*), um sistema desenvolvido para irrigação composto de um funil, de plástico ou de metal, que coleta orvalho e direciona a água para as raízes das plantas, abaixo da camada de evaporação do solo, em ambientes áridos (DRIP, 2018). A empresa israelense *Tal-Ya Water Technologies* desenvolveu uma tecnologia baseada em uma bandeja descartável e reaproveitável com uma vida útil média de cerca seis anos. Esta é feita de plástico polietileno e é fixada ao redor da planta com o objetivo de direcionar água para a raiz, além de protegê-la contra plantas daninhas e temperaturas extremas. As bandejas são compatíveis com o sistema de irrigação por gotejamento e utilizam água de chuva e também de orvalho, uma vez que possuem um aditivo de alumínio que aumenta formação de orvalho devido à variação de temperatura entre o objeto e o ar. Esta tecnologia está sendo utilizada em vários países do mundo entre eles Estados Unidos da América, China, Chile, Israel e Sri Lanka com uma estimativa de economia de água de mais de 50% (GLOBO RURAL, 2015; TAL-YA AGRICULTURE SOLUTIONS, 2018; WATER ALL SOLUTION, 2018).

## **2.6 Tecnologias para captação de água atmosférica**

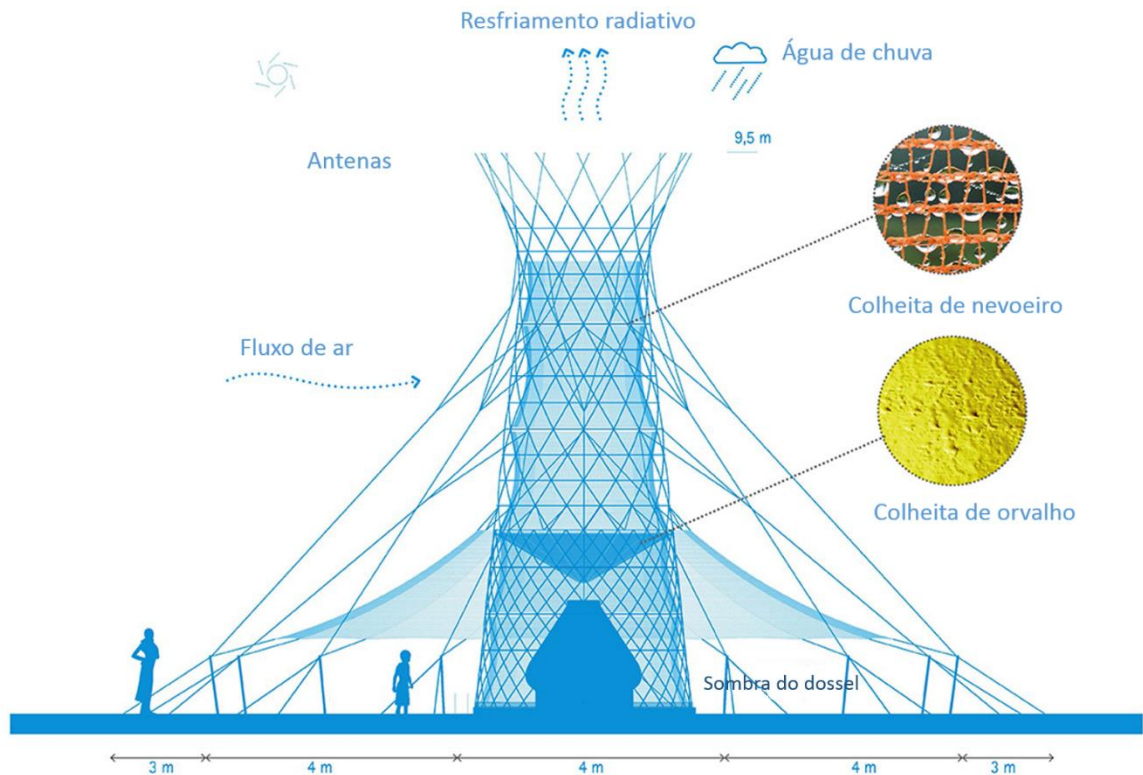
### **2.6.1 Resfriamento radiativo passivo**

O resfriamento radiativo é um processo bem conhecido desde a antiguidade na qual um objeto exposto ao ar livre transfere calor ao meio ambiente durante a noite. Portanto, o objeto se resfria (TOMASZKIEWICZ *et al.*, 2015). Estudos indicam que o resfriamento noturno, em áreas populosas, pode registrar uma redução da temperatura da ordem de 15°C a 20°C. Já uma redução de temperatura de até 40°C foi demonstrada apenas em locais desérticos de alta altitude e com umidade extremamente baixa (CHEN *et al.*, 2016).

Para o resfriamento radiativo passivo é necessário o uso de uma superfície condensadora cujo material deve possuir uma alta emissividade na faixa de comprimento do infravermelho, a fim de aumentar a emissão de calor, conseqüentemente, favorecer o resfriamento da superfície (ALNASER; BARAKAT, 2000).

Atualmente, diversas pesquisas utilizam uma superfície condensadora planar, em telhados e em solos, por exemplo, para coletar orvalho. Porém, existem outros projetos com diferentes *designs*, mas com o mesmo objetivo, como o Warka Water (WARKA WATER, 2018).

O Warka Water, projeto desenvolvido pelo arquiteto italiano Arturo Vittori, tem como objetivo coletar água presente no ar atmosférico, seja coleta de água de chuva ou coleta de orvalho e neblina, utilizando uma torre com materiais biodegradáveis e recicláveis, dentre eles, bambu e materiais que favorecem a condensação (Figura 2.6). Desde 2012, doze protótipos foram desenvolvidos com o objetivo de testar diferentes materiais em diferentes condições ambientais, um deles na cidade de São Paulo, Brasil. Este projeto com cerca de 9,5 m de altura, 80 kg e uma área de malha para captação de água de cerca de 30 m<sup>2</sup>, tem projeção de coletar de 50 a 100 litros de água potável por dia. O primeiro protótipo piloto foi instalado em uma área rural da Etiópia em maio de 2015. Já no Haiti, a construção do protótipo piloto iniciou em dezembro de 2017 (WARKA WATER, 2018).



**Figura 2.6:** Projeto da Warka Water desenvolvido para captação de neveiro, orvalho e água de chuva.

**Fonte:** WARKA WATER (2018).

Um estudo foi realizado na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Campo Mourão (UTFPR-CM), com o objetivo de avaliar a viabilidade de instalação do projeto Warka Water e explorar o estudo de um recurso hídrico pouco explorado no país, o orvalho. Verificou-se a viabilidade da construção deste projeto devido às condições favoráveis do clima e da localização, além da facilidade da construção do protótipo. Porém, por causa das características químicas do material absorvedor da malha utilizada para a captação e o arranjo geométrico da mesma, a captação da água de orvalho foi prejudicada, mostrando assim a importância na escolha do material ideal (GRECCO *et al.*, 2017).

## Geometrias

Geometrias distintas para as superfícies condensadoras foram desenvolvidas ao longo dos anos, uma vez que o formato da superfície condensadora influencia no rendimento de orvalho coletado. Embora a superfície de condensação planar seja encontrada mais frequentemente na literatura, há outras geometrias, como a

superfície em formato de pirâmide invertida. Em um estudo realizado na Holanda, este formato de pirâmide apresentou uma eficiência de cerca de 5% maior do que as superfícies planares para uma mesma área projetada no plano horizontal. (JACOBS; HEUSINKVELD; BERKOWICZ, 2008). A proteção contra o vento é um dos fatores que contribuem para essa maior eficiência na captação de orvalho (BEYSENS *et al.*, 2013).

Outra estrutura com formato de funil de dez lados foi simulada com o objetivo de analisar a eficiência de resfriamento quando comparado com uma superfície planar situada a um metro do solo e com inclinação de 30 graus. O resultado encontrado foi um aumento de eficiência, cerca de 40% quando comparado com a superfície planar (CLUS *et al.*, 2009). Porém, as superfícies planares possuem como grande vantagem a facilidade de produção e instalação das superfícies condensadoras, uma vez que podem ser instaladas em solos ou telhados, aproveitando assim, a inclinação do mesmo para captação do orvalho.

### **Superfícies condensadoras planares e rendimentos**

Muitos estudos tem sido conduzidos utilizando superfícies de condensação planares em telhados ou no solo (Figura 2.7), por exemplo, que coletam tanto orvalho quanto água de chuva. Estas superfícies podem ser confeccionadas de diferentes materiais, dentre eles plásticos, materiais galvanizados, vidro e alumínio (KIDRON; STARINSKY, 2012; SHARAN, 2011).



**Figura 2.7:** Exemplo de superfície condensadora comumente utilizada para captação de orvalho.  
**Fonte:** JACOBS; HEUSINKVELD; BERKOWICZ (2008).

O material mais comumente utilizado para captação de orvalho é uma folha plástica de polietileno de baixa densidade incorporado com microesferas de dióxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ) e sulfato de bário ( $\text{BaSO}_4$ ) e com material a prova d'água e insolúvel em sua superfície. O dióxido de titânio não absorve a radiação no visível. Para complementar a deficiência do dióxido de titânio com emissividade em toda a janela atmosférica, utiliza-se outros materiais como dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), sulfeto de zinco ( $\text{ZnS}$ ) ou sulfato de bário ( $\text{BaSO}_4$ ), este último apresentou maior eficiência no resfriamento radiativo. Por outro lado, este material se degrada rapidamente devido às emissões ultravioletas do sol, tendo uma vida útil de aproximadamente 18 meses e alto custo, cerca de US\$10 por  $\text{m}^2$  (TOMASZKIEWICZ *et al.*, 2015). Atualmente, essa película plástica é fabricada especialmente para esse fim pela OPUR (*International Organization for Dew Utilization*) (OPUR, 2018), sendo que foi originalmente desenvolvido em Nilsson *et al.* (1994) e Nilsson (1996). É necessário que a folha plástica seja isolada termicamente, por exemplo com folha de poliestireno expandido, uma vez que este isolamento favorece o resfriamento radiativo do material (TOMASZKIEWICZ *et al.*, 2015).

O ângulo de inclinação da superfície condensadora foi estudado por Beysens *et al.* (2003). Demonstrou-se que é necessário um equilíbrio entre o ângulo que interfere o resfriamento e o deslizamento das gotas por gravidade. Em relação à temperatura, esse ângulo ótimo é de cerca de  $21^\circ$ . Já o ângulo que favorece o deslizamento das gotas é de  $90^\circ$ . Dessa forma, considera-se um bom equilíbrio entre o resfriamento e a captação do orvalho por gravidade, um ângulo de cerca de  $30^\circ$ . Portanto, muitos estudos que utilizam superfícies condensadoras planares adotam esse ângulo de  $30^\circ$  que é considerado o “melhor” ângulo (JACOBS; HEUSINKVELD; BERKOWICZ, 2008; SHARAN *et al.*, 2017; TOMASZKIEWICZ *et al.*, 2017).

Em um estudo realizado na Espanha por Maestre-Valero *et al.* (2011) foram comparados dois materiais, o plástico desenvolvido pela OPUR e o polietileno preto, largamente utilizado na horticultura. Devido às propriedades hidrofílicas em sua composição, o plástico desenvolvido pela OPUR foi capaz de coletar orvalho em 175 noites contra 163 do plástico preto. Porém, a quantidade acumulativa de orvalho

foi maior para o plástico preto, cerca de 19,5% superior. Os autores consideraram que o plástico preto por possuir uma maior emissividade favoreceu a captação de orvalho. Além disso, este apresenta outras vantagens quando comparado ao plástico desenvolvido pela OPUR, como baixo custo e maior vida útil.

Em alguns estudos são realizadas simulações para determinar a quantidade de orvalho que poderia ser coletada considerando uma determinada área de estudo, as condições meteorológicas e o material da superfície condensadora. Sharan *et al.* (2017) realizaram uma simulação para a Índia (Kothara) tendo como superfície condensadora o plástico polietileno com  $\text{TiO}_2$  e  $\text{BaSO}_4$ . Um rendimento máximo de  $0,6 \text{ L/m}^2$  por noite foi observado. O Quadro 2.1 resume alguns estudos já realizados e os rendimentos alcançados.

**Quadro 2.1:** Resumo de alguns estudos utilizando condensadores planares, com resfriamento radiativo passivo

(Continua)

Local	Duração	Material	Área (m <sup>2</sup> )	Máximo rendimento (mm.dia <sup>-1</sup> )	Valor acumulativo de orvalho (mm)	Valor médio (mm.dia <sup>-1</sup> )	Número de noites	Noites com orvalho	Fonte
<b>Espanha (Cartagena)</b> Latitude: 37° 36' N Longitude: 0° 59' O	Maio/2009 até Maio/2010	Polietileno com TiO <sub>2</sub> e BaSO <sub>4</sub>	1	0,314	17,36	0,099	365	175	(MAESTRE-VALERO <i>et al.</i> , 2011)
<b>Spain (Cartagena)</b> Latitude: 37° 36' N Longitude: 0° 59' O	Maio/2009 até Maio/2010	Polietileno preto	1	0,316	20,76	0,127	365	163	(MAESTRE-VALERO <i>et al.</i> , 2011)
<b>Croácia (Zadar)</b> Latitude: 44° 6' N Longitude: 15° 13' E	1/07/2003 até 31/10/2003	Polietileno com TiO <sub>2</sub> e BaSO <sub>4</sub>	1	0,41	20	0,041	1219	484	(MUSELLI <i>et al.</i> , 2009)
<b>Croácia</b> Latitude: 43° 30' N Longitude: 16° 26' E	01/07/2003 até 31/10/2006	Polietileno com TiO <sub>2</sub> e BaSO <sub>4</sub>	1	0,6	9,3	0,019	1219	263	(MUSELLI <i>et al.</i> , 2009)
<b>Croácia (Bisevo)</b> Latitude: 42°56' N Longitude: 16°47' E	22/04/2005 até 25/07/2005	Placas de Policarbonato	15,1 (telhado)	-	11,8	0,200	95	59	(MILETA <i>et al.</i> , 2006)

**Quadro 2.1:** Resumo de alguns estudos utilizando condensadores planares, com resfriamento radiativo passivo (Cont.)

Local	Duração	Material	Área (m <sup>2</sup> )	Máximo rendimento (mm.dia <sup>-1</sup> )	Valor acumulativo de orvalho (mm)	Valor médio (mm dia <sup>-1</sup> )	Número de noites	Noites com orvalho	Fonte
<b>Azerbaijão (Baku)</b> Latitude: 40°22' N Longitude: 49°53' E	1/04/2010 até 31/03/2009	Polietileno com TiO <sub>2</sub> e BaSO <sub>4</sub>	1	-	15	-	356	-	(MEUNIER; BEYSENS, 2016)
<b>Israel (Sde Boqer)</b> Latitude: 30° 52' N Longitude: 34° 47' E	Outono de 2002	Vidro	1	-	-	0,21	-	29	(KIDRON; STARINSKY, 2012)
<b>Líbano (Beiteddine)</b> Latitude: 33° 41' N Longitude: 35° 35' L	Abril – Outubro 2014	Polietileno com TiO <sub>2</sub> e BaSO <sub>4</sub>	1	0,46	-	0,13	180	78	(TOMASZKIEWICZ <i>et al.</i> , 2017)
<b>Índia (Panandhro)</b> Latitude: 23° 35' N Longitude: 68°45' E	Outubro 2005 até abril 2006	Polietileno com TiO <sub>2</sub> e BaSO <sub>4</sub>	1	0,556	12,6	0,2	192	-	(SHARAN <i>et al.</i> , 2011)
<b>Polónia (Cracóvia)</b> Latitude: 50° 3' N Longitude: 19° 56' E	Mai e outubro de 2009	Polietileno	1	0,41	-	0,19	183	80	(MUSKALA <i>et al.</i> , 2015)

**Quadro 2.1:** Resumo de alguns estudos utilizando condensadores planares, com resfriamento radiativo passivo (Cont.)

Local	Duração	Material	Área (m <sup>2</sup> )	Máximo rendimento (mm.dia <sup>-1</sup> )	Valor acumulativo de orvalho (mm)	Valor médio (mm dia <sup>-1</sup> )	Número de noites	Noites com orvalho	Fonte
<b>França (Ajaccio)</b> Latitude: 41°55' N Longitude: 8°44' E	22/07/2000 e 11/11/2001	Polietileno com TiO <sub>2</sub> e BaSO <sub>4</sub>	30	3,8	25,57	0,12	478	214	(MUSELLI et al., 2002)

## Qualidade da água condensada dos sistemas

O orvalho é água destilada e, a princípio, não é contaminado por metais pesados e bactérias maléficas à saúde. Porém, o orvalho é suscetível a absorver e dissolver gases atmosféricos, assim como aerossóis capturados pela superfície condensadora. Dessa forma, a qualidade da água de orvalho é afetada pela qualidade do ar atmosférico e pelas características das superfícies absorvedoras (BEYSENS *et al.*, 2006; SHOHEL *et al.*, 2017).

As características químicas da água de orvalho se diferem de uma região para outra. Estudos realizados no Chile demonstraram que a água de orvalho é bastante corrosiva, com uma alta concentração iônica; já no Japão, é bastante ácida com uma alta concentração de sulfatos e nitratos. Na França e Jordânia, ela é um pouco alcalina e com um comportamento mineral (BEYSENS *et al.*, 2009).

A água de orvalho geralmente possui um pH próximo a 7, podendo, no entanto, atingir valores entre 5,41 a 6,00 em centros urbanos (SHOHEL *et al.*, 2017). Lekouch *et al.* (2010) caracterizou o orvalho coletado em três anos em uma estação meteorológica do Instituto Meteorológico de Zadar (Croácia). Encontrou-se um pH médio de 6,7, e altas concentrações de  $\text{SO}_4^{2-}$  e de  $\text{NO}_3^-$ .

Já a água de orvalho coletada na região costeira de Bhola, Bangladesh, durante o inverno, foi considerada praticamente neutra, pH médio de  $6,8 \pm 0,3$ , com altas concentrações de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ , e  $\text{Cl}^-$ , provavelmente devido contribuições de fontes antropogênicas na região. Dessa forma, este estudo suportou o fato de que as poluições urbanas têm influência significativa na composição química da água de orvalho do local de estudo (SHOHEL *et al.*, 2017).

Estudos realizados por Beysens *et al.* (2006) em Bordeaux, França, e por Lekouch *et al.* (2010) em Zadar, Croácia, indicaram altas concentrações de poluentes atmosféricos na água de orvalho. Segundo (GALEK *et al.*, 2016), as concentrações de poluentes na água de orvalho foram expressivamente maiores do que as da água de chuva em um estudo na Polônia e Jordânia.

A água de orvalho foi considerada própria pra o consumo em diversos estudos. Beysens *et al.* (2009) analisaram a água de orvalho na Croácia entre 1º de julho e 31 de outubro de 2006 e observaram que a água atendia em média os requisitos de água potável da Organização Mundial da Saúde (OMS), exceto para  $\text{Mg}^{+2}$ , uma vez

que sua concentração era cerca de 6 vezes maior que o valor máximo recomendado (0,5 g/L). Apesar disto, a água de orvalho foi considerada tão potável quanto águas de nascente.

Em outro estudo, realizado na área costeira do noroeste da Índia, concluiu-se que apesar da acidez, devido à poeira gerada por uma mina de lignite com intensa atividade de mineração nas proximidades da área de coleta, a água era potável. Porém, apresentava sais dissolvidos com concentrações um pouco acima do estipulado pela ISO 10500 (SHARAN, 2011).

Em seu trabalho, Shohel *et al.* (2017) analisaram os parâmetros pH e condutividade elétrica. Além disso, verificou-se a existência de turbidez, mesmo que mínima, o que indica a presença de materiais sólidos particulados. Porém, após filtração, as amostras apresentaram transparência e ausência de odor.

Dessa forma, observa-se claramente que as condições do local, devido a poluição atmosférica por ações antropológicas, afetam diretamente a qualidade da água de orvalho coletada.

## **2.6.2 Tecnologias com elementos ativos**

Outra tecnologia para a produção de água da atmosfera é a condensação do vapor de água presente na atmosfera utilizando elementos ativos, ou seja, que consomem fontes energéticas externas, como eletricidade. Dentre os elementos ativos mais comuns para tal tem-se os módulos termoelétricos que utilizam princípio do efeito Peltier para refrigerar uma placa.

### **Módulos termoelétricos**

Os módulos termoelétricos, compostos de material semicondutor, tem como princípio de funcionamento o efeito Peltier. Este efeito consiste em uma diferença de temperatura em suas faces quando se aplica uma diferença de potencial nos seus terminais, sendo que essa diferença de temperatura depende da taxa de resfriamento do lado quente. Caso esse resfriamento não seja feito de maneira eficiente, o calor flui para o lado frio e assim, o módulo não alcança o efeito desejado. A potência elétrica necessária para alcançar uma diferença de temperatura de 70°C é de cerca de 80W para um modulo de 40mm x 40mm

(MUÑOZ-GARCÍA *et al.*, 2013). Algumas poucas pesquisas analisaram a eficiência de módulos termoelétricos para desumidificar o ar (VIÁN, ASTRAIN E DOMÍNGUEZ, 2002 ; OLIVEIRA, 2013).

Vián, Astrain e Domínguez (2002) desenvolveram, primeiramente, uma série de simulações computacionais com o objetivo de otimizar a tensão no módulo termoelétrico e no ventilador. Posteriormente, foi construído um protótipo baseado na tecnologia de resfriamento com módulos termoelétricos com uma potência de 100 W. Para temperatura ambiente de 27°C e umidade relativa de 82%, o sistema projetado coletou 0,969 L/dia de água condensada. Já o sistema simulado estimou uma quantidade de 1,4 L/ dia de água. Outro protótipo foi desenvolvido com o auxílio de um sistema automático para controle de temperatura do ar assim como a velocidade do ventilador. O rendimento máximo desse experimento foi de um litro de água por hora de operação durante o dia (NANDY *et al.*, 2014).

Protótipos também são desenvolvidos para coletar uma grande quantidade de água, porém o consumo de energia também é alto. Como exemplo, um protótipo para desumidificar o ar e ao mesmo tempo para destilar água foi projetado por Jradi, Ghaddare Ghali (2011) para produzir dez litros de água por dia, no Líbano. Este protótipo tinha 1,2 metros de altura e era composto por vinte módulos termoelétricos pra desumidificar o ar, integrado com um destilador solar. Em um teste realizado durante o verão, o sistema atingiu o objetivo e produziu pelo menos 10 L de água durante um período de operação de 10 horas. O consumo total de energia variou de 5,32 a 6,73 kWh/dia.

Pensando na irrigação agrícola, um sistema foi desenvolvido para irrigar plantas jovens em períodos mais secos. Dessa forma, um protótipo foi construído com módulos Peltier alimentados por energia fotovoltaica. Observou-se que para umidade relativa menor que 20% a diferença de temperatura não foi alcançada pelo sistema, portanto a umidade relativa do ar precisava ser maior que 20% para que houvesse a condensação de água. Além disso, o sistema é indicado para o funcionamento à noite, especialmente entre cinco e oito da manhã com o objetivo de minimizar o consumo de energia. Utilizando um sistema fotovoltaico de 30Wp como fonte de alimentação e uma bateria de 12V com 17Ah de capacidade,

estimou-se uma quantidade coletada de orvalho de 10ml de água por hora (MUÑOZ-GARCÍA et al., 2013).

O uso de dissipadores na face fria do modulo termoelétrico com o objetivo de aumentar o rendimento do sistema foi discutida em Joshi *et al.* (2017). Utilizando dez módulos de Peltier e um dissipador de calor interno em contato com o lado frio dos módulos, a quantidade máxima de condensado foi de 240 ml, já sem o dissipador, a quantidade coletada de 45 ml durante 10 horas de funcionamento.

Recomenda-se que as tecnologias que utilizam elementos ativos como os módulos termoelétricos, sejam utilizadas apenas no horário noturno, uma vez que durante o dia o ar precisa ser resfriado em uma maior proporção do que quando comparado com o período noturno e, conseqüentemente, um menor consumo de energia para esse resfriamento é necessário.

### **Sistemas de climatização**

A água condensada de sistemas de climatização também pode ser utilizada para complementar os recursos hídricos. Segundo um estudo realizado em hotel na costa dos Emirados Árabes Unidos, um sistema de coleta de água proveniente de equipamentos de climatização do ar minimizaria em média 70,3 m<sup>3</sup>/dia, o que representaria uma economia de água de cerca de 47% (MAGRINI *et al.*, 2017). Durante o uso do ar condicionado com 7200 W, uma quantidade de cerca de 3,042 kg de água pode ser coletada por hora de funcionamento em uma universidade de Chongqing, na China (ZHU *et al.*, 2015).

Já um sistema de resfriamento com coletor de condensado desenvolvido para esse fim em Houston, Texas, Estados Unidos, tem capacidade de gerar 3150 m<sup>3</sup>/ano de água (KHAN; AL-ZUBAIDY, 2013). Em Montgomery, Alabama, USA, um sistema é capaz de gerar 65% da água utilizada em um laboratório, cerca de 3028 m<sup>3</sup>/ano de água. Enquanto isso, um grande sistema desenvolvido em Dubai nos Emirados Árabes Unidos tem capacidade de gerar 37.073 m<sup>3</sup>/ano de água condensada (ALGARNI; SALEEL; MUJEEBU, 2018).

Dessa forma, estudos mostram que sistemas de climatização com área específica destinada a coleta de água são usados em diferentes países com o

objetivo de complementar os recursos hídricos a serem consumidos ou para minimizar o seu uso.

### **Gelo e refrigerador como superfície condensadora**

Uma tecnologia utilizada em alguns estudos no Brasil para condensação do vapor de água é o uso de garrafas PET (Polietileno Tereftalato) com gelo no seu interior. Assim, as garrafas funcionam como uma superfície condensadora. Em seu trabalho Silva e Souza (2009) utilizaram um sistema de três garrafas de 2,5 L cada e com aproximadamente uma área de superfície lateral de 0,1m<sup>2</sup>. No estado da Paraíba, Brasil, foi alcançada uma produção diária de 6 L/m<sup>2</sup> de superfície condensadora com uma temperatura do ar de 25 °C, umidade relativa de 80% e temperatura da superfície de condensação de 6 °C. O consumo de energia gasta para o resfriamento da superfície condensadora não foi calculado.

Além dessa tecnologia, Silva e Souza (2009) utilizaram um congelador com área de 0,36 m<sup>2</sup>, como superfície condensadora. O experimento obteve como resultado uma condensação de 12 L/m<sup>2</sup> durante uma noite com duração de 10 horas. O consumo para essa produção foi de 7,5 kWh.

Essas são algumas das diferentes tecnologias que já foram estudadas e testadas no Brasil, na Paraíba nordeste do Brasil.

### **Comparação inicial de sistemas ativos para coleta de água atmosférica**

Para que as tecnologias que utilizam elementos ativos sejam melhor comparadas, é necessário a adoção de índices gerais de eficiência energética, ou seja, a relação entre a potência elétrica do equipamento e a potência de refrigeração, como a tonelada de refrigeração. Dessa forma, poderá ser analisado a eficiência do sistema, ou seja, o quanto de potência elétrica que é transformado em potência de refrigeração (Equação 2.1).

$$\eta = \frac{W_{ee}}{W_r} \quad (2.1)$$

em que:

$\eta$  = Eficiência energética do sistema (decimal);

$W_{ee}$  = Potência elétrica (W); e  
 $W_r$  = Potência de refrigeração (W).

Porém, dois sistemas podem ter o mesmo índice de eficiência energética e coletarem quantidades bem diferentes de água. Dessa forma, é necessário a análise da relação entre a da potência de refrigeração e a quantidade de água coletada (Equação 2.2).

$$\epsilon = \frac{W_r}{Q_a} \quad (2.2)$$

em que:

$\epsilon$  = Eficiência de produção de água (W/L);  
 $Q_a$  = Quantidade de água coletada (L).  
 $W_r$  = Potência de refrigeração (W).

Assim, dois sistemas podem ser melhor comparados de acordo com seu índice de desempenho. Além disso, o índice de eficiência de extração de água também deve ser analisado, uma vez que uma determinada região pode conter mais vapor de água na atmosfera do que em outra e, conseqüentemente, a captação de água poderá ser maior.

### **2.6.3 Sistemas de captação utilizando materiais porosos**

Algumas tecnologias para a captação de orvalho não são eficientes para umidade relativa baixas, ou seja, abaixo de cerca de 40%. Dessa forma, sistemas que utilizam energia elétrica para resfriar grandes volumes de ar demandam muita energia elétrica quando operam nessas condições. Isso ocorre porque o consumo de energia elétrica aumenta drasticamente quando a temperatura do ar ambiente aumenta e/ou a umidade relativa do ar diminui. Diante desse cenário, estudos tem sido realizados para desenvolvimento de sistemas que sejam capazes de extrair água do ambiente com baixa umidade relativa do ar. Dentre eles, está o sistema composto por material sorvente, ou seja, aquele que possui capacidade de absorver

água, como o zeólito e a sílica gel. Estes sistemas em geral utilizam a energia solar térmica para aquecimento do material, e conseqüentemente a liberação da água armazenada (KIM *et al.*, 2018).

Kim *et al.* (2018) desenvolveram um sistema com uma estrutura de metal orgânica sorvente (MOF-801- *Metal-Organic framework*)  $[[Zr_6O_4(OH)_4(\text{fumarato})_6]$  funcionando em Tempe, Arizona, Estados Unidos, cuja a umidade relativa está entre 10-40%. Com uma eficiência térmica para a conversão em água de 14%, espera-se uma coleta de água de 0,25 L de água por kg de material para um único ciclo no dia. Estudos recentes demonstram que esse tipo de material orgânico (MOF) é muito atrativo, uma vez que ele pode capturar mais água, além de requerer temperaturas mais baixas para regeneração do que os sorventes tradicionais, o que significa economia de energia.

Huang *et al.* (2018) desenvolveram um nano material, utilizando a técnica eletrofiliação, composto por poliacrilonitrila e grafite expandida. Este material tem capacidade de coletar cerca de 179 kg de água/m<sup>2</sup>/dia por dia. Como vantagens, este tipo de material possui uma massa específica menor que o material MOF e uma maior eficiência de captação de água.

## **2.7 Conclusões**

A água de orvalho tem grande potencial para ser utilizada como fonte suplementar de água, tanto para consumo humano quanto para dessedentação animal e irrigação. Porém, a qualidade de água de orvalho depende da qualidade do ar atmosférico, uma vez que contaminação biológica pode ocorrer, pois, em geral, os materiais utilizados para a captação de água, como o plástico, ficam expostos ao meio ambiente. Dessa forma, sistemas de desinfecção devem ser acoplados ao sistema de captação de água garantindo água potável para consumo.

Diversas tecnologias vem sendo utilizadas para captação de água de orvalho, dentre elas, tecnologias passivas como o resfriamento radiativo passivo que vem sendo utilizados em diversos países e apresentam como resultados quantidades consideráveis de água, e tecnologias ativas, como exemplo, o uso de módulos termoelétricos e sistemas de climatização.

Para que tecnologia ativas possam ser devidamente comparadas, é necessário a adoção de índices de eficiência energética e de eficiência de produção de água. Dessa forma, pesquisas para desenvolvimento e inovação na área de captação de água da atmosfera, como o orvalho e a neblina, utilizando métodos passivos poderiam ser melhor exploradas.

Apesar de o Brasil possuir regiões com longos períodos de seca, a prática de captação de água do ar atmosférico praticamente não é adotada. Alguns estudos e protótipos tem sido desenvolvidos no país utilizando principalmente elementos ativos. Já a tecnologia de resfriamento radiativo, simples, sem consumo de energia suplementar e que apresenta bons rendimentos em outras regiões do mundo, não é praticada no país até o momento.

Embora a captação de água da atmosfera se demonstra ser uma fonte não convencional de água muito promissora, estudos e investimentos devem ser realizados com o objetivo de aumentar o rendimento de orvalho e de estimar o rendimento de orvalho para elaboração de projetos com diferentes geometrias da superfície condensadora. Por meio desses estudos, o consumo de água de orvalho poderá ser maximizado, assim como a conscientização do uso da água para redução do consumo de recursos hídricos.

## 2.8 Referências bibliográficas

ABAS - Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. *Águas subterrâneas, o que são?* Disponível em: <<http://www.abas.org/educacao.php>>. Acesso em: 31 out. 2018.

AGAM, N.; BERLINER, P. R. Dew formation and water vapor adsorption in semi-arid environments - A review. **Journal of Arid Environments**, v. 65, n. 4, p. 572–590 [doi:10.1016/j.jaridenv.2005.09.004](https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.09.004).

ALGARNI, S.; SALEEL, C. A.; MUJEEBU, A. M. Air-conditioning condensate recovery and applications—Current developments and challenges ahead. **Sustainable Cities and Society**, v. 37, p. 263–274, 2018. [doi:10.1016/j.scs.2017.11.032](https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.11.032).

ALNASER, W. E.; BARAKAT, A. Use of condensed water vapour from the atmosphere for irrigation in Bahrain. **Applied Energy**, v. 65, n.1–4, p. 3–18 , 2000, [doi:10.1016/S0306-2619\(99\)00054-9](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(99)00054-9).

BATISHA, A. F. Feasibility and sustainability of fog harvesting. **Sustainability of Water Quality and Ecology**, v. 6, p. 1–10 , 2015, [doi:10.1016/j.swaqe.2015.01.002](https://doi.org/10.1016/j.swaqe.2015.01.002).

BEYSENS, D. The formation of dew. **Atmospheric Research**, v. 39, n. 1–3, p. 215–237 ,1995, [doi:10.1016/0169-8095\(95\)00015-J](https://doi.org/10.1016/0169-8095(95)00015-J).

BEYSENS, D.; MILIMOUK, I.; NIKOLAYEV, V.; MUSELLI, M.; MARCILLAT, J. Using radiative cooling to condense atmospheric vapor: a study to improve water yield. **Journal of Hydrology**, v. 276, p. 1–11 , 2003, [doi:10.1016/S0022-1694\(03\)00025-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00025-8).

BEYSENS, D.; MUSELLI, M.; NIKOLAYEV, V.; NARHE, R.; MILIMOUK, I. Measurement and modelling of dew in island, coastal and alpine areas. **Atmospheric Research**, v. 73, n. 1–2, p. 1–22 , 2005, [doi:10.1016/j.atmosres.2004.05.003](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2004.05.003).

BEYSENS, D.; OHAYON, C.; MUSELLI, M.; CLUS, O. Chemical and biological characteristics of dew and rain water in an urban coastal area (Bordeaux, France). **Atmospheric Environment**, v. 40, n. 20, p. 3710–3723 , 2006, [doi:10.1016/j.atmosenv.2006.03.007](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.03.007).

BEYSENS, D.; LEKOUCH, I.; MILETA, M.; MILIMOUK, I.; MUSELLI, M. Dew and rain water collection in South Croatia. **International Journal of Civil and Environmental Engineering**, v. 1, n. 2, p. 64–70 , 2009.

BEYSENS, D.; BROGGINI, F.; MILIMOUK-MELNYTCHOUK, I.; OUAZZANI, J.; TIXIER, N. New architectural forms to enhance dew collection. **Chemical Engineering Transactions**, v. 34, p. 79–84, 2013, [doi:10.3303/CET1334014](https://doi.org/10.3303/CET1334014).

BEYSENS, D. Estimating dew yield worldwide from a few meteo data. **Atmospheric Research**, v. 167, p. 146–155 , 2016, [doi:10.1016/j.atmosres.2015.07.018](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.07.018).

CHEN, G.F.; CAI, D.S. Water harvested from the air combined with solar power, shade and light providing system: Conception of water-saving irrigation. **Procedia Environmental Sciences**, v. 13, n. 2011, p. 1003–1009 , 2012, [doi:10.1016/j.proenv.2012.01.093](https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.01.093).

CHEN, Z.; ZHU, L.; RAMAN, A.; FAN, S. Radiative cooling to deep sub-freezing temperatures through a 24-h day-night cycle. **Nature Communications**, v. 7, p. 1–5 , 2016, [doi: 10.1038/ncomms13729](https://doi.org/10.1038/ncomms13729).

CLUS, O.; OUAZZANI, J.; MUSELLI, M.; NIKOLAYEV, V.S.; SHARAN, G.; BEYSENS, D. Comparison of various radiation-cooled dew condensers using computational fluid dynamics. **Desalination**, v. 249, n. 2, p. 707–712 , 2009, [doi:10.1016/j.desal.2009.01.033](https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.01.033).

DRIP. **The D.R.I.P.S. Project**. Disponível em: [<http://dripsproject.com/>](http://dripsproject.com/). Acesso em: 5 abr. 2018.

FERNANDEZ, D. M.; TORREGROSA, A.; WEISS-PENZIAS, P.S.; ZHANG, B.J.; SORENSEN, D.; COHEN, R.E.; McKinley, G.H; KLEINGARTNER, J.; OLIPHANT, A.; BOWMAN, M. Fog water collection effectiveness: Mesh intercomparisons. **Aerosol and Air Quality Research**, v. 18, n. 1, p. 270–283 , 2018, [doi: 10.4209/aaqr.2017.01.0040](https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.01.0040).

FESSEHAYE, M.; ABDUL-WAHAB, S.A.; SAVAGE, M.J.; KOHLER, T.; GHEREZGHIHER, T.; HURNI, H. Fog-water collection for community use. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 29, p. 52–62 , 2014, [doi: 10.1016/j.rser.2013.08.063](https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.063).

GANESH, V.A.; RANGANATH, A.S.; BAJI, A.; RAUT, H.K.; SAHAY, R.; RAMAKRISHNA, S. Hierarchical Structured Electrospun Nanofibers for Improved Fog Harvesting Applications. **Macromolecular Materials and Engineering**, v. 302, n. 2, p. 1–7 , 2017, [doi: 10.1002/mame.201600387](https://doi.org/10.1002/mame.201600387).

GIDO, B.; FRIEDLER, E.; BRODAY, D. M. Assessment of atmospheric moisture harvesting by direct cooling. **Atmospheric Research**, v. 182, p. 156–162 , 2016, [doi: 10.1016/j.atmosres.2016.07.029](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.07.029).

GLOBO RURAL. *Empresa israelense cria coletor de orvalho para irrigação*. Disponível em: <http://revistagloborural.globo.com/GloboRural/0,6993,EEC1701300-1641,00.html>>. Acesso em: 8 abr. 2018.

GRECCO, F. T.; WIDERSKI, R.; SOARES, J.R.; CORÁ, M.B. Projeto Warka Water : um estudo sobre viabilidade de coleta de água através do orvalho na cidade de Campo Mourão – Warka Water project : a study of dew water and its viability in the city of Campo Mourão – PR. **Engvista**, v. 19, n. 5, p. 1251–1268, 2017.

HILLEL, D.. **Soil and Water: Physical Principles and Processes**. 1.ed. Academic Pr, 1971. 288 p.

HOLMES, R.; RIVERA, J.D. ; JARA, E. Large fog collectors: New strategies for collection efficiency and structural response to wind pressure. **Atmospheric Research**, v. 151, p. 236–249 , 2015, [doi:10.1016/j.atmosres.2014.06.005](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.06.005).

HUANG, Z.X.; LIU, X.; WU, J.; WONG, S.C.; QU, J.P. Electrospinning water harvesters inspired by spider silk and beetle. **Materials Letters**, v. 211, p. 28–31 , 2018, [doi:10.1016/j.matlet.2017.09.072](https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.09.072).

JACOBS, A.F.G.; HEUSINKVELD, B. G.; BERKOWICZ, S. M. Passive dew collection in a grassland area, The Netherlands. **Atmospheric Research**, v. 87, n. 3–4, p. 377–385 , 2008, [doi:10.1016/j.atmosres.2007.06.007](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2007.06.007).

JOSHI, V. P.; KOTHARI, H.A.; MAHAJAN, M.D., CHAUDHARI, M.B.; SANT, K.D. Experimental Investigations on a Portable Fresh Water Generator Using a Thermoelectric Cooler. **Energy Procedia**, v. 109, p. 161–166 , 2017, [doi:10.1016/j.egypro.2017.03.085](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.085).

- JRADI, M.; GHADDAR, N.; GHALI, K. Experimental and theoretical study of an integrated thermoelectric–photovoltaic system for air dehumidification. **International journal of energy research**, n. 2011, p. 135–147 , 2011, [doi:10.1002/er.1848](https://doi.org/10.1002/er.1848).
- KARKEE, M. B. Harvesting of Atmospheric Water: A Promising Low-Cost Technology. **Ninth International Water Technology Conference**, p. 3–14 , 2005.
- KHALIL, B.; ADAMOWSKI, J.; SHABBIR, A.; JANG,C.; ROJAS, M.; REILLY, K.; OZGA-ZIELINSKI, B. A review: dew water collection from radiative passive collectors to recent developments of active collectors. **Sustainable Water Resources Management**, v. 2, n. 1, p. 71–86 , 2016, [doi:10.1007/s40899-015-0038-z](https://doi.org/10.1007/s40899-015-0038-z).
- KHAN, S. A.; AL-ZUBAIDY, S. N. Conservation of Potable Water Using Chilled Water Condensate from Air Conditioning Machines in Hot & Humid Climate. **International Journal of Engineering and Innovative Technology**, v. 3, n. 2, p. 182–188 , 2013.
- KIDRON, G. J.; STARINSKY, A. Chemical composition of dew and rain in an extreme desert (Negev): Cobbles serve as sink for nutrients. **Journal of Hydrology**, v. 420–421, p. 284–291 , 2012, [doi:10.1016/j.jhydrol.2011.12.014](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.12.014).
- KIM, H.; RAO, S.R.; KAPUSTIIN, E.A.; ZHAO, L.; YANG, S.; YAGHI, O.M.; WANG, E.N. Adsorption-based atmospheric water harvesting device for arid climates. **Nature Communications**, v. 9, n. 1, p. 1–8 , 2018, [doi:10.1038/s41467-018-03162-7](https://doi.org/10.1038/s41467-018-03162-7).
- KONRAD, W.; BURKHARDT, J.; EBNER, M.; ROTH-NEBELSICK, A. Leaf pubescence as a possibility to increase water use efficiency by promoting condensation. **Ecohydrology**, v. 8, n. 3, p. 480–492 , 2015, [doi: 10.1002/eco.1518](https://doi.org/10.1002/eco.1518).
- KOUNOUHEWA, B.; AWANOU, C. N. Evaluation of the amount of the atmospheric humidity condensed naturally. **Renewable Energy**, v. 18, p. 223–247 , 1999.
- LEKOUCH, I.; MILETA, M.; MISELLI, M.; MILIMOUK-MELNYTCHOUK,I.; SOJAT, V.; KABBACHI,B.; BEYSENS, D. Comparative chemical analysis of dew and rain water. **Atmospheric Research**, v. 95, n. 2–3, p. 224–234 , 2010, [doi: 10.1016/j.atmosres.2009.10.002](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.10.002).
- LEKOUCH,I.; LEKOUCH, K.; MUSELLI, M.; MONGRUEL, A.; KABBACHI, B.; BEYSENS, D. Rooftop dew, fog and rain collection in southwest Morocco and predictive dew modeling using neural networks. **Journal of Hydrology**, v. 448–449, p. 60–72 , 2012, [doi:10.1016/j.jhydrol.2012.04.004](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.004).
- MAESTRE-VALERO, J. F.; MARTINEZ-ALVAREZ, V.; BAILLE, A.; MARTINZ-GORRIZ, B.; GALLEGO-ELVIRA, B. Comparative analysis of two polyethylene foil materials for dew harvesting in a semi-arid climate. **Journal of Hydrology**, v. 410, n. 1–2, p. 84–91 , 2011, [doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.09.012](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.09.012).

MAGRINI, A.; CATTANI, L.; CARTESEGNA, M.; MAGNANI, L. Water Production from Air Conditioning Systems: Some Evaluations about a Sustainable Use of Resources. **Sustainability**, v. 9, n. 8, p. 1309 , 2017, [doi: 10.3390/su9081309](https://doi.org/10.3390/su9081309).

MEUNIER, D.; BEYSENS, D. Dew, fog, drizzle and rain water in Baku (Azerbaijan). **Atmospheric Research**, v. 178–179, p. 65–72 , 2016, [doi: 10.1016/j.atmosres.2016.03.014](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.03.014).

MIDDLETON, N. **Deserts: A Very Short Introduction**. Oxford University Press, Oxford, p. 135, 2009.

MILETA, M.; BEYSENS, D.; NIKOLAYEV, V.; MILIMOUK, I.; CLUS, O.; MUSELLI, M. Fog and Dew Collection Projects in Croatia. **International Conference on “Water Observation and Information System for Decision Support”** (BALWOIS 2006), Ohrid, Macedonia, 2006.

MONTECINOS, S.; CARVAJAL, D.; CERECEDA, P.; CONCHA, M. Collection efficiency of fog events. **Atmospheric Research**, v. 209, p. 163–169 , 2018, [doi: 10.1016/j.atmosres.2018.04.004](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.04.004).

MOREIRA, P.S.P; DALLACORT, R.; GALVANIN, E.A.S.; NEVES, R.J.; CARVALHO, M.A.C.; BARBIERI, J.D. Ciclo diário de variáveis meteorológicas nos biomas do estado de Mato Grosso. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, n. 11, p. 173–188 , 2015, [doi: 10.5380/abclima.v17i0.41159](https://doi.org/10.5380/abclima.v17i0.41159).

MUÑOZ-GARCÍA, M. A.; MOREDA, G. P.; RAGA- ARROYO, M. P.; MARÍN-GONZÁLEZ, O. Water harvesting for young trees using Peltier modules powered by photovoltaic solar energy. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 93, p. 60–67 , 2013, [doi: 10.1016/j.compag.2013.01.014](https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.01.014).

MUSELLI, M.; BEYSENS, D.; MARCILLAT, J.; MILIMOUK, I.; NILSSON, T.; LOUCHE, A. Dew water collector for potable water in Ajaccio (Corsica Island, France). **Atmospheric Research**, v. 64, n. 1–4, p. 297–312 , 2002, [doi: 10.1016/S0169-8095\(02\)00100-X](https://doi.org/10.1016/S0169-8095(02)00100-X).

MUSELLI, M.; BEYSENS, D.; MILETA, M.; MILIMOUK, I. Dew and rain water collection in the Dalmatian Coast, Croatia. **Atmospheric Research**, v. 92, n. 4, p. 455–463 , 2009, [doi: 10.1016/j.atmosres.2009.01.004](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.01.004).

MUSKALA, P.; SOBIK, M.; BLAS, M.; POLKOWSKA, Z.; BOKWA, A. Pollutant deposition via dew in urban and rural environment. **Atmospheric Research**, v. 151, p. 110-119, 2015, [doi: 10.1016/j.atmosres.2014.05.028](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.05.028)

NANDY, A.; SAHA, S.; GANGULY, S.; CHATTOPADHYAY, S. A Project on Atmospheric Water Generator with the Concept of Peltier Effect. **International Journal of Advanced Computer Research**, v. 4, n. 15, p. 481 , 2014.

NILSSON, T. M. J.; VARGAS, W.E.; NIKLASSON, G.A.; GRANQVIST, C.G. Condensation of water by radiative cooling. **Renewable Energy** v. 5, n. 1-4 p. 310–

317 , 1994, [doi: 10.1016/0960-1481\(94\)90388-3](https://doi.org/10.1016/0960-1481(94)90388-3).

NILSSON, T. Initial experiments on dew collection in Sweden and Tanzania. **Solar Energy Materials and Solar Cells** v. 40, n. 1, p. 23–32 , 1996, [doi: 10.1016/0927-0248\(95\)00076-3](https://doi.org/10.1016/0927-0248(95)00076-3).

OLIVEIRA, M. C. C. **Desenvolvimento e análise técnica e econômica de um condensador de vapor atmosférico utilizando tecnologias termelétrica e solar fotovoltaica**. Dissertação de Mestrado no curso de Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Itajubá. Itajubá. 2013.

OPUR - ORGANIZATION FOR DEW UTILIZATION. **OPUR**. Disponível em: <<http://www.opur.fr/>>. Acesso em: 3 maio 2018.

PERGORI, J. **A nebulosidade e o ar abafado**. 2016. Disponível em: <<https://www.climatempo.com.br/noticia/2016/01/16/a-nebulosidade-e-o-ar-abafado-4324>>. Acesso em: 27 aug. 2018.

RICHARDS, K. Adaptation of a leaf wetness model to estimate dewfall amount on a roof surface. **Agricultural and Forest Meteorology** v. 149, n. 8, p. 1377–1383 , 2009, [doi: 10.1016/j.agrformet.2009.02.014](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.02.014).

SHARAN, G.; CLUS, O.; SINGH, S.; MESELLI, M.; BEYSENS, D. A very large dew and rain ridge collector in the Kutch area (Gujarat, India). **Journal of Hydrology** v. 405, n. 1–2, p. 171–181 , 2011, [doi:10.1016/j.jhydrol.2011.05.019](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.05.019).

SHARAN, G.; ROY, A.K.; ROYON, A.; BEYSENS, D. Dew plant for bottling water. **Journal of Cleaner Production** v. 155, p. 83–92 , 2017, [doi:10.1016/j.jclepro.2016.07.079](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.079).

SHARAN, G. Harvesting dew with radiation cooled condensers to supplement drinking water supply in semi-arid coastal northwest India. **International Journal for Service Learning in Engineering** v. 6, n. 1, p. 130–150 , 2011.

SHOHEL, M.; SIMOL, H. A.; REID, E.; REID, J.S.; SALAM, A. Dew water chemical composition and source characterization in the IGP outflow location (coastal Bhola, Bangladesh). **Air Quality, Atmosphere and Health** v. 10, n. 8, p. 981–990 , 2017, [doi:10.1007/s11869-017-0487-7](https://doi.org/10.1007/s11869-017-0487-7).

SILVA, G.; SOUSA, F. A. S. Estudo da viabilidade da produção de água a partir do resfriamento do ar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v. 13, n. 5, p. 575–580 , 2009.

SPEETJENS, S. L.; STIGTER, J. D.; VAN STRATEN, G. Physics-based model for a water-saving greenhouse. **Biosystems Engineering** v. 105, n. 2, p. 149–159, 2010, [doi: 10.1016/j.biosystemseng.2009.06.026](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.06.026).

STONE, E. C. The Ecological Importance of Dew. **The Quarterly Review of Biology** v. 38, n. 4, p. 328–341 , 1963.

TAL-YA AGRICULTURE SOLUTIONS. **Tal-Ya Agriculture Solutions**. Disponível em: <<http://www.tal-ya.com/how-does-it-work/>>. Acesso em: 8 abr. 2018.

TOMASZKIEWICZ, M.; NAJM, M. A.; ZURAYK, R.; EL-FADEL, M. Dew as an adaptation measure to meet water demand in agriculture and reforestation. **Agricultural and Forest Meteorology** v. 232, p. 411–421 , 2017, [doi: 10.1016/j.agrformet.2016.09.009](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.09.009).

TOMASZKIEWICZ, M.; NAJM, M. A.; BEYSENS, D.; ALAMEDDINE, I.; EL-FADEL, M. Dew as a sustainable non-conventional water resource: a critical review. **Environmental Reviews** v. 23, n. 4, p. 425–442 , 2015, [doi: 10.1139/er-2015-0035](https://doi.org/10.1139/er-2015-0035).

VIÁN, J. G.; ASTRAIN, D.; DOMÍNGUEZ, M. Numerical modelling and a design of a thermoelectric dehumidifier. **Applied Thermal Engineering** v. 22, n. 4, p. 407–422, 2002, [doi:10.1016/S1359-4311\(01\)00102-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(01)00102-8).

WARKA WATER. **Warka water Every drop counts**. Disponível em: <<http://www.warkawater.org/>>. Acesso em: 9 abr. 2018.

WATER ALL SOLUTION. **Tal- Ya Agriculture Solutions**. Disponível em: <<http://waterall.com.br/nossa-atuacao/agricultura/talya/>>. Acesso em: 8 abr. 2018.

ZANGVIL, A. Six years of dew observations in the Negev Desert, Israel. **Journal of Arid Environments** v. 32, n. 4, p. 361–371, 1996, [doi: 10.1006/jare.1996.0030](https://doi.org/10.1006/jare.1996.0030).

ZHU, X.; WU, J; TAN, Y.; HUANG, C.; LI, H.; CAO, L.; LIU, Z. Air-conditioning condenser integrated with a spray system utilizing condensate water. **ASTRU innovative power engineering conference**, Perm, Russia, 2013.

## **Capítulo 3: Estimativa da captação de orvalho por meio de resfriamento radiativo passivo e avaliação do seu potencial para uso na agricultura**

### **3.1 Introdução**

A preocupação com a depleção e a distribuição desigual dos recursos hídricos fazem com que fontes complementares de água sejam estudadas e com que projetos sejam desenvolvidos, especialmente em áreas que possuem escassez de água. Estima-se que em 2025 haverá cerca de 3 bilhões de pessoas em países em desenvolvimento sem acesso adequado água (VUOLLEKOSKI *et al.*, 2015).

A captação de água pluvial possui um grande potencial como fonte complementar de água, porém, em regiões onde a chuva é um evento infrequente, o orvalho e a neblina se tornam importantes fontes complementares de água. Muitas plantas que vivem em ambientes secos suprem suas demandas hídricas com o orvalho e/ou com a neblina (WHITE; SARKAR; KIETZIG, 2013). Portanto, diferentes tecnologias são estudadas para coletar o vapor de água presente no ar atmosférico com o objetivo de utilizá-lo como fonte suplementar de água.

Embora a quantidade de água presente no ar seja pequena e as tecnologias desenvolvidas para a captação dessa água sejam caras e muitas vezes sofisticadas do ponto de vista tecnológico, o vapor de água poder ser uma solução em locais secos que não existam outras fontes de água próximas ou que possuam regime de chuvas mais imprevisíveis, podendo ser utilizado tanto para consumo humano quanto para a agricultura (VUOLLEKOSKI *et al.*, 2015).

Uma tecnologia muito utilizada em diferentes lugares do planeta para captação de orvalho é a tecnologia de resfriamento radiativo passivo. Esta tecnologia utiliza uma superfície condensadora com características especiais que favorecem o resfriamento da mesma e, conseqüentemente, a condensação do vapor de água. O potencial de resfriamento da superfície condensadora é limitado a apenas alguns graus. Dessa forma, esse método exige uma alta umidade relativa para que ocorra a condensação de vapor de água na superfície. Além disso, ventos com velocidade, menores do que 4,4 m/s podem ajudar na condensação, uma vez que levam ar úmido para a superfície (BEYSENS, 2016; TOMASZKIEWICZ *et al.*, 2016).

Muitos estudos analisam rendimento de orvalho, por meio dessa tecnologia, utilizando como superfície condensadora uma folha plástica na cor branca de polietileno de baixa densidade com microesferas de dióxido de titânio (TiO<sub>2</sub>) e hidróxido de bário (BaSO<sub>4</sub>). Este material é fabricado especialmente pela OPUR (*International Organization for Dew Utilization*) (BEYSENS *et al.*, 2013; CLUS *et al.*, 2008; MUSELLI *et al.*, 2009; SHARAN, 2011; TOMASZKIEWICZ *et al.*, 2017).

Entretanto, diferentes materiais como o plástico preto, largamente utilizado em horticultura, alumínio e vidro, também já foram testados como superfície de condensação (KIDRON; STARINSKY, 2012; MAESTRE-VALERO *et al.*, 2011).

Estimativas de rendimento de orvalho, considerando diferentes condições meteorológicas e tecnologias, são de extrema importância para a avaliação do potencial do orvalho como fonte suplementar de água. A tecnologia do resfriamento radiativo passivo é de fácil utilização, portanto, muitos estudos com a finalidade de avaliar a quantidade de água coletada são realizados utilizando esta tecnologia.

Em seu estudo, Maestre-Valero *et al.* (2012) desenvolveram um modelo, baseado no balanço de energia durante a noite, com o objetivo de estimar a temperatura da superfície condensadora e rendimento da produção de orvalho, tanto para o plástico preto, quanto para o plástico branco, considerado como um plástico padrão, desenvolvido pela OPUR. Como resultado, obtiveram que o modelo proposto previu razoavelmente a temperatura da superfície e o rendimento de orvalho todas as noites para dados de umidade relativa maior que 80%. A seleção da faixa de umidade em estudo foi apropriada para a avaliação do modelo feita na região de Cartagena, Espanha.

Lekouch *et al.* (2012) desenvolveram um modelo, utilizando redes neurais artificiais, para prever a quantidade de orvalho que poderia ser coletado, em vários locais em Marrocos. A avaliação deste modelo demonstrou que eventos com uma moderada quantidade de orvalho eram razoavelmente estimados, já eventos com maior quantidade de orvalho eram subestimados, e eventos sem orvalho eram satisfatoriamente estimados como sem rendimento, na maioria dos casos.

Além desses métodos de estimativas, a fluidodinâmica computacional, é de extrema importância, uma vez que pode ser utilizado para diferentes geometrias, especialmente as côncavas, também foi utilizada para analisar a capacidade de

resfriamento dos condensadores. Assim, realizou-se um estudo comparativo entre diferentes geometrias de superfície condensadora, dentre elas um condensador plano com 1m<sup>2</sup> e 30° de inclinação, considerado como padrão, e um condensador em formato de funil de 7,3 m<sup>2</sup> de superfície condensadora. Observou-se que o funil teve uma capacidade de refrigeração cerca de 40 % maior quando comparada com o condensador padrão (CLUS et al., 2009).

Partindo do pressuposto de que a temperatura do ar, a temperatura de ponto de orvalho, umidade relativa, velocidade do ar e nebulosidade estão fortemente relacionadas com o potencial de captação de orvalho e são variáveis mundialmente e comumente medidas em estações meteorológicas, Beysens (2016) propôs uma equação para estimar o rendimento de orvalho, considerando superfícies de condensação planas com emissividade unitária, localizadas a 1 m acima do solo e isoladas termicamente. A equação foi testada em dez lugares com diferentes climas. Dessa forma, esse modelo, demonstrou potencial para ser utilizado em diversos lugares do mundo, assim como, para o desenvolvimento de mapas em escala mundial para estimativa da produção de orvalho.

Como exemplo, Tomaszewicz *et al.* (2016) desenvolveram um atlas de rendimento de orvalho para a região do Mediterrâneo com base em dados de estações meteorológicas durante o período de seca do ano de 2013 e utilizando a equação proposta por Beysens (2016).

### **3.2 Objetivos**

Estimar o rendimento da captação de orvalho, utilizando o resfriamento radiativo passivo para o município de Viçosa- MG durante o período noturno e avaliar a sua utilização na irrigação de pequenos vegetais (cenoura, alface e couve-flor), cana de açúcar, feijão e as culturas oleaginosas (girassol e mamona), todos na fase inicial de desenvolvimento.

### **3.3 Metodologia**

#### **3.3.1 Local de estudo**

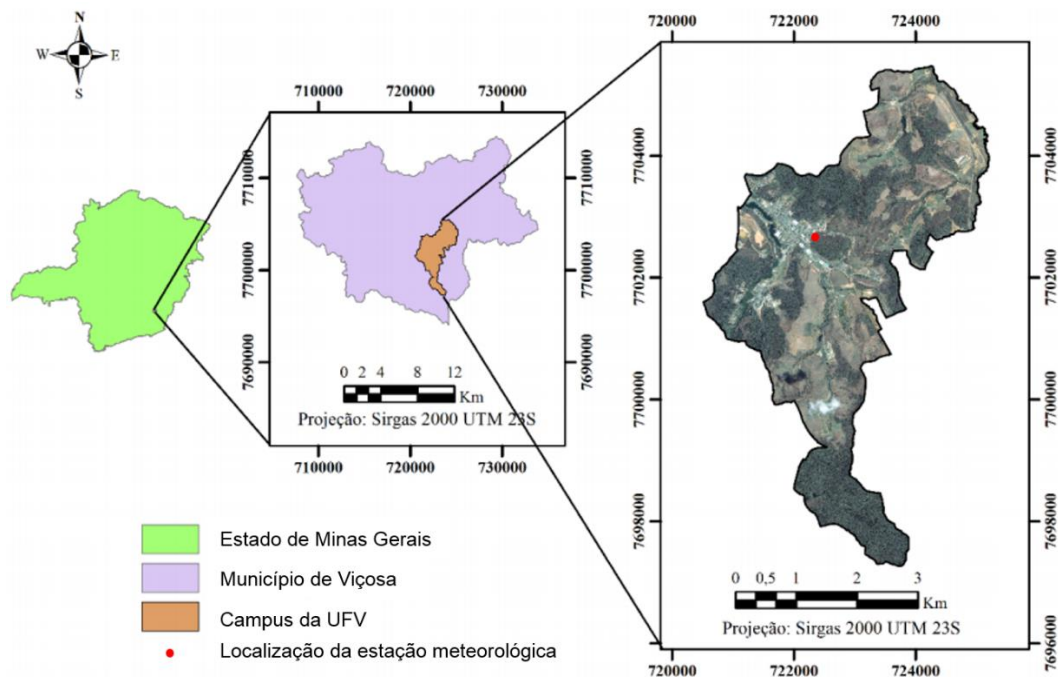
A estimativa de rendimento de orvalho foi realizada para a cidade de Viçosa, Minas Gerais, Brasil, localizada na zona da mata mineira. O clima de Viçosa,

segundo a classificação climática de Köppen, é do tipo Cwb, ou seja, mesotérmico, verões chuvosos e invernos secos. A umidade relativa média anual do ar é de cerca de 81% e a temperatura média anual é de 20 °C (LORENZON; DIAS; TONELLO, 2015).

Apesar da cidade possuir uma precipitação média anual de aproximadamente 1.200 mm, Viçosa geralmente presencia um *déficit* hídrico entre maio e setembro e um excedente hídrico entre dezembro e março (VIANA *et al.*, 2016). Portanto, o município necessita de fontes suplementares de água para complementar a demanda hídrica e por isto, a importância em se estudar o potencial de captação de orvalho nesta cidade.

### 3.3.2 Análise variáveis meteorológicas

Os dados meteorológicos utilizados para este estudo foram provenientes das estações meteorológicas automática e convencional, ambas situadas no campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa, MG, 20°77' de latitude sul, 42°87' de longitude oeste e 665 metros de altitude, Figura 3.1. Os dados foram obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2018).



**Figura 3.1:** Localização do campus e da estação meteorológica da UFV.

**Fonte:** ALMEIDA *et al.* (2016), adaptado.

Analisou-se a diferença média mensal entre a temperatura do ar ambiente e a temperatura do ponto de orvalho durante o período entre vinte e três horas e seis da manhã, na cidade de Viçosa, Minas Gerais, durante o período de 01 de janeiro de 2006 a 31 de dezembro de 2017, *i. e.* doze anos. Além disso, analisou-se as médias mensais da velocidade e direção do vento e da umidade relativa do ar durante esse horário, uma vez que estas variáveis meteorológicas também influenciam na formação de orvalho.

Também foi analisado o comportamento horário da temperatura média do ar ambiente e da temperatura média de ponto de orvalho para as quatro estações do ano, considerando: outono (21 de março a 21 de junho), inverno (22 de junho a 22 de setembro), primavera (23 de setembro a 21 de dezembro) e verão (22 de dezembro a 20 de março de 2019). Este estudo foi realizado com o objetivo de analisar o comportamento destas variáveis ao longo do dia e sua influência no uso de tecnologias de captação de orvalho por meio do resfriamento radiativo passivo.

### **Disponibilidade hídrica na atmosfera em Viçosa-MG**

Analisou-se a razão de mistura e a densidade do ar utilizando o Programa *PsyCalculator*, registrado no Instituto Nacional da Propriedade Intelectual, BR512018001063-6, de autoria de Larissa Carolina Corraide da Silva, Delly Oliveira Filho, Arthur Caio Vargas e Pinto e Matheus Araújo Lima Diniz, para a estimativa da quantidade de água presente na atmosfera em Viçosa-MG (Apêndice A). Por meio da umidade absoluta, velocidade do vento e período de tempo, pode-se estimar a disponibilidade hídrica na atmosfera de Viçosa por unidade de área durante o período noturno (Equação 3.1) (SILVA *et al.*, 2010).

$$M = U_a v \Delta T \quad (3.1)$$

em que,

M = Massa de água disponível (kg/m<sup>2</sup>);

U<sub>a</sub> = Umidade absoluta (kg vapor de água /m<sup>3</sup> ar seco);

- v = Velocidade do vento (m/s); e  
 $\Delta T$  = Intervalo de tempo em análise (s).

Assim, estimou-se a disponibilidade hídrica em Viçosa durante o período noturno considerando o período de análise de 23 horas às 06 horas.

### 3.3.3 Estimativa do potencial de orvalho

Por meio do modelo (Equação 3.2) desenvolvido por Beysens (2016), avaliou-se o rendimento de orvalho durante o período de 01 de janeiro de 2006 a 31 de dezembro de 2017. O modelo proposto estima a quantidade de orvalho produzida considerando um período noturno de 12 horas.

$$R_e = \left\{ 0,37 [1 + 0,204323 H - 0,0238893 H^2 - (18,0123 - 1,04963 H + 0,21891 H^2) 10^{-3} T_o] \left( \frac{T_o + 273,15}{285} \right)^4 \left( 1 - \frac{N}{8} \right) \right\} + [0,06(T_o - T_a)] \left( 1 + 100 \left\{ 1 - e^{\left( -\left( \frac{V}{V_o} \right)^{20} \right)} \right\} \right) \quad (3.2)$$

0, se  $R_e < 0$ .

em que,

- $R_e$  = Rendimento de orvalho durante a noite, considerando 12 horas ( $\text{mm/m}^2$ );  
H = Elevação do local (km);  
 $T_o$  = Temperatura de Ponto de Orvalho ( $^{\circ}\text{C}$ );  
 $T_a$  = Temperatura do ar ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ );  
N = Cobertura da nuvem (oktas);  
V = Velocidade do vento (m/s) a 10 m de elevação; e  
 $V_o$  = Velocidade do vento de 4,4 m/s (velocidade máxima para a formação de orvalho, (BEYSENS, 2016)).

A unidade da nebulosidade utilizada na Equação 3.2 é oktas, ou seja é expressa em oitavos para indicar a fração do céu coberta por nuvens. Quando o céu está limpo, tem-se zero oitavos de nebulosidade, quando está coberto por completo, tem-se oito oitavos de nebulosidade. Já a nebulosidade analisada pelo operador da estação convencional de Viçosa era realizada em décimos, ou seja, de zero a dez. Portanto, foi necessário realizar a conversão da unidade da nebulosidade em décimos para a nebulosidade em oitavos. O Quadro 3.1 mostra os valores de nebulosidade em décimos que correspondem aos valores de nebulosidade em oktas, adotados nessa pesquisa, conforme a Equação 3.3.

**Quadro 3.1:** Conversão de nebulosidade de decimal para oktas

Decimal	Oktas
0	0
1	1
2	2
3	3
4	4
5	5
6	6
7	7
8	8
9	9
10	10

$$N_o = \frac{N_d}{10} 8 \quad (3.3)$$

em que,

$N_o$  = Cobertura da nuvem (oktas); e

$N_d$  = Cobertura da nuvem (décimos).

Os valores de nebulosidade proveniente da estação meteorológica não são de hora em hora. Eles são medidos apenas às 09 horas, 15 horas e 21 horas. Dessa forma, estimou-se o rendimento de orvalho coletado, considerando a nebulosidade do céu na hora em análise, como sendo o último valor de nebulosidade observado. Além disso, para o cálculo horário do rendimento de orvalho, foi necessário

redimensionar os dados de acordo com a Equação 3.4, uma vez que a equação de estimativa de rendimento de orvalho 3.2 é feita para um período de 12 horas.

$$R_{eT} = \frac{T}{B} R_e \quad (3.4)$$

em que,

- $R_e$  = Rendimento de orvalho durante a noite, considerando um período noturno de 12 horas (mm/dia);
- $B$  = Período completo de análise de 12 horas/dia
- $T$  = Período de análise (horas/dia); e
- $R_{eT}$  = Rendimento de orvalho, considerando T horas (mm/dia).

### 3.3.4 Potencial de orvalho para uso na irrigação

O método utilizado para se estimar a evapotranspiração foi o FAO Penman-Monteith (Equação 3.5) (ALLEN *et al.*, 1998).

Os dados meteorológicos da cidade de Viçosa foram utilizados para o cálculo da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>). Já a evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>), pôde ser estimada multiplicando o coeficiente da cultura (K<sub>c</sub>) pela evapotranspiração de referência, usado tanto para expressar a transpiração da planta quanto a evaporação do solo em um mesmo coeficiente (FARG *et al.*, 2012). Os cálculos de evapotranspiração foram realizados de acordo com o passo a passo descrito por Zotarelli *et.al* (2010).

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34u_2)} \quad (3.5)$$

em que,

- ET<sub>o</sub> = Evapotranspiração de referência (mm/d);
- $R_n$  = Saldo de radiação na superfície (MJ/m<sup>2</sup>/dia) (Equação 3.6);

- G = Fluxo de calor no solo, considerado 0 para um período de 24 horas (MJ/m<sup>2</sup>/d) (ALLEN et al., 1998);
- $\gamma$  = Coeficiente psicrométrico (kPa/ °C) (Equação 3.17);
- T = Temperatura média diária (°C); (Equação 3.18)
- u<sub>2</sub> = Velocidade do vento a 2 metros (m/s) (Equação 3.19);
- e<sub>s</sub> = Pressão de saturação de vapor (kPa) (Equação 3.20);
- e<sub>a</sub> = Pressão de vapor atual do ar (kPa) (Equação 3.9); e
- $\Delta$  = Declividade da curva de pressão de vapor de saturação (kPa/ °C) (Equação 3.21).

$$R_n = R_c + R_l \quad (3.6)$$

em que,

- R<sub>n</sub> = Saldo de radiação (MJ/m<sup>2</sup>/dia);
- R<sub>c</sub> = Radiação de onda curta (MJ/m<sup>2</sup>/dia) (Equação 3.7); e
- R<sub>l</sub> = Radiação de onda longa (MJ/m<sup>2</sup>/dia) (Equação 3.8).

$$R_c = (1 - \alpha) R_g \quad (3.7)$$

em que,

- R<sub>c</sub> = Radiação de onda curta (MJ/m<sup>2</sup>/dia);
- $\alpha$  = Albedo (0,23 – grama); e
- R<sub>g</sub> = Radiação global (MJ/m<sup>2</sup>/dia).

$$R_l = \sigma \left[ \frac{(T_{max} + 273.16)^4 + (T_{min} + 273.16)^4}{2} \right] (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) \left[ 1.35 \frac{R_g}{R_{so}} - 0.35 \right] \quad (3.8)$$

em que,

- R<sub>l</sub> = Radiação de onda longa (MJ/m<sup>2</sup>/dia);

- $T_{max}$  = Temperatura máxima do dia ( $^{\circ}C$ );  
 $T_{min}$  = Temperatura mínima do dia ( $^{\circ}C$ );  
 $\sigma$  = Constante Stefan-Boltzmann ( $4,903 \times 10^{-9} \text{ MJ} \cdot \text{K}^{-4} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ );  
 $e_a$  = Pressão de vapor atual do ar (kPa) (Equação 3.9);  
 $R_g$  = Radiação global ( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{dia}$ ); e  
 $R_{so}$  = Radiação solar em condições de ausência de nebulosidade de céu aberto (Equação 3.12).

$$e_a = \frac{e_{T_{min}} \left[ \frac{U_{max}}{100} \right] + e_{T_{min}} \left[ \frac{U_{min}}{100} \right]}{2} \quad (3.9)$$

Em que,

- $e_a$  = Pressão de vapor atual do ar (kPa);  
 $e_{T_{max}}$  = Pressão de vapor de saturação, temperatura máxima (kPa) (Equação 3.10);  
 $e_{T_{min}}$  = Pressão de vapor de saturação, temperatura mínima (kPa) (Equação 3.11);  
 $U_{max}$  = Umidade relativa máxima (%); e  
 $U_{min}$  = Umidade relativa mínima (%).

$$e_{T_{max}} = 0.6108 e^{\left[ \frac{17.27 T_{max}}{T_{max} + 237.3} \right]} \quad (3.10)$$

em que,

- $e_{T_{max}}$  = Pressão de vapor de saturação, temperatura máxima (kPa); e  
 $T_{max}$  = Temperatura máxima do dia ( $^{\circ}C$ ).

$$e_{T_{min}} = 0.6108 e^{\left[ \frac{17.27 T_{min}}{T_{min} + 237.3} \right]} \quad (3.11)$$

em que,

- $e_{T_{min}}$  = Pressão de vapor de saturação, temperatura mínima (kPa); e  
 $T_{min}$  = Temperatura mínima do dia ( $^{\circ}C$ ).

$$R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} z) R_a \quad (3.12)$$

em que,

- $R_{so}$  = Radiação solar em condições de ausência de nebulosidade de céu aberto;  
 $z$  = Elevação do local acima do nível do mar (m); e  
 $R_a$  = Radiação solar no topo da atmosfera (MJ/m<sup>2</sup>/dia) (Equação 3.13).

$$R_a = \frac{24 (60)}{\pi} G_{sc} d_r [(\omega_s \sin \varphi \sin \delta) + (\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s)] \quad (3.13)$$

em que,

- $R_a$  = Radiação solar no topo da atmosfera (MJ/m<sup>2</sup>/dia);  
 $G_{sc}$  = Constante solar (0,0820 MJ.m<sup>-2</sup>.min<sup>-1</sup>);  
 $d_r$  = Distância relativa Terra-Sol (Equação 3.14);  
 $\omega_s$  = Ângulo da hora do pôr do sol (rad) (Equação 3.15);  
 $\varphi$  = Latitude (rad); e  
 $\delta$  = Declinação solar (rad) (Equação 3.16).

$$d_r = 1 + 0.033 \cos \frac{2\pi}{365} J \quad (3.14)$$

em que,

- $d_r$  = Distância relativa Terra-Sol; e  
 $J$  = Número do dia no ano 1 (1 de janeiro) e 365 ou 366 (31 de dezembro).

$$\omega_s = \cos^{-1}[-\tan \varphi \tan \delta] \quad (3.15)$$

em que,

- $\omega_s$  = Ângulo da hora do pôr do sol (rad);  
 $\varphi$  = Latitude (rad); e

$\delta$  = Declinação solar (rad) (Equação 3.16).

$$\delta = 0.409 \sin \left[ \frac{2 \pi}{365} J - 1.39 \right] \quad (3.16)$$

em que,

$\delta$  = Declinação solar (rad); e

J = Número do dia no ano 1 (1 de janeiro) e 365 ou 366 (31 de dezembro).

$$\gamma = 0.000665 P \quad (3.17)$$

em que,

$\gamma$  = Constante psicrométrica (kPa/ °C); e

P = Pressão atmosférica (kPa).

$$T = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} \quad (3.18)$$

em que,

T = Temperatura média diária (°C);

T<sub>max</sub> = Temperatura máxima do dia (°C); e

T<sub>min</sub> = Temperatura mínima do dia (°C).

$$u_2 = u_h \frac{4,87}{\ln(67,8 h - 5,42)} \quad (3.19)$$

em que,

$u_2$  = Velocidade do vento a 2 metros (m/s);

$u_h$  = Velocidade do vento a h metros (m/s); e

h = Altura da medição do vento acima do nível do solo.

$$e_s = \frac{e_{T_{\max}} + e_{T_{\min}}}{2} \quad (3.20)$$

em que,

- $e_s$  = Pressão de vapor de saturação (kPa); e
- $e_{T_{\max}}$  = Pressão de vapor de saturação, temperatura máxima (kPa)  
(Equação 3.10); e
- $e_{T_{\min}}$  = Pressão de vapor de saturação, temperatura mínima (kPa)  
(Equação 3.11);

$$\Delta = \frac{4098 \left[ 0,6108 e^{\left( \frac{17,27 T}{T+273,3} \right)} \right]}{(T + 237,3)^2} \quad (3.21)$$

em que,

- $\Delta$  = Declividade da curva de pressão de vapor de saturação (kPa/ °C);
- $T$  = Temperatura média diária (°C).

Para cálculo da demanda hídrica das culturas, utilizou-se os valores de  $K_c$  tabulados por Allen *et al.* (1998) para a fase inicial de crescimento das mesmas. Assim foi adotado os valores de  $K_c$  de 0,70; 0,40; e 0,35 para as culturas de pequenos vegetais (cenoura, alface e couve-flor); cana de açúcar e feijão e as culturas oleaginosas (girassol e mamona), respectivamente.

Dessa forma, analisou-se a demanda hídrica dessas culturas e, conseqüentemente, a área necessária de superfície condensadora para captação de água de orvalho destinada a irrigação das culturas.

### 3.4 Resultados e discussão

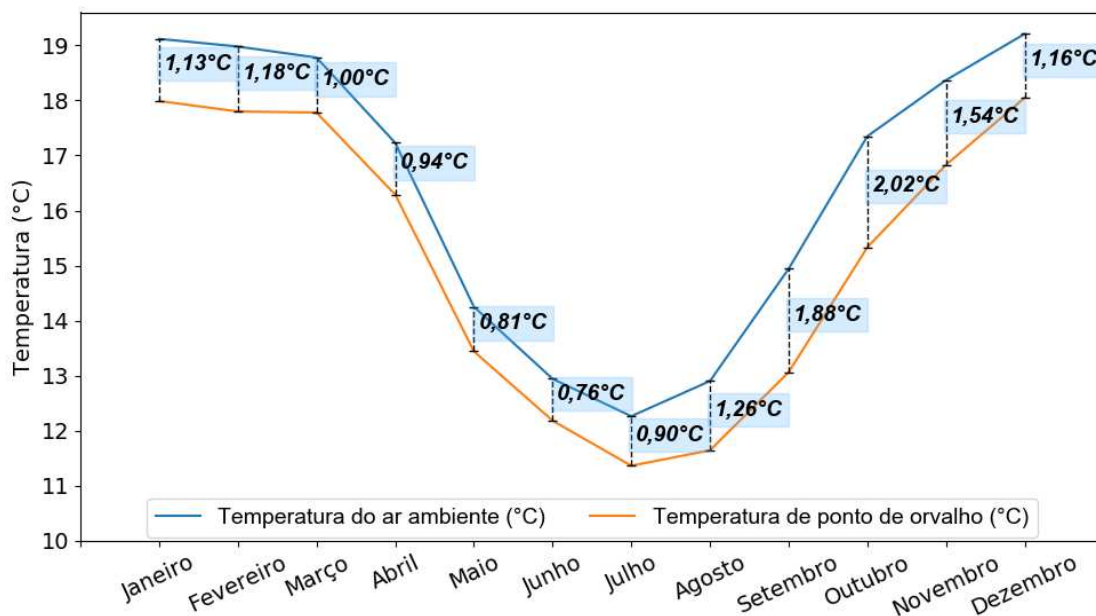
#### 3.4.1 Análise de variáveis meteorológicas

As diferenças entre a temperatura média mensal do ar ambiente e a temperatura média mensal do ponto de orvalho entre o período noturno desde às 23 horas até às 06 horas para a cidade de Viçosa- MG são mostradas na Figura 3.2.

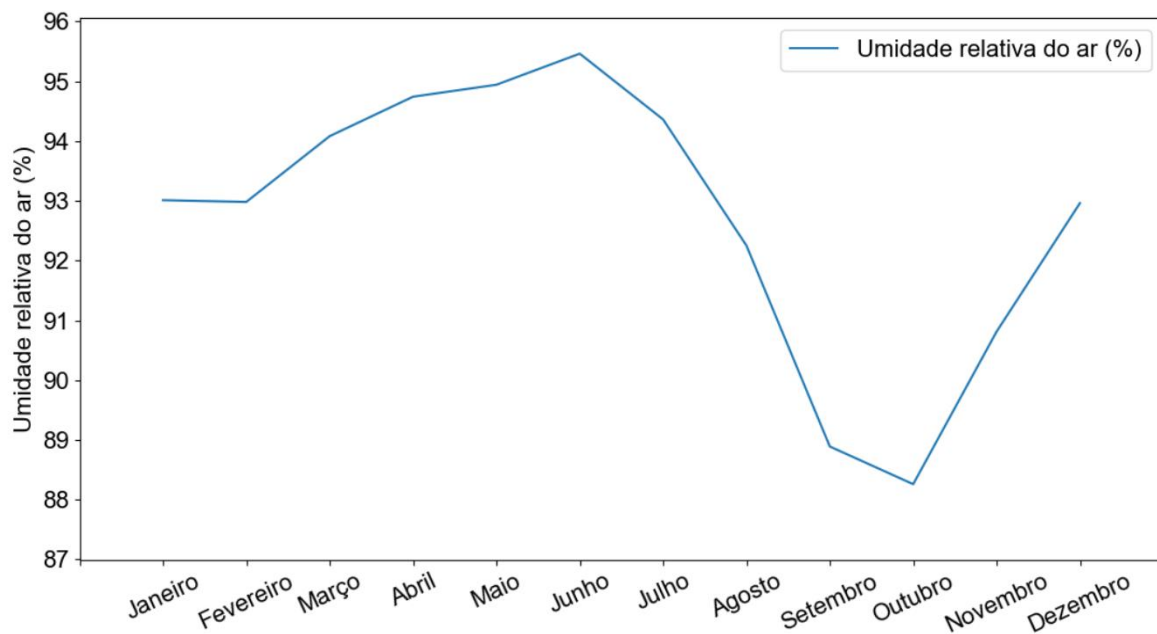
Percebe-se que o maior valor encontrado foi de 2,02°C para o mês de outubro. Esse valor é justificado pela ocorrência da menor umidade relativa média do ar para esse mês, aproximadamente 88%, Figura 3.3. Já a menor diferença entre a temperatura média mensal do ar e a temperatura média mensal de ponto de orvalho foi de cerca de 0,76°C para o mês de junho. Este mês teve uma umidade relativa média do ar de aproximadamente 95% durante o período noturno. Assim, observa-se que a variável que interfere fortemente nessa diferença de temperaturas é a umidade relativa do ar, Figura 3.3.

Essa análise de diferença de temperaturas é de extrema importância, uma vez que ela indica, em termos de valores médios, o quanto o ar deverá ser resfriado para que o mesmo atinja a temperatura de ponto de orvalho e para que, conseqüentemente, haja a condensação do vapor de água presente na atmosfera. Portanto, durante todo o ano, o ar deverá ser resfriado cerca de no máximo dois graus para a captação de orvalho. Esta é uma característica favorável para captação de orvalho em Viçosa, MG, utilizando o resfriamento radiativo passivo, uma vez que a formação de orvalho se torna possível em uma superfície condensadora quando a diferença entre a temperatura do ar ambiente e a temperatura de ponto de orvalho é menor que 10 °C (BEYSENS, 2016).

Um estudo mais aprofundado de estudo do rendimento de orvalho por meio do resfriamento radiativo passivo deverá levar em consideração além das temperaturas médias ambiente e de ponto de orvalho para o período noturno, também as temperaturas instantâneas. Desta forma, poderá se ter uma melhor avaliação de que período a captação de água será maior.



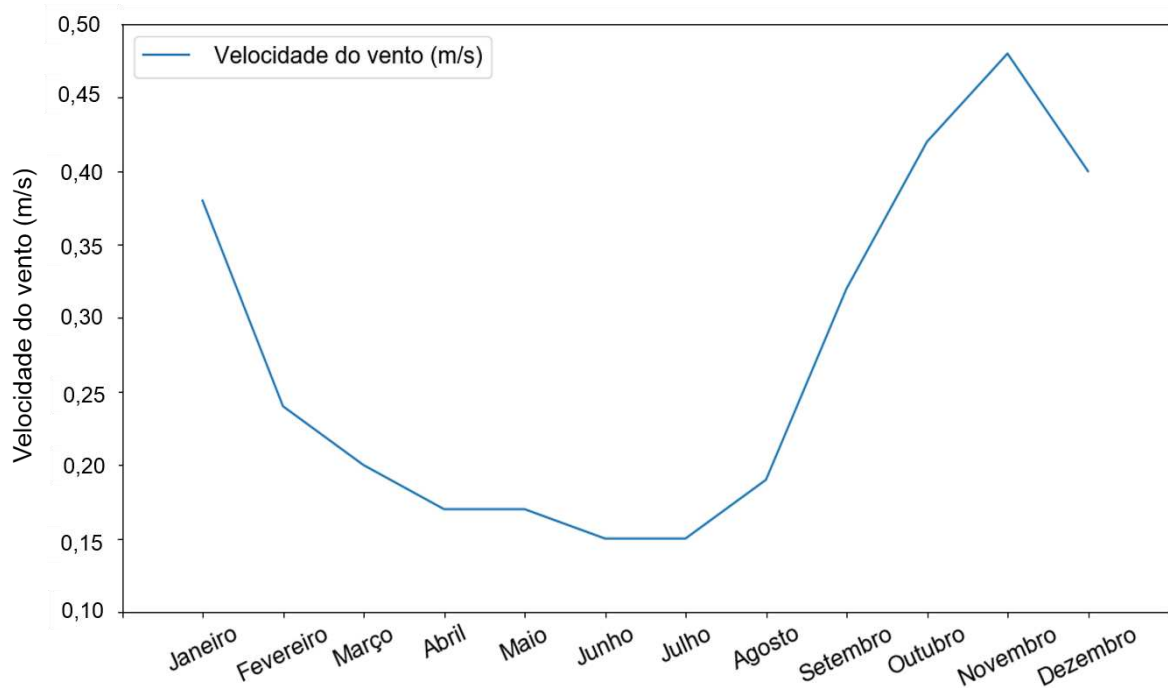
**Figura 3.2:** Diferenças entre a temperatura média mensal do ar ambiente e a temperatura média mensal do ponto de orvalho entre 23 horas e 06 horas para o período de 2006 a 2017 para Viçosa, MG.



**Figura 3.3:** Umidade relativa do ar média mensal entre 23 horas e 06 horas para o período de 2006 a 2017 para Viçosa, MG.

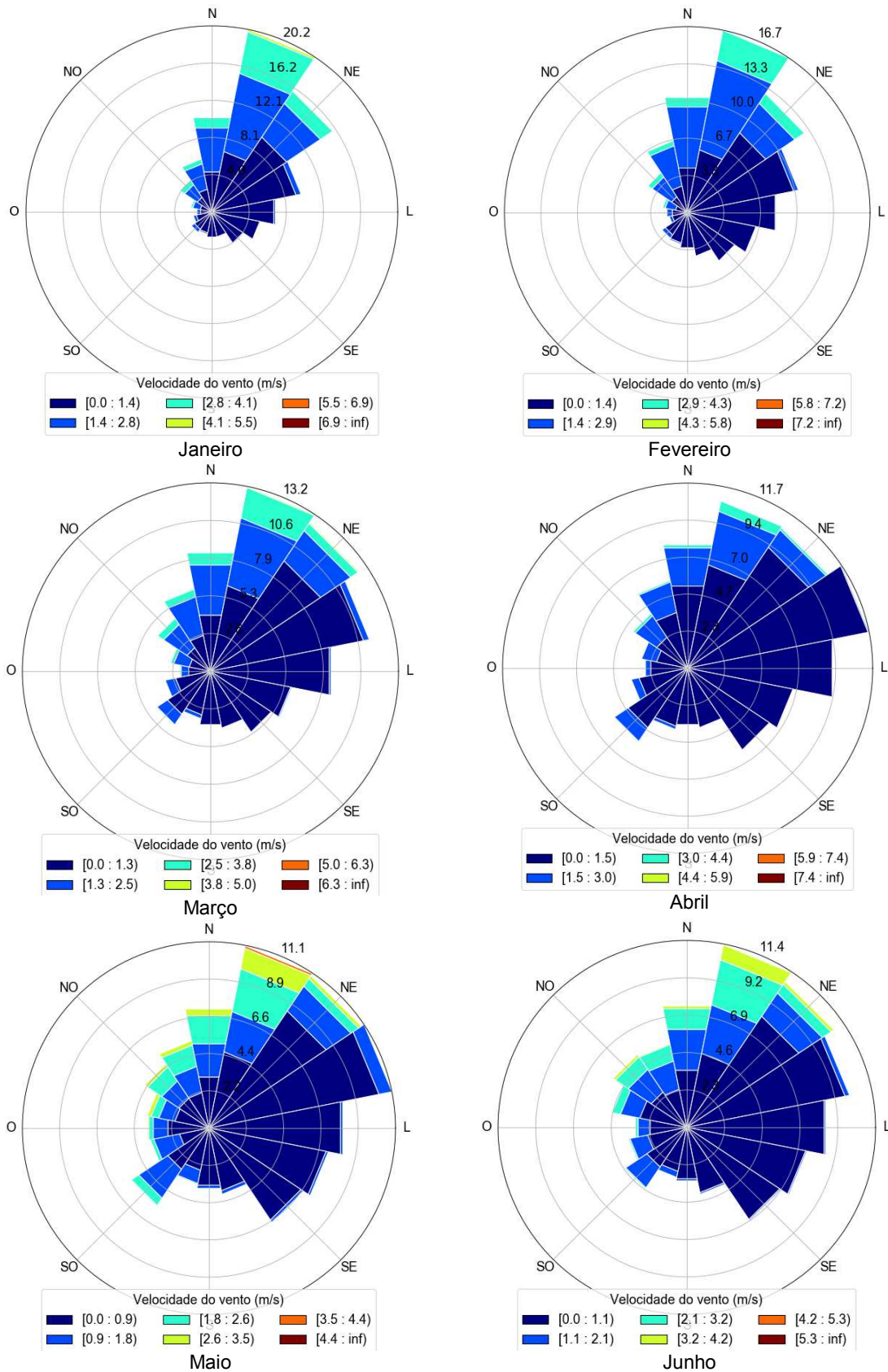
A velocidade média mensal do vento durante o período noturno variou de 0,15 m/s a 0,48 m/s à 10 metros de elevação (Figura 3.4) o que também demonstra um vantagem para a captação de orvalho. Segundo Khalil *et al.* (2016), a velocidade do vento entre 0,15 e 0,7 m/s foi a faixa de velocidade em que se observou formação

de orvalho em Marrocos. Além disso, a velocidade do vento superior a 4,4 m/s à 10 metros de elevação dificulta a formação de orvalho (BEYSENS, 2016).

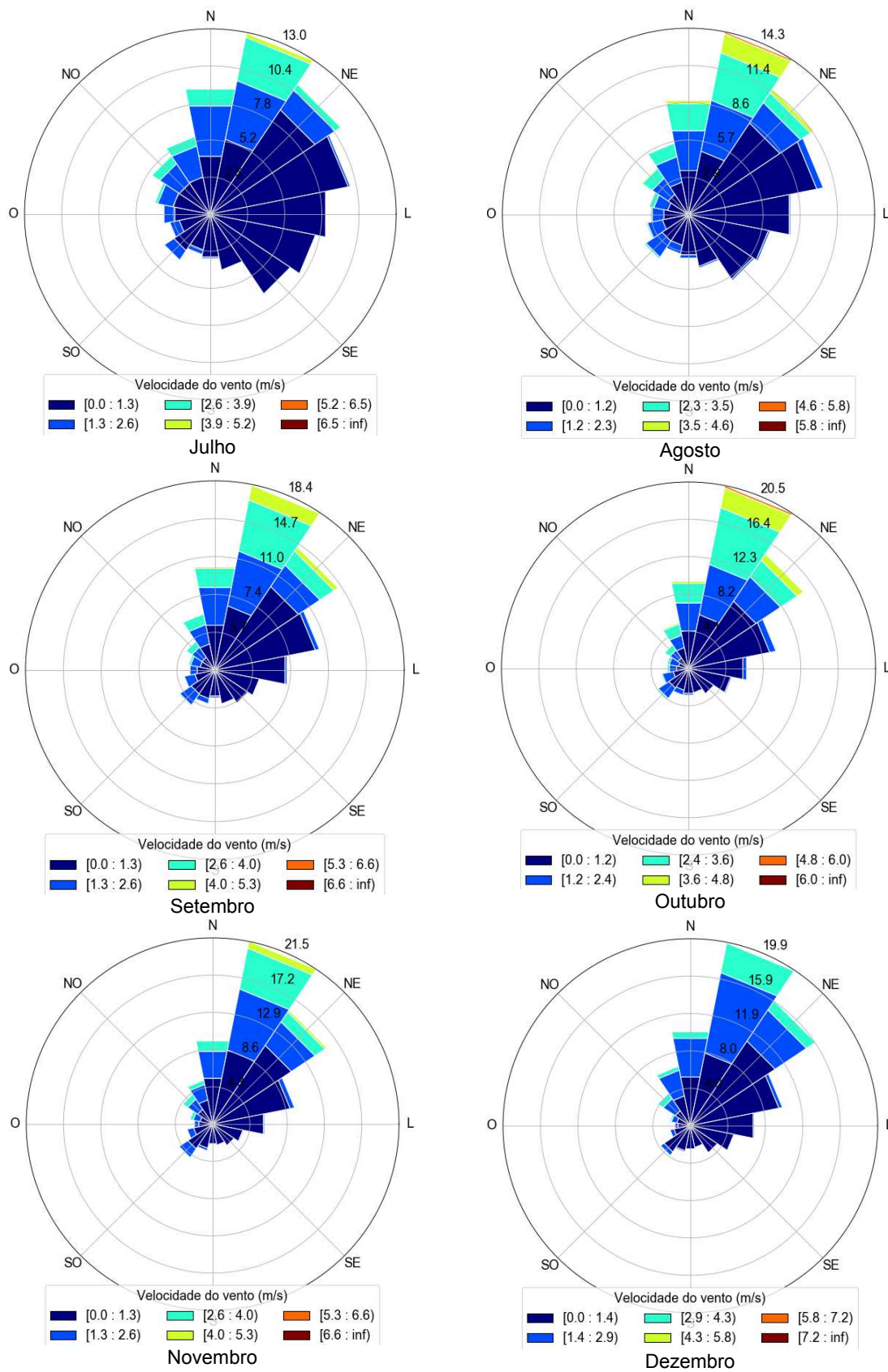


**Figura 3.4:** Velocidade média mensal do vento à 10 metros de elevação entre 23 horas e 06 horas para o período de 2006 a 2017 para Viçosa, MG.

Analisando a velocidade e do vento por meio do gráfico rosa dos ventos, observa-se, em todos os meses do ano, que raramente a velocidade do vento ultrapassa a velocidade que prejudica a formação de orvalho, ou seja, 4,4 m/s. Além disso, a direção nordeste do vento (Figura 3.5 e Figura 3.6) é a direção que predomina durante a noite. Esta é uma informação importante para o posicionamento das superfícies condensadoras na área em estudo. Dessa forma, analisando o parâmetro de velocidade do vento, a cidade de Viçosa confirma o potencial para captação de orvalho.

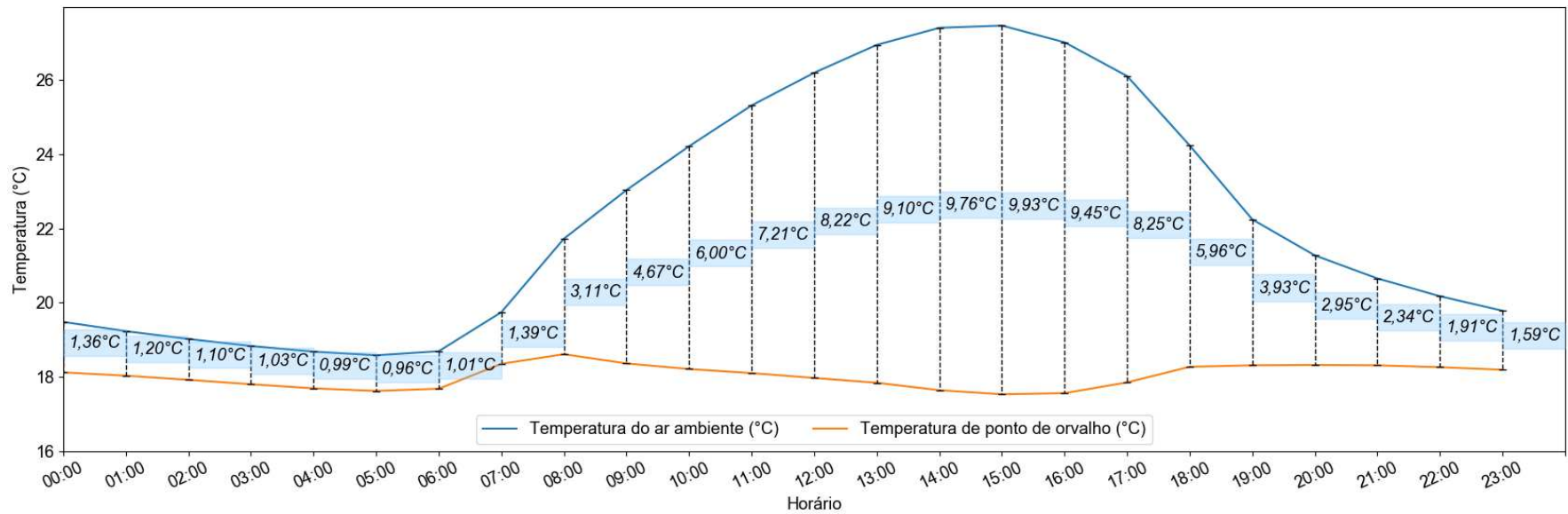


**Figura 3.5:** Rosa dos ventos mensal para a cidade de Viçosa (Janeiro a Junho) entre 23 horas e 06 horas para o período de 2006 a 2017 para Viçosa, MG.

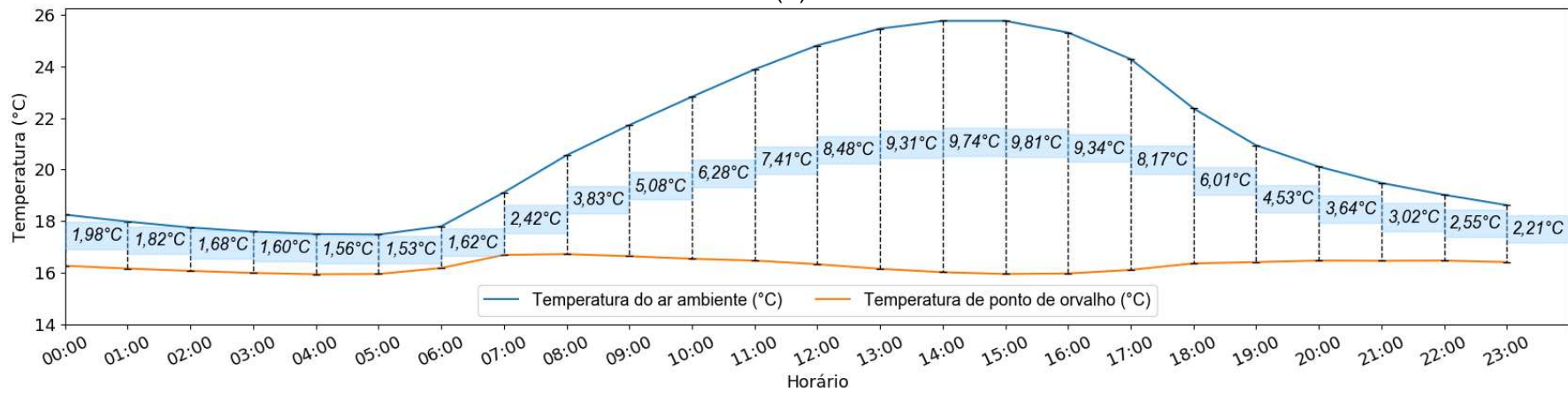


**Figura 3.6:** Rosa dos ventos mensal para a cidade de Viçosa (Julho a Dezembro) entre 23 horas e 06 horas para o período de 2006 a 2017 para Viçosa, MG.

O comportamento horário da temperatura analisado para as quatro estações do ano mostra que independente do período do ano, o horário entre às nove e às dezenove horas é o período em que foi necessário um maior resfriamento do ar, Figura 3.7 e a Figura 3.8. O inverno é a estação mais seca, por isso foi possível observar uma maior amplitude entre temperatura do ar ambiente e a temperatura de ponto de orvalho durante o período diurno. Já o outono, foi a estação onde observou-se uma menor amplitude térmica entre a temperatura do ar ambiente e a temperatura de orvalho. Isso aconteceu porque os valores de umidade para esse período são maiores.

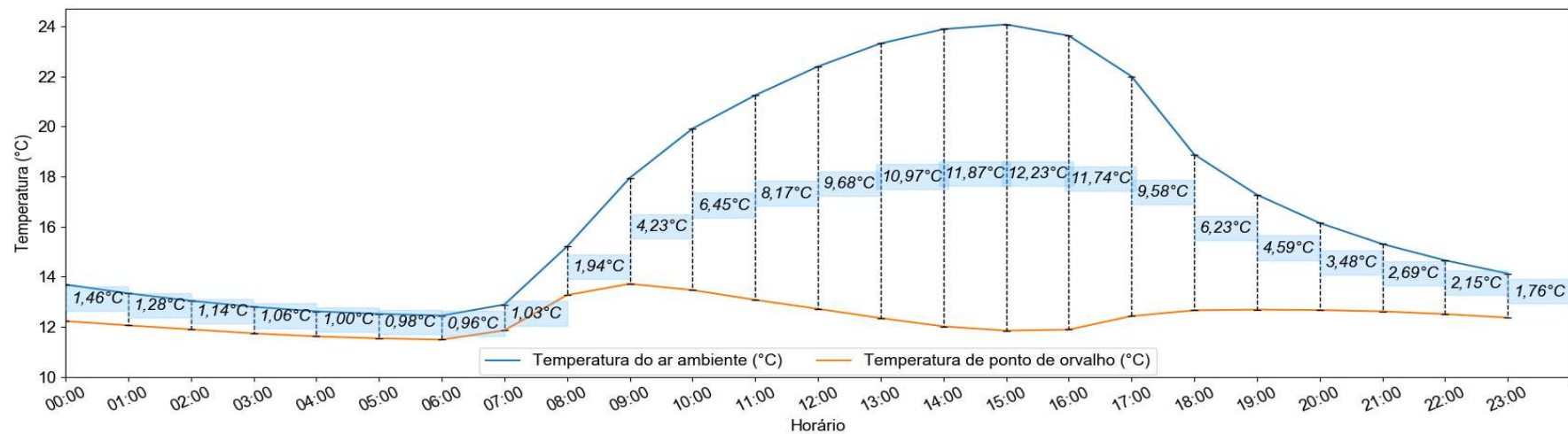


(A)

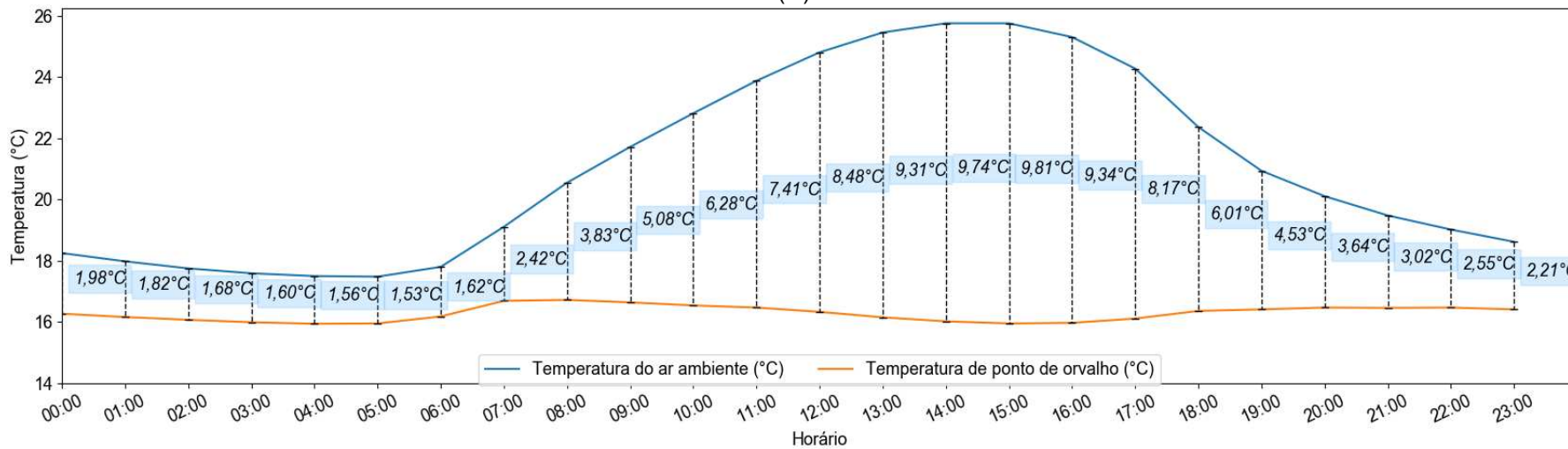


(B)

**Figura 3.7:** Diferença da temperatura média de ponto de orvalho e temperatura do ar ambiente média ao longo do dia (A) verão e (B) outono para o período de 2006 a 2017 para Viçosa, MG.



(C)



(D)

**Figura 3.8:** Diferença da temperatura de ponto de orvalho média e temperatura do ar ambiente média ao longo do dia (C) inverno e (D) primavera para o período de 2006 a 2017 para Viçosa, MG.

O Quadro 3.2 mostra o desvio padrão das variáveis analisadas, temperatura média mensal do ar ambiente, temperatura média mensal de ponto de orvalho, umidade relativa do ar média mensal e velocidade do vento média mensal, onde é possível observar a dispersão do conjunto de dados para essas variáveis ao longo dos 12 anos, durante o período noturno.

**Quadro 3.2:** Desvio padrão da temperatura média mensal do ar ambiente, da temperatura média mensal de ponto de orvalho, da umidade relativa média mensal do ar e da velocidade média mensal do vento entre 23 horas e 06 horas para o período de 2006 a 2017 para Viçosa, MG

Mês	Temperatura de ponto de orvalho	Temperatura do ar ambiente	Umidade relativa do ar	Velocidade do vento à 10 metros de altura
Janeiro	1,39	1,38	3,87	0,43
Fevereiro	1,08	1,17	3,17	0,32
Março	1,33	1,33	2,44	0,22
Abril	1,87	1,91	2,78	0,24
Mai	2,10	2,15	3,02	0,24
Junho	2,33	2,42	2,78	0,26
Julho	2,19	2,40	3,79	0,33
Agosto	2,14	2,38	4,48	0,33
Setembro	2,65	2,72	5,86	0,39
Outubro	2,38	2,24	6,07	0,45
Novembro	2,05	2,05	5,20	0,50
Dezembro	1,32	1,35	3,41	0,43

O Quadro 3.3 sumariza as variáveis: temperatura média do ar ambiente, umidade relativa média, razão de mistura média, entalpia média e massa específica médio entre 23 horas e 06 horas para o período de 2006 a 2017 para Viçosa, MG.

**Quadro 3.3:** Temperatura média mensal do ar, umidade relativa média mensal, razão de mistura média mensal, entalpia média mensal e massa específica média mensal entre 23 horas e 06 horas para o período de 2006 a 2017 para Viçosa, MG

Mês	Temperatura média do ar (°C)	Umidade relativa média (%)	Razão de mistura (g vapor de água/kg ar seco)	Entalpia (kJ/kg <sub>ar seco</sub> )	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )
Janeiro	19,11	92,76	14,00	54,71	0,92
Fevereiro	19,00	93,09	14,87	56,82	0,92
Março	18,75	94,02	13,87	54,02	0,92
Abril	17,23	94,60	12,66	49,39	0,91
Maio	14,25	94,94	10,46	40,77	0,90
Junho	12,96	95,47	9,66	37,42	0,89
Julho	12,30	94,39	9,14	35,43	0,89
Agosto	12,90	92,21	9,29	36,42	0,89
Setembro	14,93	88,82	10,23	40,86	0,90
Outubro	17,27	87,91	11,78	47,19	0,91
Novembro	18,32	90,68	13,01	51,38	0,92
Dezembro	19,11	92,72	13,99	54,70	0,92
Média	16,34	92,63	11,91	46,59	0,91

### Disponibilidade hídrica na atmosfera em Viçosa-MG

A máxima razão de mistura observada entre 23 horas e 06 horas para o período de 2006 a 2017 para Viçosa, MG foi de 14,87 g vapor de água/kg ar seco. Já a razão de mistura média para a cidade de Viçosa foi de 11,91 g vapor de água/kg ar seco. (Quadro 3.3). Dessa forma, caso se deseje extrair um quilograma de água, por exemplo, seria necessário cerca de 67,25 kg de ar seco, ou seja aproximadamente 73,10 m<sup>3</sup> de ar e de cerca de 3,68 MJ, considerando um sistema com eficiência de extração de 100% e a máxima razão de mistura observada, ou seja, 14,87 g vapor de água/kg ar seco.

As menores quantidades médias de razão de mistura podem ser observadas nos meses de junho, julho e agosto, apesar de serem os meses com valores maiores de umidade relativa do ar. Isso acontece porque, no ciclo hidrológico, o vapor de água na atmosfera é determinado pelo processo de evapotranspiração. Assim, no inverno, a demanda evaporativa do ar é menor do que no verão e, conseqüentemente, a quantidade de água presente no ar também é menor.

Assim, por meio da Equação 3.1 e considerando a média de umidade absoluta de 13,08 g vapor de água/ m<sup>3</sup> de ar e velocidade média do vento de 0,273 m/s tem-se uma disponibilidade hídrica na atmosfera da cidade de 12,86 L/m<sup>2</sup>/hora durante o período noturno, sem o uso de dispositivo para renovação do ar. Dessa forma,

durante o período de sete horas (23 às 06 horas) observa-se uma disponibilidade hídrica de aproximadamente 89,99 L/m<sup>2</sup> neste período.

Em um estudo da disponibilidade hídrica na atmosfera de Monteiro – PB observou-se um média de 196 L/m<sup>2</sup>/h durante o período noturno para os meses de novembro e dezembro. Este valor é muito superior ao de Viçosa, uma vez que a velocidade do vento em Monteiro tinha em média 3,65 m/s, ou seja cerca de treze vezes mais, e uma umidade absoluta de 15 g vapor de água/m<sup>3</sup> ar seco, valor este também superior ao encontrado em Viçosa para o mesmo período (SILVA *et al.*, 2010).

Dessa forma, verifica-se que o potencial do vapor de água atmosférico para complementação dos recursos hídricos é significativo. Como exemplo da importância do potencial de disponibilidade hídrica na atmosfera tanto para Viçosa, MG, quanto para Monteiro, PB, tem-se que a lâmina de irrigação necessária para a cultura de girassol irrigado na chapada do Apodi, localizada entre os estados do Rio Grande do Norte e Ceará, é de cerca de 442,0 mm para um ciclo da cultura de 90 dias, ou seja 442 L/m<sup>2</sup> de área plantada para todo do ciclo. Caso a extração de água da atmosfera seja eficiente, conclui-se que a atmosfera possui mais água do que o suficiente, sem contar a precipitação, para suprir a demanda hídrica desta cultura (CAVALCANTE JÚNIOR *et al.*, 2012).

Assim, observa-se que para o suprimento da demanda hídrica das culturas é necessário que se aproveite pelo menos a ventilação natural, e se possível, que se utilize métodos que aumentem a taxa de renovação do ar para aumentar a disponibilidade de vapor de água a ser condensado. Os métodos de renovação de ar podem ser passivos e ativos. Os métodos passivos são aqueles que não necessitam do uso de fontes complementares de energia. Já os métodos ativos, necessitam de fontes complementares de energia. Como exemplo de métodos passivos e ativos para renovação de ar, pode-se citar o uso de chaminés para aumentar a taxa de convecção natural e o uso de ventiladores mecânicos, respectivamente.

### **3.4.2 Potencial de captação de orvalho**

A quantidade média de rendimento de orvalho estimada entre 23 horas e 06 horas para o período de 2006 a 2017 para Viçosa, MG, utilizando o método de

resfriamento radiativo passivo para a cidade de Viçosa foi de 0,128 mm/noite, o que representa uma média de 3,93 mm/mês. O maior rendimento de orvalho observado foi de 0,23 mm/noite para o mês de junho e a menor foi de 0,02 mm/noite para o mês de outubro (Quadro 3.4). Isso pode ser explicado pelo fato de que junho apresenta a maior, e outubro a menor umidade relativa média durante o período noturno, como mostra a Figura 3.3. Além disso, o rendimento de orvalho é fortemente influenciado pela nebulosidade.

A média anual de orvalho foi de 47,18 mm, tendo julho e agosto as maiores quantidade de orvalho, 5,82 mm e 5,96 mm, respectivamente, Quadro 3.4. Dessa forma, a estimativa anual de orvalho representa cerca de 3,7% da média anual pluviométrica da cidade que é de cerca de 1.262,26 mm (INMET, 2018).

**Quadro 3.4:** Média diária, média mensal, máximo e mínimo de rendimento de orvalho estimado para o período de 2006 a 2017 para Viçosa, MG

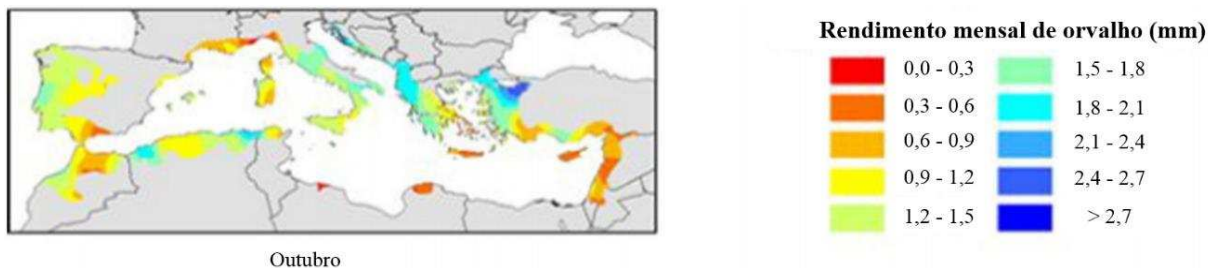
Mês	Média diária de orvalho (mm/dia)	Desvio Padrão	Média mensal de orvalho (mm/mês)	Máximo de orvalho diário (mm/dia)	Mínimo de orvalho diário (mm/dia)
Janeiro	0,09	0,02	2,83	0,13	0,06
Fevereiro	0,11	0,02	3,17	0,15	0,08
Março	0,10	0,01	3,05	0,13	0,07
Abril	0,13	0,03	4,02	0,19	0,08
Mai	0,17	0,02	5,21	0,20	0,11
Junho	0,18	0,02	5,45	0,23	0,13
Julho	0,19	0,02	5,82	0,21	0,16
Agosto	0,19	0,02	5,96	0,22	0,16
Setembro	0,14	0,03	4,33	0,19	0,08
Outubro	0,09	0,02	2,90	0,13	0,06
Novembro	0,06	0,02	1,87	0,10	0,02
Dezembro	0,08	0,03	2,57	0,14	0,04

Mesmo sendo um pequeno valor quando comparado com o índice pluviométrico anual para a cidade de Viçosa, o orvalho não deve ser negligenciado, pois este pode ser utilizado como uma fonte complementar de água em períodos de escassez. Além disso, superfícies utilizadas para a condensação de orvalho podem também ser utilizadas para captação de água de chuva. Dessa forma, cerca de

1.309,44 mm seriam coletados, considerando a precipitação e o orvalho e, conseqüentemente, poderiam ser utilizados como fonte de água, seja na irrigação ou para quaisquer outros usos.

Considerando a umidade absoluta média de  $13,08 \text{ g vapor de água/m}^3$  de ar seco e a velocidade do vento a 1 m de altura de cerca de  $0,20 \text{ m/s}$  tem-se uma disponibilidade hídrica de aproximadamente  $65,92 \text{ L/m}^2$  durante as sete horas da noite em estudo para Viçosa- MG. Dessa forma, essa tecnologia de resfriamento radiativo teve um coeficiente de extração de cerca de  $0,194\%$ , o que mostra um grande potencial de possível aumento de rendimento de extração de água que este método possui. Provavelmente, dentre as possíveis maneiras de aumentar este rendimento tem-se: (i) renovação do ar por meio passivo e por meio ativo; (ii) estudo de materiais da superfície condensadora que maximizem o rendimento de orvalho; (iii) escolha correta do local, incluindo a orientação quanto a ventos predominantes; e (iv) melhoria do *design* do dispositivo.

No mapeamento de orvalho realizado para a região do mar mediterrâneo, utilizando este mesmo modelo, o mês de outubro apresentou os maiores rendimentos de orvalho, cerca de  $1,2 \text{ mm}$  durante o mês, Figura 3.9 (TOMASZKIEWICZ *et al.*, 2016). Porém, este valor é inferior ao menor rendimento de orvalho estimado para Viçosa-MG, cerca de  $1,87 \text{ mm}$  durante o mês de novembro.



**Figura 3.9:** Mapeamento do rendimento de orvalho mensal (mm) na região do mar mediterrâneo para o mês de outubro.

**Fonte:** TOMASZKIEWICZ *et al.* (2016).

Em um estudo prático realizado por Tomaszkievicz *et al.* (2017) em uma aldeia de Beiteddine, no Líbano, com média de umidade relativa de  $65,46\%$  e temperatura do ar média de  $22,65 \text{ }^\circ\text{C}$  durante o período de estudo, observou-se uma captação média de  $0,13 \text{ L/m}^2$  por noite com uma captação máxima de  $0,46 \text{ L/m}^2$  por noite, durante o período de seca da região. Em comparação com a estimativa feita para a

cidade de Viçosa, a quantidade média do estudo de Tomaszekiewicz *et al.* (2017) foi bem próxima a média anual encontrada para a cidade de Viçosa, porém a quantidade máxima foi o dobro. Uma possível explicação para essa divergência é a significativa diferença de clima, o que influencia a formação de orvalho. Já em um estudo para a Cartagena, Espanha, Maestre-Valero *et al.*, (2011) observaram durante o período de maio de 2009 até maio de 2010, um rendimento máximo de 0,314 L/m<sup>2</sup> por noite. Já um rendimento máximo de 0,600 L/m<sup>2</sup>, por foi observado por Muselli *et al.* (2009) na Croácia (Ilha de Vis) durante os anos de 2003 a 2006. Assim, pode-se observar que até mesmo para o mesmo tipo de superfície condensadora, o rendimento de orvalho médio se difere em grande quantidade devido as variáveis meteorológicas durante o horário de formação e o período de estudo.

É importante ressaltar que características climáticas dos locais podem modificar o rendimento em cerca de 30 - 40%. O tamanho da superfície e formato também influenciam a troca de calor da superfície condensadora e, conseqüentemente, a formação de orvalho (BEYSENS, 2016).

### **3.4.3 Potencial de orvalho para irrigação**

O Quadro 3.5 mostra a evapotranspiração média diária, o desvio padrão e a demanda de evapotranspiração diária média da cultura para cidade de Viçosa, MG entre os anos de 2006 e 2017. Observa-se que a evapotranspiração de referência média diária é de cerca de 3,14 mm/dia. Dessa forma, considerando o Kc das culturas, observa-se uma demanda hídrica média de cerca de 2,20 mm/dia para pequenos vegetais (cenoura, alface e couve-flor), 1,25 mm/dia para cana de açúcar e feijão e 1,10 mm/dia para as oleaginosas (girassol e mamona) na fase inicial de plantio.

**Quadro 3.5:** ETo média diária mensal e evapotranspiração da cultura diária para pequenos vegetais (cenoura, alface e couve-flor), cana de açúcar e feijão e oleaginosas (girassol e mamona), na fase inicial, para cidade de Viçosa, MG entre os anos de 2006 e 2017

Mês	ETo (mm/dia)	Desvio Padrão	Evapotranspiração da cultura diária (mm/dia)		
			Pequenos vegetais	Cana de açúcar e feijão	Oleaginosas
Janeiro	3,75	0,45	2,63	1,50	1,31
Fevereiro	3,87	0,39	2,71	1,55	1,35
Março	2,80	0,35	1,96	1,12	0,98
Abril	2,39	0,25	1,68	0,96	0,84
Mai	2,01	0,20	1,41	0,80	0,70
Junho	1,95	0,25	1,36	0,78	0,68
Julho	2,32	0,32	1,62	0,93	0,81
Agosto	3,07	0,46	2,15	1,23	1,08
Setembro	4,08	0,45	2,86	1,63	1,43
Outubro	4,42	0,85	3,10	1,77	1,55
Novembro	3,49	0,56	2,45	1,40	1,22
Dezembro	3,48	0,52	2,44	1,39	1,22
Média	3,14		2,20	1,25	1,10

Considerando a superfície condensadora com média de rendimento de orvalho de 0,128 mm diários, seria necessária uma superfície condensadora com área de cerca de 17,19; 9,77; 8,59 m<sup>2</sup> para irrigação na fase inicial do plantio por cada m<sup>2</sup> plantado de pequenos vegetais, da cana de açúcar e do feijão, e de oleaginosas, respectivamente.

Considerando que a superfície condensadora também possa coletar água pluvial, cerca de 1309,18 mm poderiam ser armazenados anualmente, ou seja, aproximadamente, em média, 3,59 mm diários. Dessa forma, seria necessária uma superfície condensadora com área de cerca de 0,61; 0,35 e 0,31 m<sup>2</sup> para irrigação na fase inicial do plantio por cada m<sup>2</sup> plantado de pequenos vegetais, da cana de açúcar e do feijão, e de oleaginosas, respectivamente.

Para tal, é necessário que se avalie a capacidade de campo do solo, o regime de chuvas da época de plantio, ou seja, a relação solo-água-plantas. Porém, este não é o objetivo desta pesquisa. Além disto, é necessário que se avalie as diferentes possibilidades de provimento de água entre as quais citam-se:

- (i) Precipitação natural, i. e. chuva;
- (ii) Disponibilidade dos mananciais como lagos, rios e lençol freático;
- (iii) Armazenamento de água em reservatórios e represas; e
- (iv) Suprimento por captação de água de orvalho e neblina.

A título de reforçar a importância da irrigação, cita-se que a irrigação pode levar a um aumento da produção de cana-de-açúcar em cerca de três vezes (EMBRAPA, 2016). Acredita-se que este aumento de produtividade devido a irrigação ocorra aproximadamente também para a maioria das outras culturas de interesse econômico.

Assim, o orvalho se mostra uma fonte suplementar de água para irrigação de culturas na fase inicial. Em geral, na fase inicial do plantio muitas das plantas utilizadas na olericultura são inicialmente plantadas em canteiros para a formação de mudas e depois transplantadas para os locais definitivos. Ou seja, na fase inicial muitas espécies não demandam tanta área para plantio.

Por outro lado, a irrigação de culturas, utilizando somente o orvalho como uma fonte de água, demanda uma área de superfície de condensação de cerca de 8 a 17 vezes a área de plantio – para as espécies estudadas. Assim, a viabilidade de tal método deve ser restrita à locais e/ou épocas do ano que não possuam recursos hídricos suficientes.

### **3.5 Conclusões**

Esta pesquisa estimou o rendimento de orvalho para a cidade de Viçosa/MG, cuja média anual noturna de temperatura e de umidade relativa do ar é de cerca de 16,34 °C e 92,63% respectivamente, com uma disponibilidade hídrica na atmosfera da cidade de 12,86 L/m<sup>2</sup>/hora durante o período noturno. Ademais, analisou-se o potencial de captação de orvalho para uso na irrigação de pequenos vegetais (cenoura, alface e couve-flor), cana de açúcar, feijão e oleaginosas (girassol e mamona) para a fase inicial de plantio.

A quantidade anual de rendimento de orvalho foi estimada em 47,18 mm para o período de 2006 a 2017, enquanto o índice pluviométrico anual médio foi de 1262 mm. A máxima quantidade de orvalho, 0,22 mm/dia, foi observada no mês de agosto e a mínima, de 0,02mm/dia foi observada em novembro.

O orvalho se mostrou ser uma fonte complementar de água viável e que apesar da pequena quantidade em relação a precipitação, pode fazer diferença para

complementar os recursos hídricos durante períodos de seca, minimizando assim, a mortalidade das culturas durante a seca.

No que se refere ao potencial de captação de orvalho para a irrigação, é necessário uma área de superfície de condensação de cerca de 8 a 17 vezes maior do que a área de plantio para suprir a demanda hídrica das culturas estudadas para o município de Viçosa, MG.

O sistema para captação de fontes complementares de água seria de grande importância para a irrigação de culturas. Porém, há uma competição entre a área para instalação do sistema e a área do plantio. Assim, esse sistema de captação de fontes complementares de chuva e/ou orvalho, deverá ser utilizado apenas em locais que houver a viabilidade técnica e econômica.

### 3.6 Referências bibliográficas

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L.S, RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements – FAO irrigation and drainage paper 56.FAO (Food and Agricultural organization)**, pp.333. Disponível em: < <http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.htm>>. Acesso 22 Jun. 2018.

ALMEIDA, L. T.; MONTEIRO, L.I.B.; SILVA, F.B.; CORRÊDO, L.P.;CESCONETTO, L. B. Localização de Corredores Ecológicos e Área de Preservação Permanente na Universidade Federal de Viçosa. **Nativa**, v. 4, n. 6, p. 412–418, 2016, [doi: 10.14583/2318-7670.v04n06a12](https://doi.org/10.14583/2318-7670.v04n06a12).

BEYSENS, D.; BROGGINI, F.; MILIMOUK-MELNYTCHOUK, I.; OUZZANI, J.; TIXIER, N. New architectural forms to enhance dew collection. **Chemical Engineering Transactions**, v. 34, p. 79–84, 2013, [doi: 10.3303/CET1334014](https://doi.org/10.3303/CET1334014).

BEYSENS, D. Estimating dew yield worldwide from a few meteorological data. **Atmospheric Research**, v. 167, p. 146–155, 2016, [doi:10.1016/j.atmosres.2015.07.018](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.07.018).

CAVALCANTE JUNIOR, E.G; MEDEIROS, J.F.; MELO, T.K.; SOBRINHO, J.E.; BRISTOT, G.; ALMEIDA, B.M. Necessidade hídrica da cultura do girassol irrigado na chapada do Apodi. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 261-267, 2013.

CLUS, O.; ORTEGA, P.; MUSELLI, M.; MILIMOUK, I.; BEYSENS, D. Study of dew water collection in humid tropical islands. **Journal of Hydrology**, v. 361, n. 1–2, p. 159–171, 2008, [doi: 10.1016/j.jhydrol.2008.07.038](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.07.038).

CLUS, O.; OUZZANI, J.; MUSELLI, M.; NIKOLAYEV, V.S.; SHARAN, G.; BEYSENS, D. Comparison of various radiation-cooled dew condensers using computational fluid dynamics. **Desalination**, v. 249, n. 2, p. 707–712, 2009, [doi:10.1016/j.desal.2009.01.033](https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.01.033).

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Adução e irrigação fazem cana aumentar produtividade no Cerrado**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/10691479/adubacao-e-irrigacao-fazem-cana-aumentar-produtividade-no-cerrado>>. Acesso em: 20 maio. 2018.

ESTRELA, J. VALIENTE, J. A.; CORELL, D.; VALDECANTOS, A. Prospective use of collected fog water in the restoration of degraded burned areas under dry Mediterranean conditions. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, p. 1896–1906, 2009, [doi:10.1016/J.AGRFORMET.2009.06.016](https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2009.06.016).

FARG, E. ARAFAT, S.M.; ABD EL-WAHED, M.S.; EL-GINDY, A.M. Estimation of Evapotranspiration ET<sub>c</sub> and Crop Coefficient K<sub>c</sub> of Wheat, in south Nile Delta of Egypt Using integrated FAO-56 approach and remote sensing data. **Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, v. 15, n. 1, p. 83–89, 2012, [doi:10.1016/j.ejrs.2012.02.001](https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2012.02.001).

INMET- Instituto Nacional de Meteorologia. **BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 22 fev. 2018.

KHALIL, B.; ADAMOWSKI, J. SHABBIR, A.; JANG, C.; ROJAS, M.; REILLY, K.; OZGA-ZIELINSKI, B. A review: dew water collection from radiative passive collectors to recent developments of active collectors. **Sustainable Water Resources Management**, v. 2, n. 1, p. 71–86, 2016, [doi: 10.1007/s40899-015-0038-z](https://doi.org/10.1007/s40899-015-0038-z).

KIDRON, G. J.; STARINSKY, A. Chemical composition of dew and rain in an extreme desert (Negev): Cobbles serve as sink for nutrients. **Journal of Hydrology**, v. 420–421, p. 284–291, 2012, [doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.12.014](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.12.014).

LEKOUCH, I.; LEKOUCH, K.; MUSELLI, M.; MONGRUEL, A.; KABBACHI, B.; BEYSENS, D. Rooftop dew, fog and rain collection in southwest Morocco and predictive dew modeling using neural networks. **Journal of Hydrology**, v. 448–449, p. 60–72, 2012, [doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.04.004](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.004).

LORENZON, A. S.; DIAS, H. C. T.; TONELLO, K. C. Surface runoff of rainwater in a fragment of Atlantic Forest, Viçosa-MG. **Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável**, v. 5, n. 1, p. 50–58, 2015.

MAESTRE-VALERO, J. F.; MARTÍNEZ-ALVAREZ, V.; BAILLE, A.; MARTÍN-GÓRRIZ, B.; GALLEGU-ELVIRA, B. Comparative analysis of two polyethylene foil materials for dew harvesting in a semi-arid climate. **Journal of Hydrology**, v. 410, n. 1–2, p. 84–91, 2011, [doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.09.012](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.09.012).

MAESTRE-VALERO, J. F.; RAGAB, R.; MARTÍNEZ-ALVARES, V.; BAILLE, A. Estimation of dew yield from radiative condensers by means of an energy balance model. **Journal of Hydrology**, v. 460–461, p. 103–109, 2012, [doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.06.046](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.046).

MUSELLI, M.; BEYSENS, D.; MILETA, M.; MILIMOUK, I. Dew and rain water collection in the Dalmatian Coast, Croatia. **Atmospheric Research**, v. 92, n. 4, p. 455–463, 2009, [doi:10.1016/j.atmosres.2009.01.004](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.01.004).

SHARAN, G. Harvesting dew with radiation cooled condensers to supplement drinking water supply in semi-arid coastal northwest India. **International Journal for Service Learning in Engineering**, v. 6, n. 1, p. 130–150, 2011.

SILVA, G.; SOUZA, F.A.S.; SILVA, L.L. Estimativa da disponibilidade hídrica na atmosfera de Monteiro - PB. **2º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente**, v. i, p. 1–6, 2010.

TOMASZKIEWICZ, M.; ABOU NAJIM, M. A.; BEYSENS, D.; ALAMEDDINE, I.; BOU ZEID, E.; EL-FADEL, M. Projected climate change impacts upon dew yield in the Mediterranean basin. **Science of the Total Environment**, v. 566–567, p. 1339–1348, 2016, [doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.05.195](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.195).

TOMASZKIEWICZ, M.; NAJIM, M. A.; ZURAYK, R.; EL-FADEL, M. Dew as an adaptation measure to meet water demand in agriculture and reforestation. **Agricultural and Forest Meteorology** v. 232, p. 411–421 , 2017, [doi: 10.1016/j.agrformet.2016.09.009](https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.09.009).

VALIENTE, J. A.; ESTRELA, M.J.; CORELL, D.; FUENTES, D.; VALDECANTOS, A.; BAEZA, M. Fog water collection and reforestation at a mountain location in a western mediterranean basin region: air-mass origins and synoptic analysis. **ERDKUNDE – Archive for Scientific Geography**, v. 65, n. 3, p. 277–290, 2011, [doi: 10.3112/erdkunde.2011.03.05](https://doi.org/10.3112/erdkunde.2011.03.05).

VIANA, R. H. O. ; MEIRA NETO, J. A. A.; CARMO, F. M. S.; SOUZA, A. L. ; SILVA, A. F. Fitossociologia Do Estrato Arbóreo De Um Fragmento De Floresta Estacional Semidecidual Montana – “Mata Da Agronomia”, Viçosa-Mg. **Revista de Ciências Ambientais**, v. 10, n. 2, p. 141–155, 2016, [doi:10.18316/1981-8858.16.36](https://doi.org/10.18316/1981-8858.16.36).

VUOLLEKOSKI, H.; VOGT, M.; SINCLAIR, V.A.; DUPLISSY, J.; JARVINEN, H.; KYRO, E.M.; MAKKONEN, R.; PETAJA, T.; PRISLE, N.L.; RAISANEN, P.; SIPILA, M.; YLHAISI, J.; KULMALA, M. Estimates of global dew collection potential on artificial surfaces. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 19, n. 1, p. 601–613, 2015, [doi: 10.5194/hess-19-601-2015](https://doi.org/10.5194/hess-19-601-2015).

WHITE, B.; SARKAR, A.; KIETZIG, A. M. Fog-harvesting inspired by the Stenocara beetle - An analysis of drop collection and removal from biomimetic samples with wetting contrast. **Applied Surface Science**, v. 284, p. 826–836, 2013, [doi: 10.1016/j.apsusc.2013.08.017](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.08.017).

ZOTARELLI, L.; DUKES, M.D; ROMERO, C.C; MIGLIACCIO, K.W; MORGAN, K.T. Step by Step Calculation of the Penman-Monteith Evapotranspiration (FAO-56 Method) Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, p. 1-10, 2010. Disponível em: < <http://edis.ifas.ufl.edu/pdf/FILES/AE/AE45900.pdf>>. Acesso em 05 out. 2018.

## Capítulo 4: Mapeamento do potencial de orvalho no Brasil

### 4.1 Introdução

Os recursos hídricos são indispensáveis para a sobrevivência dos seres humanos e de toda a natureza. Porém, estudos afirmam que a depleção de fontes tradicionais de água poderá aumentar significativamente nas próximas décadas em resposta ao crescimento populacional e ao desenvolvimento econômico sem preocupação ambiental (DISTEFANO; KELLY, 2017; MAGRINI *et al.*, 2017). Além disso, diversas regiões do planeta, principalmente regiões áridas e semiáridas já sofrem com a falta de água. Estima-se mundialmente que mais de uma pessoa em seis não tem acesso adequado a água potável (ALGARNI; SALEEL; MUJEEBU, 2018). Como consequência, a escassez de água potável se torna um dos problemas mais críticos em escala global (MING *et al.*, 2017).

Diante deste cenário de escassez de água própria para consumo, pesquisas sobre fontes alternativas de água vem sendo desenvolvidas em diversos lugares do mundo. A água de chuva, dessalinização e reuso de água cinza são algumas fontes de água que tem sido consideradas para complementar os recursos hídricos ou minimizar o consumo das fontes usuais. A captação de orvalho, também é uma fonte alternativa de água que vem sendo estudada com vistas a sua utilização em regiões e/ou situações com dificuldades ao acesso de água.

O orvalho é um evento global e natural que acontece quando o vapor de água presente no atmosférico se condensa sob uma superfície. Embora, na maioria das vezes, seja coletado em pequena quantidade, o orvalho não deve ser negligenciado, pois pode ser uma importante fonte para complementar os recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas (TOMASZKIEWICZ *et al.*, 2015).

Os estudos referentes a captação de orvalho são relativamente limitados e, conseqüentemente, há dificuldades em analisar a viabilidade desta tecnologia. Dessa forma, modelos matemáticos podem também ser utilizados para estimar o rendimento da produção de orvalho na ausência de série de dados meteorológicos significativa. Assim, análises geoestatísticas, juntamente com estes modelos matemáticos podem ser utilizados para estimar espacialmente o potencial do rendimento de orvalho em uma dada região (TOMASZKIEWICZ *et al.*, 2016).

Estudos de mapeamento de potencial de orvalho não são comumente encontrados. Porém, Tomaszewicz *et al.*, (2016) realizaram um mapeamento de rendimento de orvalho para a região do mediterrâneo, utilizando o modelo desenvolvido por Beysens (2016). Assim, o mapeamento do potencial de captação de orvalho pode ser utilizado para analisar locais que apresentam o melhor rendimento de orvalho.

## **4.2 Objetivos**

Objetiva-se mapear o potencial da produção de orvalho por meio do resfriamento radiativo passivo no território brasileiro.

### **4.2.1 Objetivo específicos**

- (i) Avaliar a diferença de temperatura entre temperatura ambiente e a temperatura de ponto de orvalho;
- (ii) Avaliar a demanda de energia para a condensação de vapor de água;
- (iii) Avaliar a razão de mistura e disponibilidade hídrica da atmosfera; e
- (iv) Elaborar mapa interativo do potencial de produção de orvalho.

## **4.3 Metodologia**

O mapeamento de potencial de captação de água presente no ar atmosférico foi realizado por microrregião e por estados do Brasil. Como métricas, mapeou-se a temperatura necessária para resfriamento do ar e, conseqüentemente, condensação do vapor de água, a disponibilidade hídrica, a razão de mistura, a energia necessária no processo de condensação desse vapor de água e o rendimento de orvalho de acordo com o modelo desenvolvido por Beysens (2016) (Equação 4.1).

$$R_e = \left\{ 0,37 [1 + 0,204323 H - 0,0238893 H^2 - (18,0123 - 1,04963 H + 0,21891 H^2) 10^{-3} T_o] \left( \frac{T_o + 273,15}{285} \right)^4 \left( 1 - \frac{N}{8} \right) \right\} \quad (4.1)$$

$$+ [0,06(T_o - T_a)] \left( 1 + 100 \left\{ 1 - e^{-\left( \frac{V}{V_o} \right)^{20}} \right\} \right)$$

0, se  $R_e < 0$ .

em que,

- $R_e$  = Rendimento de orvalho durante a noite, considerando 12 horas (mm/m<sup>2</sup>);
- $H$  = Elevação do local (km);
- $T_o$  = Temperatura de Ponto de Orvalho (°C);
- $T_a$  = Temperatura do ar ambiente (°C);
- $N$  = Cobertura da nuvem (oktas);
- $V$  = Velocidade do vento (m/s) a 10 m de elevação; e
- $V_o$  = Velocidade do vento de 4,4 m/s (velocidade máxima para a formação de orvalho, (BEYSENS, 2016)).

O uso dos dados provenientes das estações convencionais para a nebulosidade faz-se necessário, uma vez que as estações automáticas não mensuram nebulosidade, parâmetro este, indispensável para a análise da produção de orvalho. Porém, grande parte das estações meteorológicas presentes no território brasileiro são do tipo automática. Dessa forma, estimou-se o rendimento de orvalho para a melhor condição de nebulosidade, ou seja, quando o céu está claro, pois é quando geralmente há maior rendimento de orvalho (BEYSENS, 2016).

A estimativa foi realizada utilizando dados do horário de 06 da manhã, horário próximo ao nascer do sol e utilizado também por Lekouch *et al.* (2012) para a estimativa de rendimento.

Dessa forma, utilizando a estimativa de Beyens (2016) para um período noturno de 12 horas, corrigiu-se esta estimativa para um período de 7 horas consideradas neste estudo, de acordo com a equação 4.2.

$$R_{eT} = \frac{T}{B} R_e \quad (4.2)$$

em que,

- $R_e$  = Rendimento de orvalho durante a noite, considerando um período noturno de 12 horas (mm/dia);
- $B$  = Período completo de análise de 12 horas/dia
- $T$  = Período de análise (horas/dia); e
- $R_{eT}$  = Rendimento de orvalho, considerando T horas (mm/dia).

O mapeamento da temperatura do ar ambiente e da umidade relativa do ar foi realizado com o objetivo de se analisar as correlações com os outros parâmetros analisados, aqui denominados de métricas, ou seja: (i) a diferença de temperatura entre temperatura ambiente e a temperatura de ponto de orvalho; (ii) a demanda de energia para a condensação de vapor de água; e (iii) razão de mistura e disponibilidade hídrica da atmosfera. Todos os mapeamentos foram feitos usando valores médios.

Primeiramente, coletou-se os dados de hora em hora das estações automáticas gerenciadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para o território brasileiro para o período de um ano (maio de 2017 até maio de 2018) (INMET, 2018). Ao todo, foram computados dados de 527 estações, porém, diversas estações meteorológicas possuíam muitos dados nulos, dessa forma, foram filtradas as estações que possuíam menos de 80% dos dados para o período em estudo. Assim, analisou-se um total de 418 estações meteorológicas. Ademais, foram considerados os dados apenas do período noturno, horário entre 23 horas às 06 horas, uma vez que o horário noturno favorece a formação natural de orvalho devido a maior umidade relativa do ar quando comparados com os valores do período diurno.

Para a classificação por microrregião e por estados, utilizou-se o mapa de malhas digitais territoriais (*shapefile*), disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) para o ano de 2015 (IBGE, 2015). Juntamente com a biblioteca “*geopandas*”, uma extensão geoespacial da biblioteca “*pandas*”, biblioteca comumente utilizada para análise de dados na linguagem de programação *Python*. Desta forma, foi possível classificar os dados coletados das estações meteorológicas quanto à localização geográfica (microrregião e estado) com base nas coordenadas geográficas (latitude e longitude).

Os mapas foram desenvolvidos usando o software livre QGis 3.03, juntamente com dados geoespaciais do território brasileiro, no formato *shapefile*, e os dados calculados. Para cada microrregião e estado em análise, mapeou-se a média de cada uma das métricas em analisadas. As microrregiões que não foram analisadas devido à ausência de estações meteorológicas instaladas ou à presença de muitos dados nulos foram indicadas no mapa. Ademais, desenvolveu-se um mapa interativo online em que é possível observar todos os parâmetros estudados neste trabalho para quaisquer uma das estações meteorológicas em análise de interesse do usuário.

#### **4.3.1 Métricas de mapeamento**

##### **Resfriamento médio necessário para a condensação**

Um parâmetro importante na avaliação do potencial de captação de orvalho é o quanto o ar ambiente precisa ser resfriado para que o vapor de água presente no ar atmosférico se condense. Dessa forma, para o mapeamento desse parâmetro, analisou-se a diferença entre a temperatura ambiente do ar e a temperatura de ponto de orvalho (Equação 4.3), temperatura na qual o vapor de água passa do estado de vapor para o estado líquido.

$$R_n = T_a - T_{po} \quad (4.3)$$

em que,

$R_n$  = Resfriamento necessário (°C);

$T_a$  = Temperatura do ambiente do ar (°C); e

$T_{po}$  = Temperatura de ponto de orvalho(°C).

### Razão de mistura média

O mapeamento do território brasileiro foi realizado de acordo com a razão entre a quantidade de vapor de água presente no ar e a quantidade de ar seco em um volume de mistura, ou seja razão de mistura (W). Desta forma, a razão de mistura representa a quantidade real de vapor de água contido no ar. O cálculo da razão de mistura (Equação 4.4) depende da pressão parcial de vapor (Equação 4.5) (MORAN et al., 2013; WILHELM, 1976).

$$W = 0,62198 \frac{P_v}{P - P_v} 1000 \quad (4.4)$$

em que,

- W = Razão de mistura (g vapor.kg ar seco<sup>-1</sup>);  
P = Pressão atmosférica (kPa); e  
P<sub>v</sub> = Pressão parcial de vapor (kPa). (Equação 4.5).

$$P_v = \frac{u_r}{100} P_{vs} \quad (4.5)$$

em que,

- u<sub>r</sub> = Umidade relativa (%);  
P<sub>vs</sub> = Pressão de vapor de saturação, kPa. (Equação 4.6a ou 4.6b)  
(WILHELM, 1976); e  
P<sub>v</sub> = Pressão parcial de vapor, kPa.

$$\ln(P_{vs}) = 24,2779 - \frac{6238,64}{T_{bs}} - 0,344438 \ln(T_{bs}) \quad (4.6a)$$

$$-40^\circ\text{C} \leq T_{bs} \leq 0^\circ\text{C}$$

$$\ln(P_{vs}) = \frac{-7511,52}{T_{bs}} + 89,63121 + 0,023998970 T_{bs} - 1,1654551 \times 10^{-5} T_{bs}^2 - 1,2810336 \times 10^{-8} T_{bs}^3 + 2,0998405 \times 10^{-11} T_{bs}^4 - 12,150799 \ln(T_{bs}) \quad (4.6b)$$

$$110 \text{ }^\circ\text{C} \geq T_{bs} \geq 0 \text{ }^\circ\text{C}$$

em que,

- $P_{vs}$  = Pressão de vapor de saturação (kPa); e  
 $T_{bs}$  = Temperatura de bulbo seco (K).

Dessa forma, foi mapeado a razão de mistura ( $\text{g}_{\text{vapor de água}} \cdot \text{kg}_{\text{ar}}^{-1} \cdot \text{seco}^{-1}$ ) por microrregião brasileira.

### Disponibilidade hídrica média na atmosfera

O cálculo da razão de mistura (Equação 4.7) foi realizado com base no massa específica do ar (Equação 4.8).

$$R_m = W \frac{1}{v} \quad (4.7)$$

em que,

- $U_a$  = Umidade absoluta ( $\text{g}_{\text{vapor}} \cdot \text{m}^3_{\text{ar}}^{-1} \cdot \text{seco}^{-1}$ );  
 $W$  = Razão de mistura ( $\text{g}_{\text{vapor}} \cdot \text{kg}_{\text{ar}}^{-1} \cdot \text{seco}^{-1}$ ); e  
 $v$  = Volume específico ( $\text{m}^3/\text{kg}$ ) (Equação 4.8) (WILHELM, 1976).

$$v = \frac{R_a T_{bs}}{P} (1 + 1,6078 W) \quad (4.8)$$

em que,

- $R_a$  = Constante dos gases para o ar ( $0,28705 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ );  
 $T_{bs}$  = Temperatura de bulbo seco (K);  
 $P$  = Pressão atmosférica (kPa);

A disponibilidade hídrica da região em estudo para mapeamento foi computada de acordo com a Equação 4.9, considerando a velocidade do vento e umidade absoluta (SILVA *et al.*, 2010).

$$M = U_a v \Delta T \quad (4.9)$$

em que,

- M = Massa de água disponível (kg/m<sup>2</sup>);
- U<sub>a</sub> = Umidade absoluta (kg vapor de água /m<sup>3</sup> ar seco);
- v = Velocidade do vento (m/s); e
- ΔT = Intervalo de tempo em análise (s).

Para o mapeamento, não foi estipulado a área da superfície e nem o período de análise, dessa forma, a disponibilidade hídrica na atmosfera foi estimada em Kg<sub>água</sub>/m<sup>2</sup>/hora do período noturno.

#### **Demanda de energia média para a condensação do vapor de água**

Ao ser resfriado o ar transfere calor para a superfície condensadora. O calor latente de condensação é a energia necessária para que ocorra a mudança de fase entre o vapor de água e a água em estado líquido. Já o calor sensível é responsável apenas por uma variação de temperatura no objeto. Dessa forma, a energia necessária por quilograma de água para a transformação da água do estado de vapor para líquido é dado pela soma do calor latente e do calor sensível (Equação 4.10).

$$Q = Q_s + Q_L \quad (4.10)$$

em que:

- Q = Energia envolvida no processo de condensação do vapor de água (Joules/kg)
- Q<sub>s</sub> = Calor sensível (Joules) (Equação 4.11);
- Q<sub>L</sub> = Calor latente (Joules) (Equação 4.12);

$$Q_s = m c_p \Delta T \quad (4.11)$$

em que:

- $m$  = Massa de ar úmido (kg);
- $Q_s$  = Calor sensível (Joules);
- $\Delta T$  = Diferença de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ); e
- $c_p$  = Calor específico do ar a pressão constante ( $1,005 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ )

$$Q_L = -mL_V \quad (4.12)$$

em que:

- $m$  = Massa de água formada (kg);
- $L_V$  = Calor latente de vaporização ( $L_V = 2260 \text{ kJ/kg}$ ).

Como a demanda de energia por quilograma de água foi calculado em kJ/kg de água, para o mapeamento deste parâmetro, multiplicou-se o valor encontrado pela constante de conversão 0,0002778 para a conversão em kWh/ kg de água.

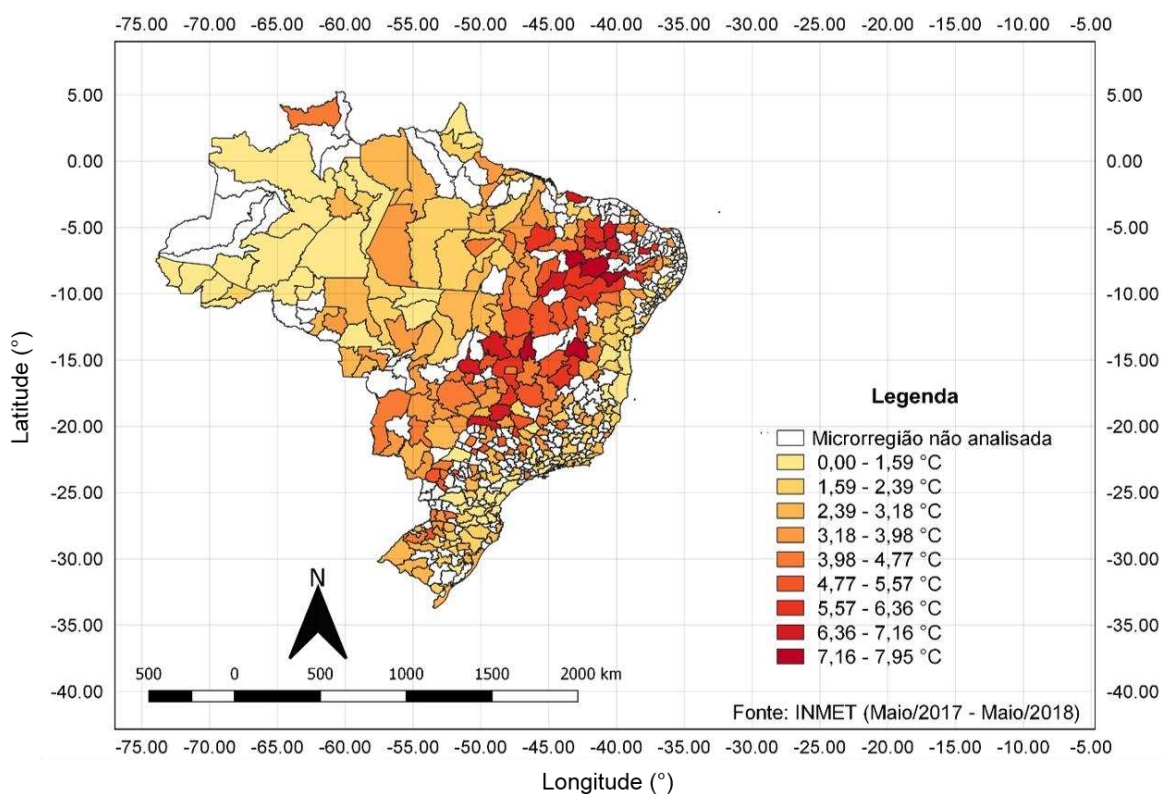
#### 4.3.2 Mapa interativo

O mapa iterativo com os parâmetros estudados das estações meteorológicas foi desenvolvido utilizando o “*My maps*”, um serviço disponibilizado pelo Google para criação de mapas. Nele é possível observar os parâmetros analisados neste trabalho: diferença média de temperatura entre a temperatura do ar ambiente e a temperatura de ponto de orvalho, demanda de energia média envolvida na condensação do vapor de água, a razão de mistura média do ar, disponibilidade hídrica média e estimativa de produção de orvalho usando o resfriamento radiativo, assim como a temperatura média do ar ambiente, umidade relativa média do ar, temperatura média de ponto de orvalho, altitude, latitude e longitude para cada estação meteorológica.

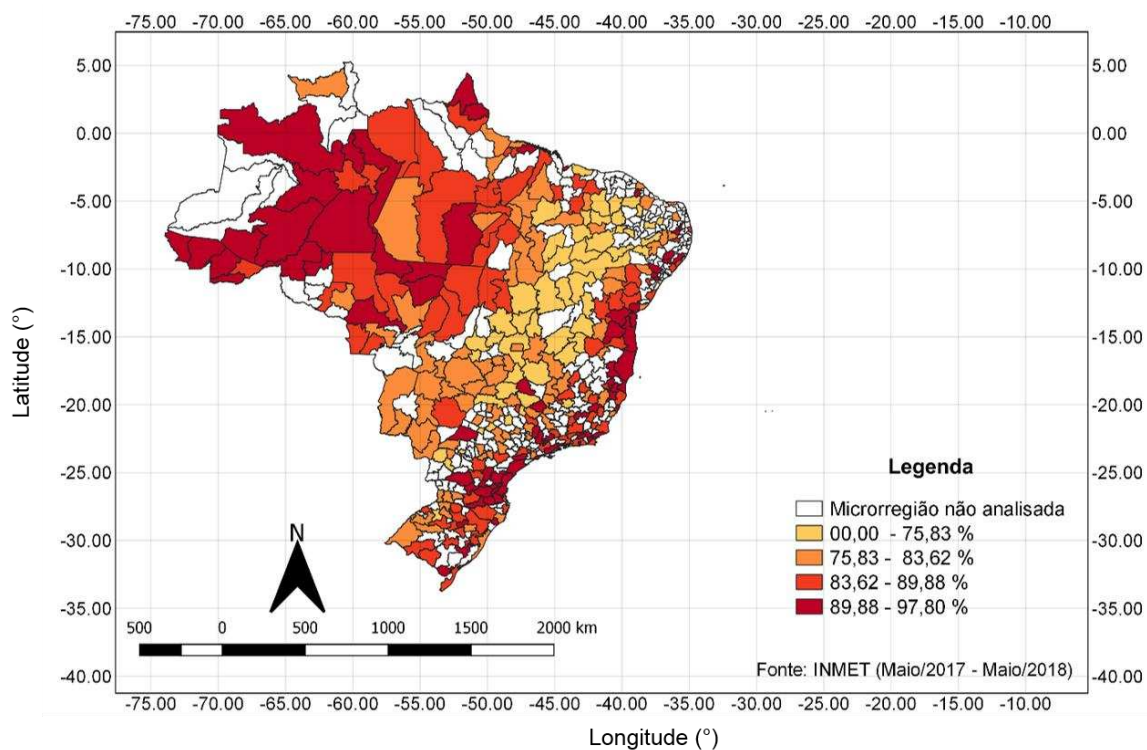
## 4.4 Resultados e discussão

### 4.4.1 Mapeamento do resfriamento necessário para condensação do vapor de água

A Figura 4.1 apresenta o mapeamento do território brasileiro quanto ao resfriamento necessário para condensação do vapor de água atmosférico. A maior amplitude de resfriamento encontrada no território brasileiro foi de 7,95 °C para a microrregião Alto Médio Canindé, localizada no estado do Piauí. Já a menor foi de 0,35 °C para a microrregião de São Bento do Sul, localizada no estado de Santa Catarina. A região de São Bento do Sul apresentou a maior umidade relativa média de 97,8%. Já a região do Anto Médio Canindé apresentou a segunda menor umidade relativa média de 63,6%. O mapeamento da umidade relativa média do ar no território brasileiro pode ser observado na Figura 4.2.



**Figura 4.1:** Mapeamento do resfriamento médio do ar necessário para condensação do vapor de água no território brasileiro entre 23 horas e 06 horas no período de maio de 2017 até maio de 2018.



**Figura 4.2:** Mapeamento da umidade relativa média do ar no território brasileiro entre 23 horas e 06 horas no período de maio de 2017 até maio de 2018.

Observa-se por meio da Figura 4.1 e da Figura 4.2 que as regiões que necessitam de um maior resfriamento médio do ar para condensação se encontram na região centro-oeste e no interior do nordeste. Além disso, estas regiões também apresentam o menor valor de umidade relativa média do ar durante a noite. Este fato comprova a forte correlação entre a umidade absoluta do ar e a diferença entre a temperatura do ar ambiente e a temperatura de ponto de orvalho, ou seja o resfriamento necessário para condensação.

O resfriamento médio para condensação e a umidade relativa média do ar para os estados brasileiros apresentaram uma forte correlação negativa de  $-0,996$ , de acordo com o método de correlação de Pearson e um valor-p de  $1,846 \times 10^{-28}$ . Isso se explica pelo fato de que a temperatura de ponto de orvalho ser inversamente proporcional à umidade relativa do ar, ou seja, quanto maior a umidade relativa do ar, menor é a temperatura de ponto de orvalho. Dessa forma, o resfriamento do ar necessário para condensação depende da temperatura de ponto de orvalho, e consequentemente, da umidade relativa do ar.

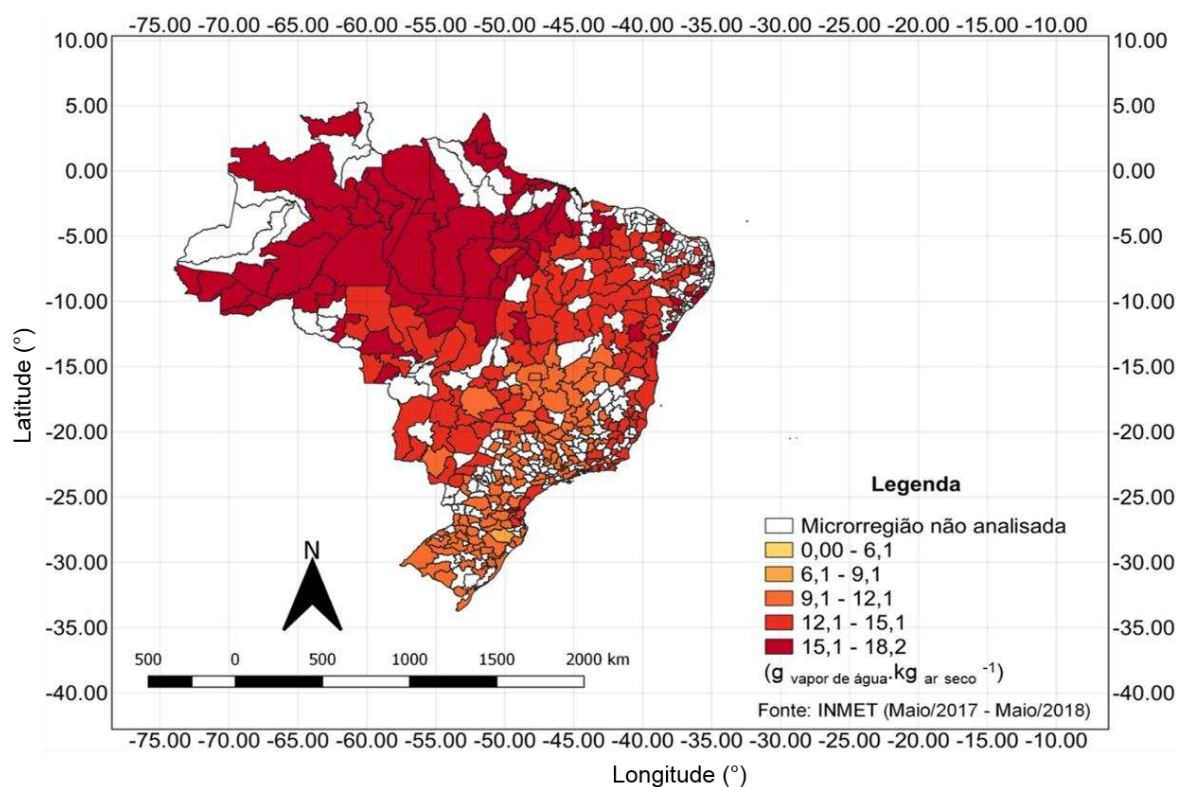
O Quadro 4.1 apresenta a média da umidade relativa do ar e do resfriamento necessário para a condensação, assim como a quantidade de estações meteorológicas analisadas em cada estado. Nota-se que o estado do Amapá, localizado na região norte, apresentou o maior valor de umidade relativa média de cerca de 92,03% e menor necessidade de resfriamento do ar para condensação de aproximadamente 1,107 °C. Já o estado de Piauí, localizado no noroeste da região nordeste, apresentou a maior necessidade média de resfriamento do ar (6,043 °C) devido sua menor umidade relativa do ar média (71,855 %) em comparação com os estados brasileiros.

**Quadro 4.1:** Resfriamento médio do ar para condensação e umidade relativa média para os estados brasileiros entre 23 horas e 06 horas no período de maio de 2017 até maio de 2018

Estado	Estações analisadas	Resfriamento médio do ar para condensação (°C)		Umidade relativa média (%)	
		Valor	Desvio padrão	Valor	Desvio padrão
Amazonas	17	1,370	0,619	92,020	3,250
Acre	4	1,463	0,476	91,582	2,553
Alagoas	4	1,565	0,711	91,14	3,935
Amapá	3	1,107	0,707	93,753	3,794
Bahia	32	3,008	1,816	84,043	8,626
Ceará	9	4,870	1,810	75,488	8,377
Distrito Federal	4	4,700	0,429	76,475	1,905
Espírito Santo	8	1,816	0,695	89,682	3,659
Goiás	21	5,063	1,426	75,417	5,611
Maranhão	14	3,830	1,669	80,555	7,395
Minas Gerais	54	3,427	1,595	81,865	7,316
Mato Grosso do Sul	21	3,511	1,052	81,683	4,866
Mato Grosso	31	2,590	1,196	86,224	5,675
Pará	21	2,628	0,965	85,803	4,713
Paraíba	6	3,017	1,767	83,955	8,210
Pernambuco	7	4,027	2,291	79,319	10,487
Piauí	14	6,043	1,478	71,855	5,974
Paraná	18	2,800	1,658	85,054	8,066
Rio de Janeiro	18	2,097	0,715	88,221	3,695
Rio Grande do Norte	4	4,125	1,245	78,400	5,672
Rondônia	4	2,110	0,956	88,405	4,778
Roraima	1	4,450	-	77,070	-
Rio Grande do Sul	33	2,629	0,812	85,342	4,076
Santa Catarina	17	2,231	1,263	87,612	6,262
Sergipe	5	1,968	1,741	89,268	8,758
São Paulo	27	2,880	1,475	84,486	7,176
Tocantins	19	3,545	1,709	82,404	7,230

#### 4.4.2 Mapeamento razão de mistura

A razão de mistura média das microrregiões analisadas apresentou uma variação de 8,939  $\text{g}_{\text{vapor de água}} \cdot \text{kg}_{\text{ar seco}}^{-1}$  a 18,157  $\text{g}_{\text{vapor de água}} \cdot \text{kg}_{\text{ar seco}}^{-1}$ , tendo o valor máximo em Aglomeração Urbana de São Luís, Maranhão, e o mínimo na microrregião de Campos de Lages, Santa Catarina. Observa-se pela figura 4.3 que a região norte é a região que possui uma maior quantidade média de água por quilograma de ar seco, 15,1  $\text{g}_{\text{vapor de água}} \cdot \text{kg}_{\text{ar seco}}^{-1}$  a 18,2  $\text{g}_{\text{vapor de água}} \cdot \text{kg}_{\text{ar seco}}^{-1}$ . Dessa forma, considerando a quantidade de água por volume de ar, a região norte tem maior potencial para captação de água do ar atmosférico, pois em um mesmo volume de ar, mais água poderia ser coletado do que as demais regiões. Além disso, a região norte é também a região em que é necessário um menor resfriamento do ar para que haja a condensação (Figura 4.1).



**Figura 4.3:** Mapeamento da razão de mistura média do ar no território brasileiro entre 23 horas e 06 horas no período de maio de 2017 até maio de 2018.

O Quadro 4.2 apresenta a média da razão de mistura do ar durante o período noturno para os estados do território brasileiro. O estado do Amapá, localizado na

região norte, apresenta uma maior quantidade de vapor de água no ar de 17,481 g<sub>vapor de água</sub>.kg<sub>ar seco</sub><sup>-1</sup>, assim como uma maior umidade relativa do ar e menor necessidade de resfriamento do ar para condensação, o que comprova o maior potencial de captação de orvalho do Amapá quando comparado com outros estados brasileiros.

**Quadro 4.2:** Razão de mistura média para os estados brasileiros entre 23 horas e 06 horas no período de maio de 2017 até maio de 2018

Estado	Razão de mistura média	
	(g <sub>vapor de água</sub> .kg <sub>ar seco</sub> <sup>-1</sup> )	
	Valor médio	Desvio padrão
Amazonas	17,344	0,495
Acre	15,788	0,704
Alagoas	15,893	0,386
Amapá	17,481	0,231
Bahia	13,873	1,315
Ceará	14,362	1,145
Distrito Federal	11,114	0,192
Espírito Santo	13,663	0,707
Goiás	11,947	0,936
Maranhão	15,126	1,363
Minas Gerais	11,622	0,932
Mato Grosso do Sul	12,762	0,835
Mato Grosso	14,627	1,297
Pará	16,437	0,973
Paraíba	14,271	1,091
Pernambuco	13,311	0,661
Piauí	13,865	1,257
Paraná	11,449	0,944
Rio de Janeiro	12,947	0,997
Rio Grande do Norte	15,041	1,139
Rondônia	16,134	1,271
Roraima	15,889	-
Rio Grande do Sul	10,403	0,605
Santa Catarina	10,992	1,025
Sergipe	15,050	0,475
São Paulo	11,675	0,841
Tocantins	14,259	1,277

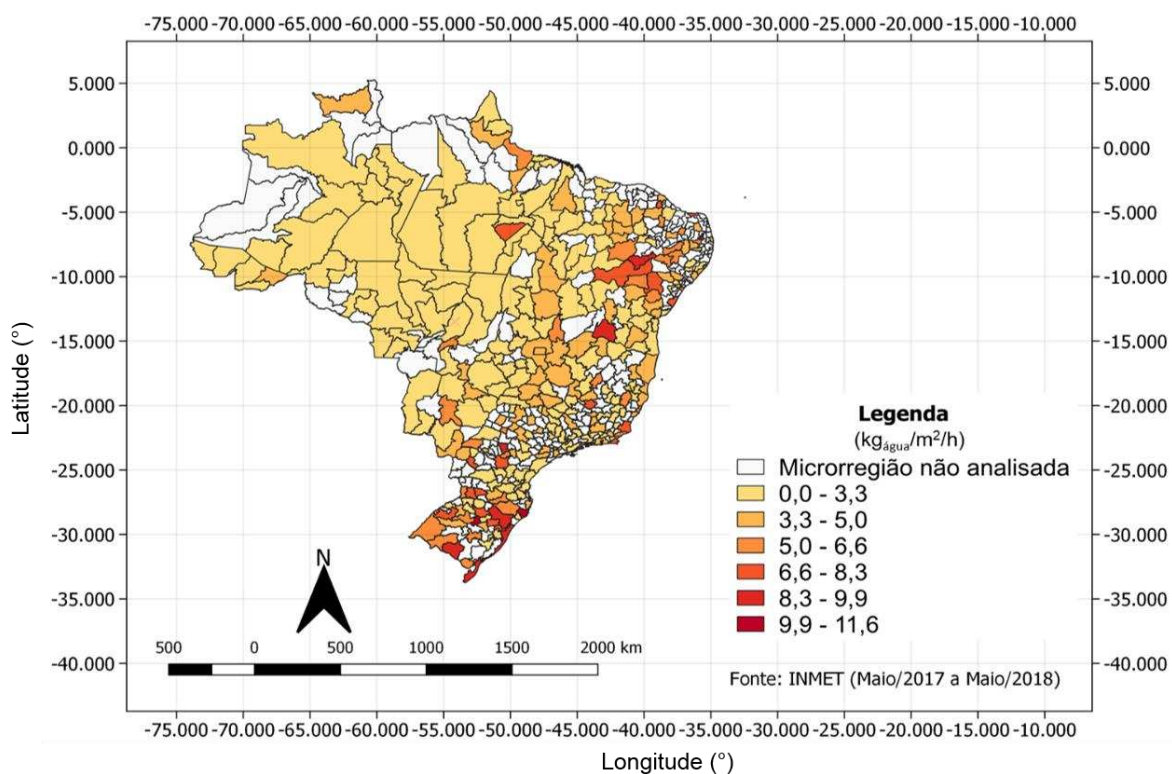
Um dos possíveis fatores que favorecem na quantidade de vapor de água presente na atmosfera é a grande área de mata preservada no estado do Amapá, o que contribui para maior razão de mistura devido a transpiração das plantas. O estado do Amapá, estado mais preservado do país, possui cerca de 70% de sua

área coberta pela floresta amazônica, sendo que aproximadamente 72% do seu território se encontra dentro dessa reserva ambiental (Tostes e Ferreira, 2016).

#### 4.4.3 Mapeamento disponibilidade hídrica

A Figura 4.4 apresenta o mapeamento da disponibilidade hídrica média no Brasil. Observa-se que a microrregião que apresenta maior volume de água  $11,584 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{m}^2/\text{h}$  na microrregião de Turbarão, Santa Catarina e o menor volume de água na atmosfera na microrregião Gerais de Balsas, Maranhão,  $1,028 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{m}^2/\text{h}$ .

A disponibilidade hídrica na atmosfera em grande parte das microrregiões do território apresentam uma disponibilidade hídrica de até  $3,3 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{m}^2/\text{h}$ . A média da disponibilidade hídrica na atmosfera brasileira é de  $3,623 \text{ kg}_{\text{água}}/\text{m}^2/\text{h}$ , com um desvio padrão de 1,982.



**Figura 4.4:** Mapeamento da disponibilidade hídrica no território brasileiro entre 23 horas e 06 horas no período de maio de 2017 até maio de 2018.

O Quadro 4.3 apresenta o valor médio da disponibilidade hídrica na atmosfera por estado brasileiro, assim como a velocidade do vento a 10 metros de altitude, uma vez que a disponibilidade hídrica é influenciada pela velocidade do vento. Neste mapeamento, considera-se apenas a velocidade do vento como mecanismo para a renovação do ar no processo de condensação. Elementos ativos, como ventiladores, também podem ser utilizados para a renovação do ar.

Observa-se pelo Quadro 4.3 que o estado do Rio Grande do Norte, Localizado na região nordeste possui a maior disponibilidade hídrica média quando comparado com os demais estados. Já o estado do Amazonas possui a menor disponibilidade hídrica média. Considerando uma mesma área por um mesmo período de tempo, a disponibilidade hídrica depende apenas na razão de mistura e da velocidade do vento. Assim, calculou-se a correlação entre a disponibilidade hídrica média e a razão de mistura média e a correlação entre a disponibilidade hídrica média e a velocidade do vento média (10 metros de altitude). Observa-se que para a primeira análise, a correlação foi de -0.451 com um valor-p de 0.0182. Já para a segunda análise, a correlação foi de 0,9967 com um valor-p de  $7.954 \times 10^{-29}$ .

Observa-se que a velocidade do vento média possui maior interferência do que a razão de mistura média na estimativa da disponibilidade hídrica média na atmosfera. Dessa forma, observa-se que os estados que apresentaram maiores valores de velocidade do vento média possuem uma maior disponibilidade hídrica média. Porém, a avaliação desse parâmetro é necessária apenas em tecnologias de captação de água do ar atmosférico que não utilizam mecanismos ativos para a renovação do ar.

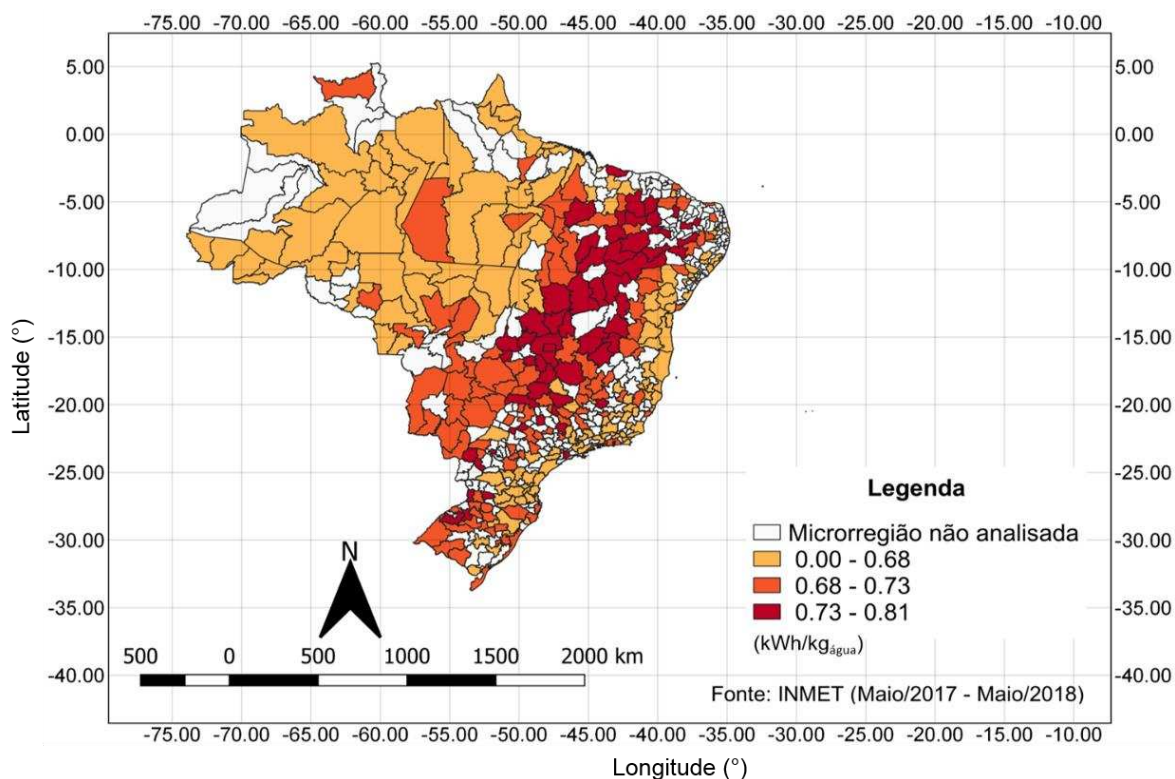
**Quadro 4.3:** Disponibilidade hídrica média e velocidade do vento média a 10 m de altitude para os estados brasileiros entre 23 horas e 06 horas no período de maio de 2017 até maio de 2018

Estado	Disponibilidade hídrica média (kg água /m <sup>2</sup> /h)		Velocidade do vento média (10 m de altitude) (m/s)	
	Valor	Desvio padrão	Valor	Desvio padrão
Amazonas	1,112	0,788	0,438	0,311
Acre	1,784	1,242	0,712	0,497
Alagoas	3,257	0,687	1,282	0,272
Amapá	2,388	0,768	0,933	0,302
Bahia	4,150	1,966	1,688	0,818
Ceará	3,473	2,427	1,420	1,016
Distrito Federal	4,146	0,201	1,820	0,098
Espírito Santo	3,536	1,323	1,381	0,511
Goiás	2,356	1,161	1,003	0,509
Maranhão	1,611	0,958	0,641	0,381
Minas Gerais	3,177	1,922	1,351	0,838
Mato Grosso do Sul	3,106	2,126	1,279	0,892
Mato Grosso	1,885	1,423	0,775	0,598
Pará	2,082	1,931	0,834	0,787
Paraíba	5,414	1,871	2,210	0,783
Pernambuco	4,997	2,365	2,061	0,977
Piauí	3,200	1,694	1,301	0,701
Paraná	4,122	2,444	1,716	1,029
Rio de Janeiro	3,855	2,548	1,519	0,985
Rio Grande do Norte	6,238	1,424	2,472	0,546
Rondônia	2,513	0,336	1,012	0,155
Roraima	3,829	-	1,520	-
Rio Grande do Sul	5,716	2,961	2,323	1,226
Santa Catarina	4,000	3,221	1,672	1,336
Sergipe	3,735	1,732	1,484	0,679
São Paulo	2,916	1,274	1,210	0,528
Tocantins	2,626	1,709	1,075	0,730

#### 4.4.4 Mapeamento da energia necessária para a condensação do vapor de água

A Figura 4.5 apresenta o mapeamento da demanda de energia média necessária na condensação do vapor de água no território Brasileiro. Observou-se

um valor máximo de 0,81 kWh/ kg de água na microrregião do Vão do Paranã, Goiás, e um valor mínimo de 0,635 kWh/ kg de água na microrregião de Carira, Sergipe.



**Figura 4.5:** Mapeamento do fluxo de calor para condensação do vapor de água no território brasileiro entre 23 horas e 06 horas no período de maio de 2017 até maio de 2018.

A quantidade de energia necessária durante o processo de condensação depende da diferença de temperatura entre o ar ambiente e a temperatura de ponto de orvalho. Dessa forma, a demanda de energia depende fortemente do quanto o ar necessita ser resfriado para que haja condensação. Assim, estes parâmetros apresentaram uma correlação de 0,9695 e um valor-p de  $7.70441 \times 10^{-15}$ . Ademais, a demanda de energia envolvida na condensação também depende fortemente da umidade do ar, correlação de -0,9567 e um valor-p de  $6,5701 \times 10^{-15}$ .

O Quadro 4.4 apresenta a energia média necessária na condensação para os estados brasileiros. Observou-se que a menor demanda de energia foi encontrada no estado do Amapá. Já a maior demanda de energia foi observada no estado do Piauí. Dessa forma, o Amapá reafirma o seu potencial de captação de orvalho em relação a demanda de energia para a condensação do vapor de água.

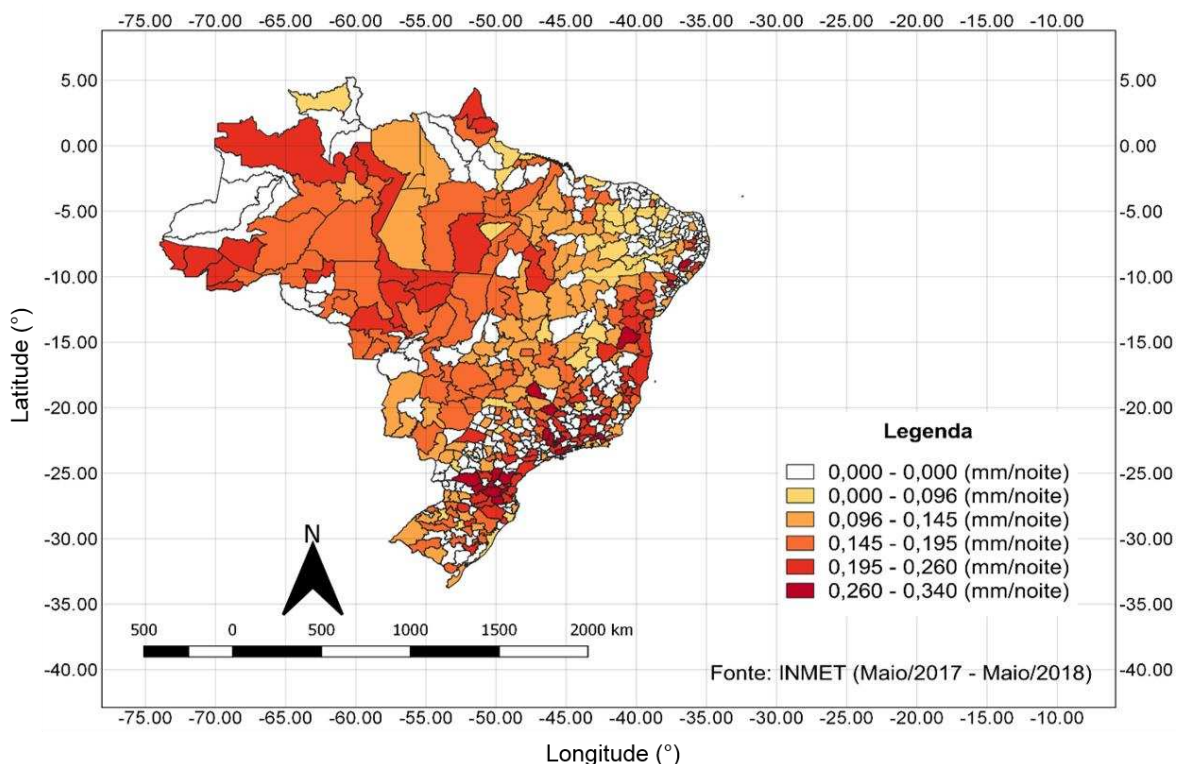
**Quadro 4.4:** Demanda de energia média para a condensação para os estados brasileiros entre 23 horas e 06 horas no período de maio de 2017 até maio de 2018

Estado	Demanda de energia média (kWh/kg <sub>água</sub> )	
	Valor	Desvio padrão
Amazonas	0,650	0,010
Acre	0,654	0,009
Alagoas	0,656	0,013
Amapá	0,645	0,011
Bahia	0,691	0,043
Ceará	0,725	0,040
Distrito Federal	0,746	0,011
Espírito Santo	0,665	0,016
Goiás	0,747	0,037
Maranhão	0,701	0,038
Minas Gerais	0,711	0,040
Mato Grosso do Sul	0,705	0,025
Mato Grosso	0,679	0,028
Pará	0,673	0,019
Paraíba	0,689	0,038
Pernambuco	0,714	0,053
Piauí	0,752	0,035
Paraná	0,696	0,039
Rio de Janeiro	0,673	0,014
Rio Grande do Norte	0,706	0,029
Rondônia	0,666	0,020
Roraima	0,706	-
Rio Grande do Sul	0,699	0,023
Santa Catarina	0,686	0,035
Sergipe	0,665	0,034
São Paulo	0,698	0,037
Tocantins	0,700	0,041

#### 4.4.5 Mapeamento estimativa de rendimento de orvalho

A Figura 4.6 apresenta o mapeamento da estimativa média de produção de orvalho para o território brasileiro durante o período noturno e considerando um céu limpo, ou seja, melhor condição de nebulosidade para maximização do rendimento

de orvalho. Observa-se que o maior valor médio de produção de orvalho foi de 0,34 mm/noite para a região de São Bento do Sul, localizado no estado de Santa Catarina, sul do país. Os valores estimados para as microrregiões brasileiras variaram de 0,008 mm/ noite a 0,34 mm/noite.



**Figura 4.6:** Mapeamento da produção de orvalho média em condição de céu limpo no território brasileiro entre 23 horas e 06 horas no período de maio de 2017 até maio de 2018.

Pode-se notar tanto pela Figura 4.6 quanto pelo Quadro 4.5 que a região norte do país possui maior produção média de orvalho, sendo que os estados do Amapá e do Acre apresentaram a maior média de produção de orvalho, cerca de 0,208 mm por noite. Já o estado de Pernambuco registraram a menor média de estimativa de produção de orvalho, cerca de 0,13 mm por noite.

**Quadro 4.5:** Estimativa de produção de orvalho média sob céu limpo para os estados brasileiros entre 23 horas e 06 horas no período de maio de 2017 até maio de 2018

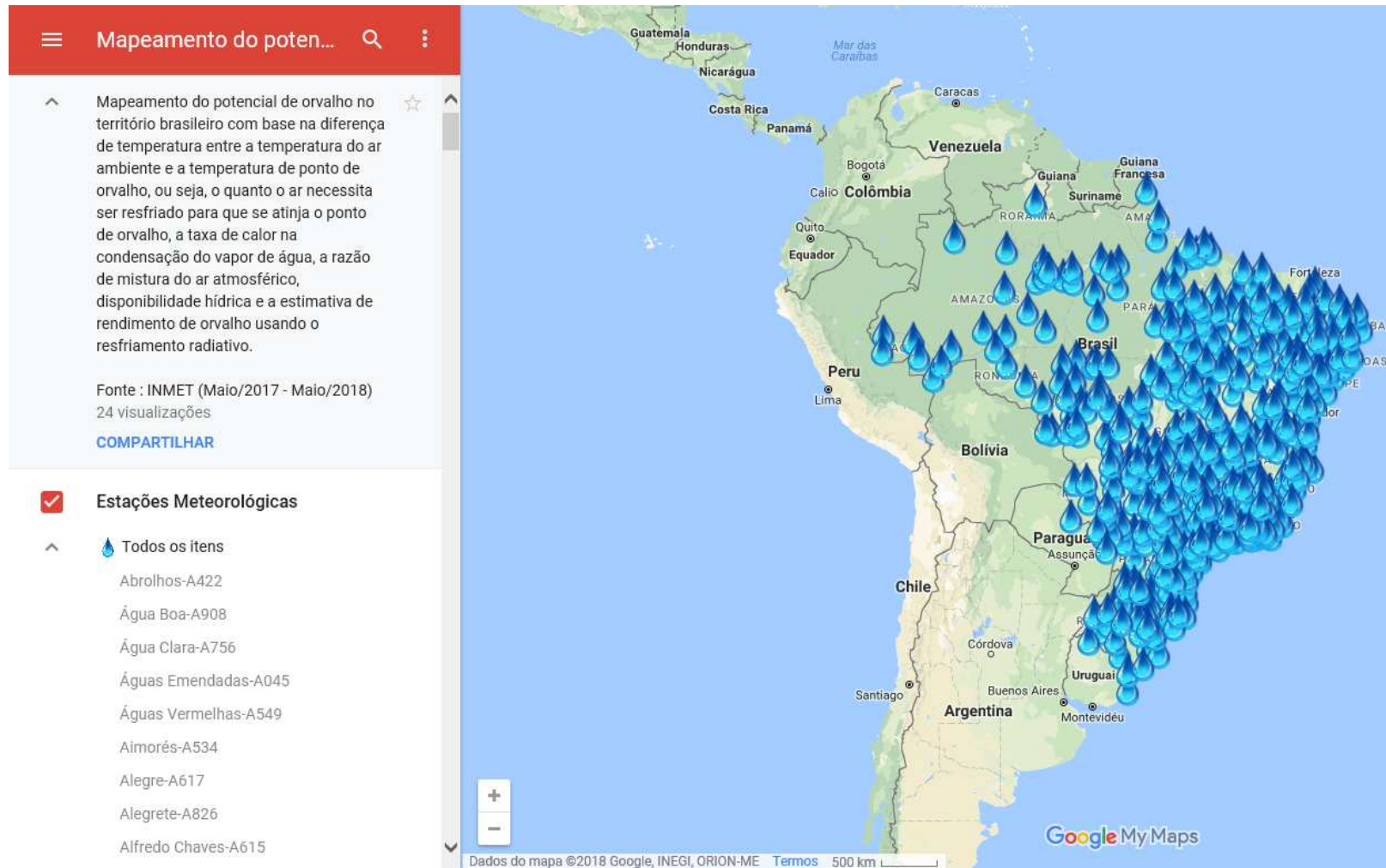
Estado	Estimativa de produção de orvalho média (mm/noite)	
	Valor	Desvio padrão
Amazonas	0,19	0,037
Acre	0,208	0,019
Alagoas	0,189	0,045
Amapá	0,208	0,033
Bahia	0,16	0,063
Ceará	0,069	0,04
Distrito Federal	0,166	0,013
Espírito Santo	0,182	0,041
Goiás	0,146	0,039
Maranhão	0,131	0,039
Minas Gerais	0,185	0,04
Mato Grosso do Sul	0,15	0,045
Mato Grosso	0,182	0,07
Pará	0,142	0,053
Paraíba	0,136	0,043
Pernambuco	0,13	0,09
Piauí	0,094	0,032
Paraná	0,184	0,089
Rio de Janeiro	0,176	0,067
Rio Grande do Norte	0,079	0,028
Rondônia	0,181	0,023
Roraima	0,066	-
Rio Grande do Sul	0,154	0,049
Santa Catarina	0,193	0,076
Sergipe	0,18	0,087
São Paulo	0,192	0,062
Tocantins	0,16	0,048

#### 4.4.6 Mapa iterativo

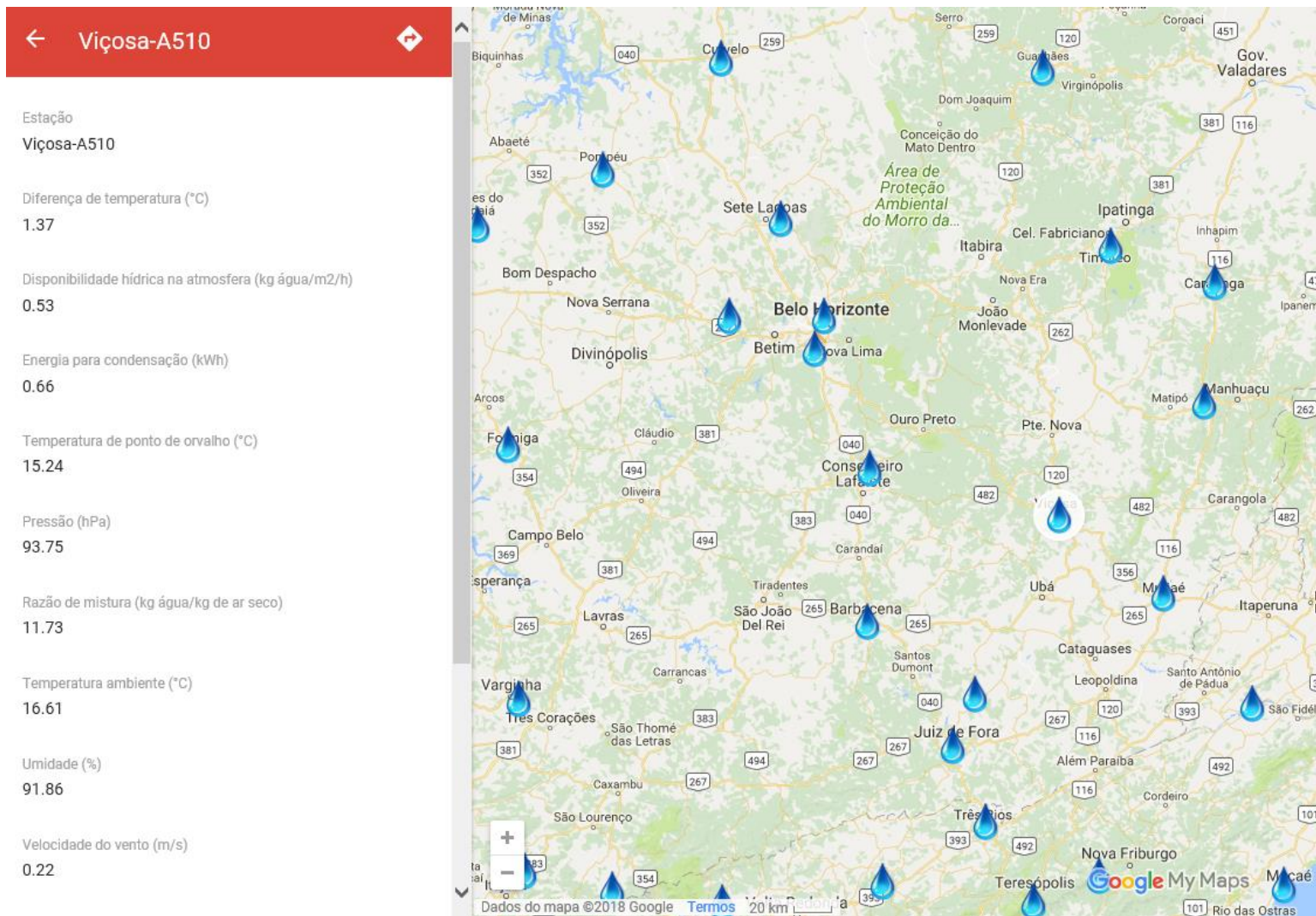
O mapa iterativo desenvolvido apresenta variáveis meteorológicas e psicrométricas médias das estações meteorológicas, além da estimativa média de produção de orvalho estudada neste trabalho. O mapa desenvolvido está disponível

no endereço: [http://bit.ly/potencial\\_orvalho\\_maps](http://bit.ly/potencial_orvalho_maps). A Figura 4.7 mostra a visão geral do mapa, com sua descrição e estações meteorológicas mapeada a esquerda.

Os marcadores em formato de gota indicam a localização da estação meteorológica com base em sua latitude e longitude. Ao clicar no marcador, é possível observar os parâmetros disponíveis para aquela estação a esquerda do mapa : diferença média da temperatura do ar ambiente e da temperatura de ponto de orvalho, disponibilidade hídrica média na atmosfera, demanda de energia média para a condensação, temperatura média de ponto de orvalho, pressão média, razão de mistura média, temperatura do ar ambiente média, umidade relativa média, velocidade do vento média, produção média de orvalho, altitude, latitude e longitude (Figura 4.8).



**Figura 4.7:** Visão geral do mapa interativo desenvolvido mostrando a localização das 418 estação meteorológica analisadas no território brasileiro.



**Figura 4.8:** Mapeamento dos parâmetros analisados para cada uma das 418 estação meteorológica ao longo do território Brasileiro no mapa interativo.

#### 4.5 Conclusões

Este trabalho analisou o potencial de captação de orvalho para o território brasileiro tendo como métricas o resfriamento do ar necessário para a condensação do vapor de água, razão de mistura, disponibilidade hídrica na atmosfera e a demanda de energia envolvida no processo de condensação. A região norte do país foi a região com maior potencial para a captação de água de orvalho, uma vez que apresentou uma menor diferença média entre a temperatura do ar ambiente e a temperatura de ponto de orvalho, maior umidade relativa do ar média, maior disponibilidade hídrica média e menor demanda de energia para a condensação. Da região norte, o estado do Amapá apresentou a maioria dos parâmetros analisados favoráveis para a captação de orvalho.

Dessa forma, este trabalho contribui para estudos na área de captação de água do ar atmosférico, uma vez que apresentou o potencial hídrico da atmosfera em diversas regiões no território brasileiro. Estudos experimentais devem ser desenvolvidos em diferentes locais do país, com o objetivo de comprovar o potencial de captação de orvalho no Brasil, principalmente no estado do Amapá.

#### 4.6 Referências bibliográficas

ALGARNI, S.; SALEEL, C. A.; MUJEEBU, M. A. Air-conditioning condensate recovery and applications— Current developments and challenges ahead. **Sustainable Cities and Society**, v, 37, n, December 2017, p, 263–274, 2018, [doi: 10.1016/j.scs.2017.11.032](https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.11.032).

BEYSENS, D. Estimating dew yield worldwide from a few meteorological data. **Atmospheric Research**, v. 167, p. 146–155, 2016, [doi:10.1016/j.atmosres.2015.07.018](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.07.018).

DISTEFANO, T.; KELLY, S. Are we in deep water? Water scarcity and its limits to economic growth. **Ecological Economics**, v, 142, p, 130–147, 2017, [doi: 10.1016/j.ecolecon.2017.06.019](https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.019).

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia E Estatística. **Malhas Digitais**. Disponível em: <https://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/bases-cartograficas/malhas-digitais.html>. Acesso em: 9 jul. 2018.

INMET- Instituto Nacional de Meteorologia. **Estações Automáticas**. Disponível em: < <http://www.inmet.gov.br/portal> >. Acesso em: 3 maio. 2018.

LEKOUCH, I.; LEKOUCH, K.; MUSELLI, M.; MONGRUEL, A.; KABBACHI, B.; BEYSENS, D. Rooftop dew, fog and rain collection in southwest Morocco and

predictive dew modeling using neural networks. **Journal of Hydrology**, v. 448–449, p. 60–72 , 2012, [doi:10.1016/j.jhydrol.2012.04.004](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.004).

MAGRINI, A.; CATTANI, L.; CARTESEGNA, M.; MAGNANI, L. Water Production from Air Conditioning Systems: Some Evaluations about a Sustainable Use of Resources. **Sustainability**, v. 9, n. 8, p. 1309 , 2017, [doi: 10.3390/su9081309](https://doi.org/10.3390/su9081309).

MING, T.; GONG, T.; RICHTER, R.K.; WU, Y.; LIU, W. A moist air condensing device for sustainable energy production and water generation. **Energy Conversion and Management**, v. 138, p, 638–650, 2017, [doi: 10.1016/j.enconman.2017.02.012](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.012).

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N.; BOETTNER, D. D.; BAILEY, M. B. **Princípios de termodinâmica para engenharia**, 7ª ed, Rio de Janeiro: LTC, 2013.

SILVA, G.; SOUZA, F.A.S.; SILVA, L.L. Estimativa da disponibilidade hídrica na atmosfera de Monteiro - PB. **2º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente**, v. i, p. 1–6, 2010.

TOMASZKIEWICZ, M.; NAJM, M. A.; BEYSENS, D.; ALAMEDDINE, I.; EL-FADEL, M. Dew as a sustainable non-conventional water resource: a critical review. **Environmental Reviews** v. 23, n. 4, p. 425–442 , 2015, [doi: 10.1139/er-2015-0035](https://doi.org/10.1139/er-2015-0035).

TOMASZKIEWICZ, M.; ABOU NAJIM, M. A.; BEYSENS, D.; ALAMEDDINE, I.; BOU ZEID, E.; EL-FADEL, M. Projected climate change impacts upon dew yield in the Mediterranean basin. **Science of the Total Environment**, v. 566–567, p. 1339–1348, 2016, [doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.05.195](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.195).

TOSTES, J.A.; FERREIRA, J.F.C. O corredor transfronteiriço entre o Amapá (BR) e a Guiana Francesa (FR). **Revista de Geopolítica**, Natal, v. 7, nº 1, p. 152 - 170, 2016.

WILHELM, L. R. Numerical calculation of psychrometric properties in SI units. **Transactions of the ASAE**, p, 318–325, 1976

## Capítulo 5: Captação de orvalho via resfriamento radiativo passivo

### 5.1 Introdução

O ar atmosférico possui uma abundância em vapor de água que pode ser aproveitado para complementar os recursos hídricos disponíveis, uma vez que a escassez de água está crescendo em escala global e há comunidades isoladas que não possuem acesso a um bem tão essencial como a água (ERNESTO; JASSON, 2016). Em resposta a essa escassez, fontes não convencionais de água, como a dessalinização, reuso de água cinza, e captação de água da atmosfera (chuva, neblina, orvalho) vem sendo estudadas, desenvolvidas e implementadas em diversas regiões do mundo.

A captação de água de orvalho, fonte não convencional de água, que utiliza o resfriamento radiativo passivo possui grandes vantagens em relação a sua simplicidade, tanto de uso quanto de instalação. Além disso, é uma tecnologia que não utiliza energia em seu modo de operação (ERNESTO; JASSON, 2016). Além do mais, esta tecnologia é muito importante, pois pode ser utilizada em grande parte do globo terrestre.

Orvalho é um evento global, em que o vapor atmosférico se condensa em uma superfície. É uma fonte de água que pode ser utilizada para complementar os recursos hídricos, podendo representar uma quantidade substancial de água em locais com limitação dos recursos hídricos, como a chuva, a neblina, os mananciais terrestres, como lagos, rios e barragens e água subterrânea (MILETA *et al.*, 2007).

Nas últimas décadas, diversos estudos foram conduzidos para maximizar a quantidade de água coletada utilizando o resfriamento radiativo passivo com materiais hidrofílicos, favorecendo assim, a condensação do vapor de água (SHARAN *et al.*, 2017).

Neste processo, a superfície condensadora perde calor para o ambiente, fazendo com que a sua temperatura fique inferior que a do ar que a circunda. Esse resfriamento acontece geralmente em noites frias, com alta umidade do ar, vento com velocidades menores que 4,4 m/s (BEYSENS, 2016) e céu claro. Dessa forma, o vapor de água ao encontrar uma superfície com temperatura igual ou inferior à de ponto de orvalho se condensa. Após a condensação, as gotículas de água se

deslizam por gravidade e podem então, serem armazenadas (TOMASZKIEWICZ *et al.*, 2015).

Para que esse processo ocorra com eficiência, a superfície condensadora deve possuir uma alta emissividade e baixa massa térmica (TOMASZKIEWICZ *et al.*, 2015; CARVAJAL *et al.*, 2018;). Além dessas, a molhabilidade da superfície, também é um importante fator no processo de nucleação, crescimento e coalescência das gotículas de água, interferindo assim, na quantidade de produção de orvalho (GERASOPOULOS *et al.*, 2018).

Dessa forma, diversos estudos, utilizando diferentes tipos de coletores de água de orvalho por meio do resfriamento radiativo passivo, vem sendo desenvolvidos no mundo (ERNESTO; JASSON, 2016).

A maioria destes sistemas consiste em um material flexível instalado sobre uma superfície inclinada para que a água coletada possa ser direcionada, por gravidade, para um coletor (GERASOPOULOS *et al.*, 2018). Geralmente, utiliza-se da comparação em pequena escala de protótipos de superfícies condensadoras de mesma área, por exemplo 1 m<sup>2</sup> de diferentes materiais, com o objetivo de estudar a produção de orvalho em uma dada região. Porém, poucos experimentos são realizados em larga escala, como superfícies condensadoras integradas em telhados de construções, por exemplo (CARVAJAL *et al.*, 2018).

## **5.2 Objetivos**

Avaliar, experimentalmente, a quantidade de água de orvalho coletada por meio do resfriamento radiativo passivo na cidade de Viçosa, Minas Gerais, utilizando diferentes tipos de superfícies condensadoras.

### **5.2.1 Objetivos específicos**

- a. Comparar diferentes superfícies condensadoras: (i) plástico preto, comumente utilizado em construções e plantações; (ii) plástico de polipropileno tipo celofane; (iii) fita adesiva de empacotamento de polipropileno; (iv) alumínio anodizado e (v) plástico padrão para captação de orvalho desenvolvido pela *International Organization for Dew Utilization* (OPUR).

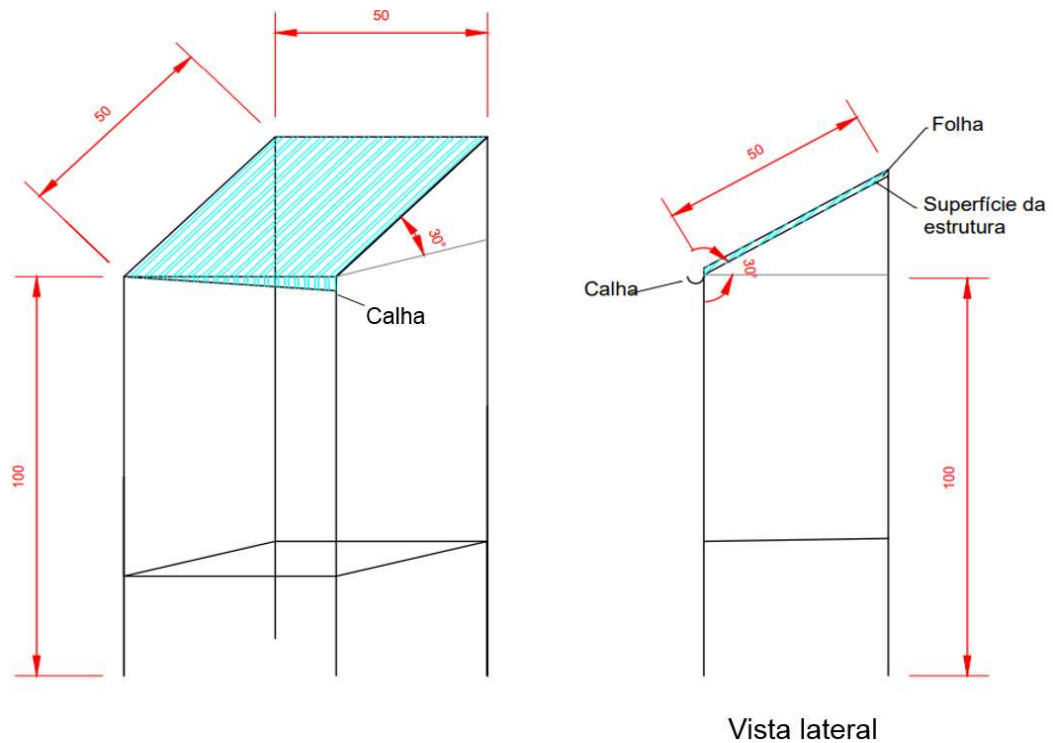
- b. Validar, para a cidade de Viçosa, o modelo de estimativa de rendimento de orvalho por meio do resfriamento radiativo passivo desenvolvido por Beysens (2016).

### **5.3 Metodologia**

O trabalho experimental foi conduzido na área de energia do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, 20°77' de latitude sul, 42°87' de longitude oeste e 665 metros de altitude, durante o período de 21 de agosto de 2018 a 21 de setembro de 2018 (inverno) e de 22 de setembro a 23 de outubro de 2018 (primavera). De acordo com a classificação de Köppen, o clima de Viçosa é do tipo Cwb, ou seja, mesotérmico com verões quentes e chuvosos, e invernos frios e secos (FREITAS et al., 2017).

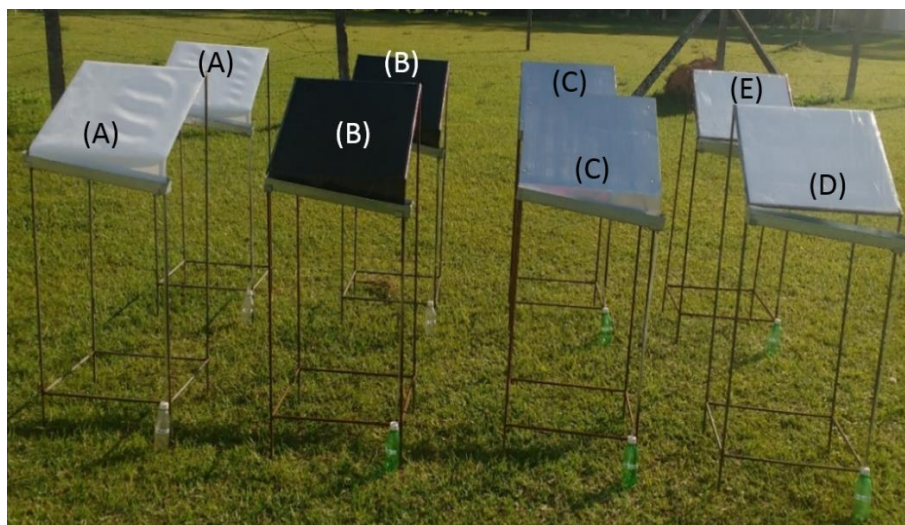
#### **5.3.1 Condensadores de água de orvalho**

Foram utilizados condensadores passivos planos de 0,25 m<sup>2</sup> (0,5 m x 0,5 m) instalados a um metro acima do solo (Figura 5.1). O ângulo de inclinação da estrutura foi de 30°, ângulo este, que favorece a formação de orvalho e o resfriamento radiativo. Este ângulo foi definido como ângulo ótimo de acordo com o estudo de Beysens *et al.* (2003).



**Figura 5.1:** Estrutura de captação de orvalho, cotação em cm.

Foram construídas duas estruturas para cada superfície condensadora, exceto para o plástico de polipropileno e para a fita adesiva, em que apenas uma estrutura para cada foi desenvolvida devido à limitação no número de estruturas disponíveis (Figura 5.2).



**Figura 5.2:** Condensadores de orvalho instalados no local do experimento (A): Plástico OPUR, (B): Plástico preto, (C): Alumínio anodizado, (D): plástico polipropileno tipo celofane e (E): fita adesiva de empacotamento.

## Superfícies condensadoras

Foi utilizado plástico branco da OPUR, que é um plástico considerado como padrão, feito de polietileno de baixa densidade com 5% do volume de microesferas de  $\text{TiO}_2$  - Dióxido de titânio (0,19  $\mu\text{m}$  de diâmetro) e 2% de microesferas de  $\text{BaSO}_4$  - Hidróxido de bário (0,8  $\mu\text{m}$  de diâmetro), emissividade 0,83 e espessura de 0,3 mm. Este plástico possui propriedades hidrofílicas que favorecem a nucleação, além de possuir uma alta emissividade no infravermelho próximo (7- 14  $\mu\text{m}$ ) (MAESTRE-VALERO *et al.*, 2011; SHARAN, 2011). Apesar das características favoráveis para a captação de orvalho, esse plástico, desenvolvido especificamente para esse propósito, é de alto custo (R\$ 39,20 /  $\text{m}^2$ , i. e. USD 10 /  $\text{m}^2$ ). Dessa forma, uma das alternativas analisadas em alguns estudos na literatura é o plástico preto (MAESTRE-VALERO *et al.*, 2011).

Também foi utilizado plástico preto, baixo custo (R\$ 0,875  $\text{m}^2$ ), que é um filme normalmente utilizado na agricultura e construção civil, composto de polietileno de baixa densidade com espessura de 150 micras ( $\mu\text{m}$ ). Segundo Maestre-Valero *et al.* (2011), este tipo de material é geralmente composto por 97,5% de polietileno de baixa densidade e 2,5% de carbono, além de estabilizantes térmicos e aditivos antioxidantes. A lona plástica preta possui uma alta emissividade podendo chegar a 95% (Almeida *et al.*, 2012).

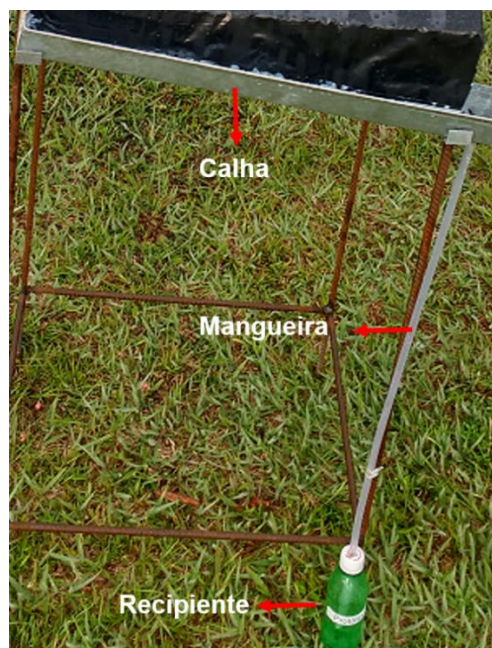
O uso de metais também já foi estudado como superfície condensadora. Sharan (2011) estudou a folha de metal galvanizada, utilizada em construção de telhados, e a folha de alumínio comercial, para condensação do vapor de água na Índia. Dessa forma, utilizou-se também nesta presente pesquisa, o alumínio anodizado com espessura de 0,5 mm, desenvolvido para a produção de refletores de alto desempenho e fabricado pela Lucchi. Este material possui uma emissividade de cerca de 0,82 (LIU, 2006; ÇENGEL e GHAJAR, 2012; SANT'ANNA, 2015; LUCCHI, 2018).

Já os materiais fita adesiva e plástico de polipropileno foram descobertos ao acaso. Observou-se em experimentos preliminares a condensação de água sob a fita adesiva de polipropileno. Dessa forma, buscou-se materiais que possuíam características semelhantes, e o plástico de polipropileno tipo celofane, bem fino, conhecido comercialmente como apenas papel celofane foi escolhido. Não há, até

o momento, pesquisas científicas na literatura consultada que foram realizadas utilizando estes dois materiais.

As superfícies condensadoras foram isoladas termicamente com poliestireno expandido de 20 mm de espessura, conhecido usualmente pela expressão *isopor*. A isolação é necessária, uma vez que a superfície condensadora deve trocar calor apenas com a atmosfera, o que contribui para o resfriamento radiativo passivo. Além disso, elas foram direcionadas para o nordeste, direção em que prevalece os ventos noturnos na cidade de Viçosa, MG, e também a direção do vento no local do experimento, localizado em um vale.

O vapor de água condensado durante o período noturno era coletado por gravidade. Uma calha na extremidade inferior da estrutura direcionava a água por meio de uma mangueira até o recipiente armazenador. A Figura 5.3 mostra o sistema de coleta utilizado no sistema.



**Figura 5.3:** Sistema de coleta do vapor de água condensado utilizado no experimento.

A quantidade de orvalho era coletada diariamente pela manhã e o volume era medido, tanto a quantidade coletada na garrafa de coleta quanto a quantidade obtida na raspagem manual da superfície. Utilizou-se para tal, uma proveta graduada de  $100 \pm 1$  ml. Durante esse experimento, não foram considerados as medições durante as noites chuvosas. Portanto, os índices pluviométricos foram

utilizados da estação meteorológica automática, gerenciada pelo Instituto Nacional de Meteorologia, localizada no campus da Universidade Federal de Viçosa, a 1,5 km do local do experimento (INMET, 2018).

A raspagem manual da superfície foi realizada tendo em vista a dimensão da superfície somente 50 por 50 cm, provavelmente em superfícies maiores a raspagem é nem recomendada ou viável.

Os dados meteorológicos horários, temperatura do ar ambiente, temperatura de ponto de orvalho, umidade relativa do ar e velocidade do vento foram obtidos da estação meteorológica, o que se torna uma limitação do estudo, uma vez que os dados não foram coletados no local de realização do experimento e sim a 1,5 km de distância.

### **Análise estatística dos resultados**

A análise estatística dos resultados foi realizada por meio de comparação entre os grupos (teste-t bilateral), com o objetivo de comparar a quantidade de orvalho coletada usando o plástico padrão (OPUR) com a quantidade de água coletada usando os demais materiais estudados (plástico preto, alumínio anodizado, fita adesiva de polipropileno, e plástico de polipropileno (papel celofane)). Considerou-se que as amostras partem de uma distribuição normal e o nível de significância escolhido foi de 95%.

#### **5.3.2 Validação de modelo**

Beysens (2016) desenvolveu um modelo, utilizando uma superfície condensadora de emissividade unitária, em que é necessário apenas dados de no mínimo um horário antes do nascer do sol para se estimar o rendimento de orvalho durante todo o período noturno, como mostra a Equação 5.1. Para tal estimativa, é necessário apenas dados de altitude do local, temperatura do ar ambiente, temperatura de ponto de orvalho, velocidade do vento e nebulosidade.

$$R_e = \left\{ 0,37 [1 + 0,204323 H - 0,0238893 H^2 - (18,0123 - 1,04963 H + 0,21891 H^2) 10^{-3} T_o] \left( \frac{T_o + 273,15}{285} \right)^4 \left( 1 - \frac{N}{8} \right) \right\} \quad (5.1)$$

$$+ [0,06(T_o - T_a)] \left( 1 + 100 \left\{ 1 - e^{-\left( \frac{V}{V_o} \right)^{20}} \right\} \right)$$

0, se  $R_e < 0$ .

em que,

- $R_e$  = Rendimento de orvalho durante a noite, considerando 12 horas (mm/m<sup>2</sup>);
- $H$  = Elevação do local (km);
- $T_o$  = Temperatura de Ponto de Orvalho (°C);
- $T_a$  = Temperatura do ar ambiente (°C);
- $N$  = Cobertura da nuvem (oktas);
- $V$  = Velocidade do vento (m/s) a 10 m de elevação; e
- $V_o$  = Velocidade do vento de 4,4 m/s (velocidade máxima para a formação de orvalho, (BEYSENS, 2016)).

Porém, nesta presente pesquisa, foram feitas estimativas horárias da produção de orvalho para todo o período noturno. Posteriormente, a estimativa de rendimento para noite foi considerada como sendo a média do rendimento estimado de hora em hora com o objetivo de aumentar a precisão da estimativa.

Quando se utiliza essa metodologia de estimativa de rendimento de orvalho, deve-se levar em consideração a duração em horas do período noturno (Equação 5.2), uma vez que a Equação 5.1 assume um período noturno de 12 horas. Assim essa estimativa dever ser corrigida utilizando a Equação 5.3 (BEYSENS, 2016).

$$\tau = \frac{24}{128} \cos^{-1} \left[ \tan \alpha \tan \left( -23,5 \cos \left( \frac{360 (d - 355)}{364} \right) \right) \right] \quad (5.2)$$

em que;

- $\tau$  = Período de duração da noite (horas);
- $\alpha$  = Latitude do local; e
- $d$  = Dia do ano.

$$R_{eT} = \frac{T}{B} R_e \quad (5.3)$$

em que,

- $R_e$  = Rendimento de orvalho durante a noite, considerando um período noturno de 12 horas (mm/dia);
- $B$  = Período completo de análise de 12 horas/dia
- $T$  = Período de análise (horas/dia); e
- $R_{eT}$  = Rendimento de orvalho, considerando T horas (mm/dia).

Os dados de temperatura do ar, temperatura de ponto de orvalho e velocidade do vento, utilizados para estimar o rendimento de orvalho, foram obtidos do INMET. Porém, os dados de nebulosidade do céu durante o período noturno não são mais analisados e computados para a cidade de Viçosa, uma vez que a estação meteorológica convencional, que possuía operadores para fazer essa estimativa visual de nebulosidade, não está mais em operação. Dessa forma, utilizou-se dados de previsão do tempo do [Intellicast.com](http://Intellicast.com) de hora em hora para o período noturno do experimento (INTELLICAST, 2018). A nebulosidade era obtida todos os dias as 22 horas, tendo assim uma previsão atual para a nebulosidade.

O Intellicast, um dos cinco principais sites de previsão do tempo, fornece informações meteorológicas específicas para 60.000 sites nos Estados Unidos da América (EUA) e para todo o mundo. Além disso, ele tem um sistema tecnicamente avançado de previsão específica e apresenta uma previsão precisa (INTELLICAST, 2018; JANEIRO *et al.*, 2015; LU *et al.*, 2018).

Assim, pôde-se validar o modelo de estimativa da quantidade de orvalho coletada para a região de estudo (Viçosa – MG), seguindo a metodologia de

validação do modelo para 10 lugares diferente de Beysens (2016). Dessa forma, fez-se a validação do modelo de Beysens pela avaliação da correlação entre os valores acumulados estimados pelo modelo e o valores acumulados coletados experimentalmente do primeiro ao último dia do experimento de cada uma das superfícies condensadoras em análise (Equação 5.4). Adotou-se a soma dos valores para suavizar as incertezas diárias. Um ajuste linear foi feito para determinar o fator de proporcionalidade  $\alpha$ , entre a quantidade estimada e a quantidade coletada experimentalmente (BEYSENS, 2016).

$$\sum_{d_i}^{d_f} Q_e = \alpha \sum_{d_i}^{d_f} Q_c \quad (5.4)$$

em que,

- $d_i$  = Dia inicial do experimento;
- $d_f$  = Dia final do experimento;
- $Q_e$  = Quantidade estimada de orvalho coletado (mm/noite);
- $Q_c$  = Quantidade de orvalho obtida experimentalmente (mm/noite); e
- $\alpha$  = Fator de proporcionalidade.

## 5.4 Resultados e Discussão

### 5.4.1 Variáveis Meteorológicas

As variáveis meteorológicas médias noturnas: temperatura do ar ambiente, umidade relativa do ar, temperatura de ponto de orvalho, velocidade do vento e nebulosidade foram analisadas para os dois períodos de experimento (Quadro 5.1).

Captação de água da atmosfera – análise do potencial brasileiro e desenvolvimento de protótipos

**Quadro 5.1:** Variáveis meteorológicas médias noturnas para a cidade de Viçosa durante os períodos de experimentos, i. e. durante o período de 21 de agosto de 2018 a 21 de setembro de 2018 ( no inverno) e de 22 de setembro a 23 de outubro de 2018 (na primavera)

Período de experimento	Temperatura média do ar ambiente (°C)	Umidade relativa média do ar (%)	Temperatura média de ponto de orvalho (°C)	Velocidade média do vento (10 m de altitude) (m/s)	Nebulosidade média (oktas)
1° período (No inverno)	14,87	91,80	13,49	0,31	3
2° período (Na primavera)	18,40	91,21	16,89	0,35	5

Observa-se que os valores médios de umidade relativa do ar e de velocidade do vento não variaram significativamente durante os dois períodos de experimentos. Porém, a temperatura do ar e, conseqüentemente, a temperatura de ponto de orvalho foram maiores para o período de primavera, como era esperado. Ademais, o índice de nebulosidade também foi superior durante a fase experimental realizada na primavera, o que pode contribuir negativamente para a formação de orvalho por meio do resfriamento radiativo passivo.

Como pode-se observar por meio do Quadro 5.1 o inverno possui condições mais favoráveis para a captação de orvalho, como uma menor temperatura de ponto de orvalho. Ademais, o inverno é exatamente a época do ano mais seca para a cidade de Viçosa- MG. Dessa forma, esse período necessita de uma maior demanda de hídrica e, conseqüentemente, o orvalho pode ser importante para complementar a demanda de água.

#### **5.4.2 Dias com presença de orvalho**

Realizou-se 32 dias de experimento para a captação de orvalho por meio do resfriamento radiativo passivo para cada estação em análise, ou seja, inverno e primavera. Durante o período de inverno, observou-se formação de orvalho nas superfícies condensadoras em 22 noites, exceto para o alumínio anodizado em que o orvalho pôde ser observado em 14 noites, e apenas 4 dias sem presença de

orvalho em todas as superfícies condensadoras. Já nos demais 6 dias, choveu, o que pode ser considerado atípico para esta época do ano. Dessa forma, nota-se que a formação de orvalho pôde ser observada para o alumínio anodizado em aproximadamente 43,75% das noites e 68,75% para as demais superfícies condensadoras.

Já para o período de primavera, observou-se formação de orvalho nas superfícies condensadoras em 21 noites, exceto para o alumínio anodizado em que o orvalho pôde ser observado em 11 noites, e ausência de orvalho em 10 noites em todas as superfícies condensadoras. Apenas um dia durante o período noturno choveu. Dessa forma, nota-se que a formação de orvalho pôde ser observada para o alumínio anodizado em aproximadamente 34,39% das noite e 66,50% para as demais superfícies condensadoras.

Assim, observa-se que o percentual de noites com formação de orvalho foi aproximadamente o mesmo para as superfícies condensadoras, exceto para o alumínio anodizado, tanto para o experimento no período de inverno quanto para o período de primavera. Além disso, esse percentual de formação nas demais superfícies condensadoras foi maior do que alguns estudos na literatura. Maestre-Valero *et al.* (2011) observou um percentual de dias com formação de orvalho de cerca de 48% para Espanha (Cartagena). Já Muselli *et al.* (2009), obteve um percentual de cerca de 39,7% para a Croácia. Ambos utilizaram em seus estudos o plástico padrão desenvolvido pela OPUR.

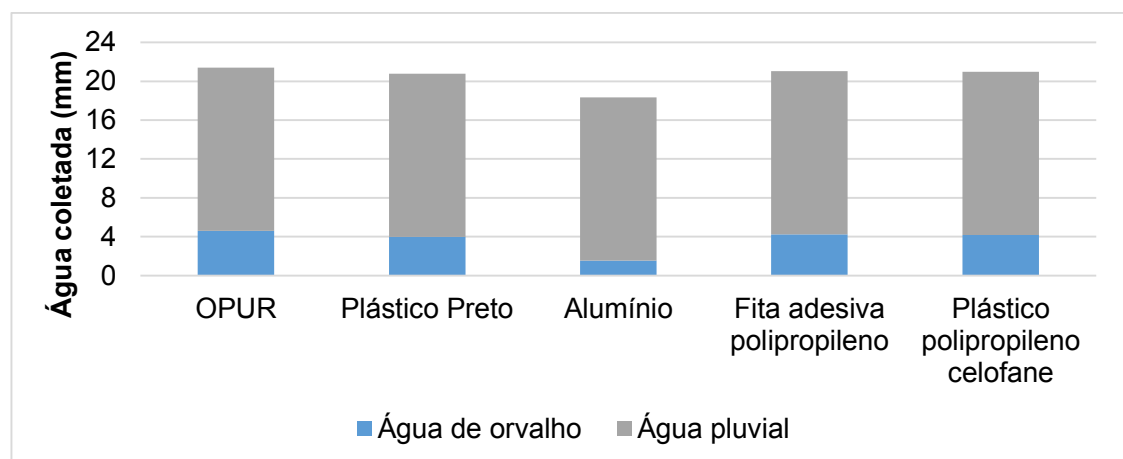
A Figura 5.4 mostra a formação de orvalho no plástico preto em uma noite com baixo índice de nebulosidade.



**Figura 5.4:** Formação de orvalho na superfície condensadora plástico preto.

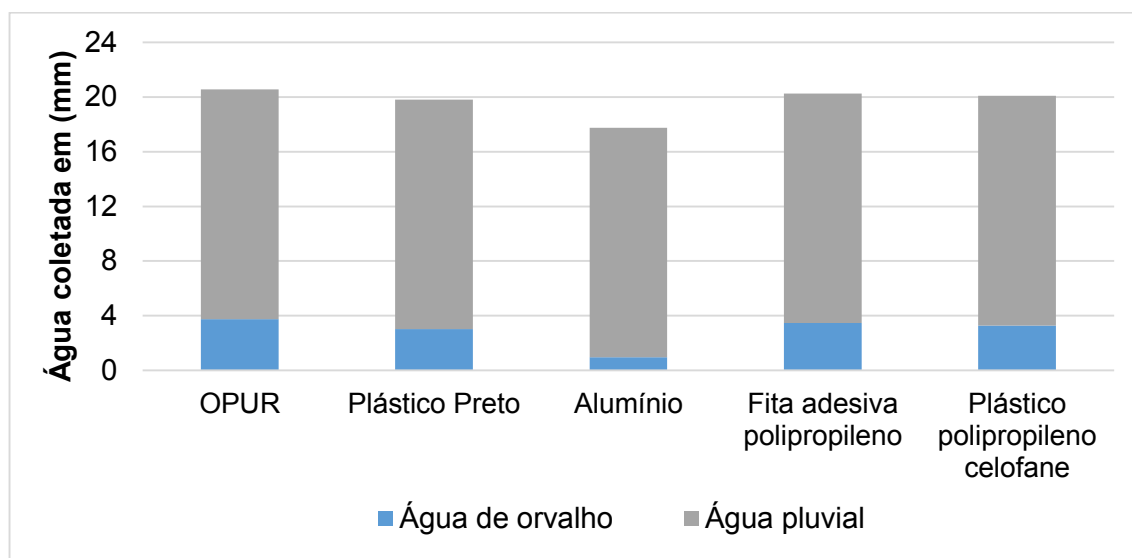
### 5.4.3 Rendimento de água coletada

A média diária de rendimento de orvalho observado durante o experimento de inverno foi de 0,177 mm/noite utilizando o plástico padrão da OPUR, 0,153 mm/noite utilizando o plástico preto, 0,060 mm/noite para o alumínio anodizado, 0,163 mm/noite para a fita adesiva de polipropileno e 0,161 mm/noite para o plástico de polipropileno (papel celofane). A Figura 5.5 apresenta o total de água coletada por cada superfície condensadora somando a água de chuva que poderia ser coletada durante os 32 dias de experimento no período noturno.



**Figura 5.5:** Quantidade de água de orvalho e de chuva coletada no período de inverno estudado para as superfícies condensadoras estudadas em Viçosa, MG.

Já para a primavera, a média diária de água de orvalho coletada durante o experimento foi de 0,125 mm/noite utilizando o plástico padrão da OPUR, 0,100 mm/noite utilizando o plástico preto, 0,032 mm/noite para o alumínio anodizado, 0,116 mm/noite para a fita adesiva de polipropileno e 0,109 mm/noite para o plástico de polipropileno (papel celofane). O total de água coletado por cada superfície condensadora juntamente com a água de chuva durante o período noturno pode ser observado na Figura 5.6.



**Figura 5.6:** Quantidade de água de orvalho e de chuva coletada no período estudado de primavera para as superfícies condensadoras estudadas em Viçosa, MG.

Nota-se que a quantidade total de água de orvalho coletada na primavera foi inferior ao volume coletado durante o inverno. Essa diferença pode ser explicada pela maior nebulosidade do céu, uma vez que essa variável influencia negativamente no resfriamento da superfície, e consequentemente, na formação de orvalho.

Considerando os dois períodos em análise, a média de água coletada de orvalho para o plástico padrão OPUR foi de 0,151 mm/noite, 0,127 mm/noite para o plástico preto, 0,046 mm/noite para o alumínio anodizado, 0,140 mm/noite para a fita adesiva e 0,135 mm/noite para o plástico de polipropileno (papel celofane).

Esta diferença nas quantidades coletadas usando diferentes superfícies condensadoras pode ser justificada pelas diferentes propriedades dos materiais que

compõem as superfícies condensadoras, como exemplo a emissividade, características hidrofílicas e rugosidades que interferem no deslizamento das gotículas. Segundo Tomasziewicz *et al.* (2015), apesar das superfícies condensadoras de metais galvanizados serem mais duráveis, elas necessitam de uma pintura especial para que o resfriamento radiativo e as propriedades hidrofílicas sejam maximizadas. Ademais, esse tipo de material produz menores quantidades de orvalho (SHARAN, 2011).

Ao contrário deste presente estudo, Maestre-Valero *et al.* (2011) obtiveram uma maior quantidade de orvalho coletada para o plástico preto (20,76 mm/ano) do que para o plástico OPUR (17,36 mm/ano), em um estudo realizado na Espanha. Segundo os autores, esse fato foi atribuído a maior emissividade do plástico preto. Porém, nesta presente pesquisa, o plástico padrão da OPUR apresentou melhores resultados do que a do plástico preto. Acredita-se que o melhor desempenho do plástico desenvolvido pela OPUR esteja atribuído a suas propriedades hidrofílicas, que até mesmo facilita o deslizamento das gotas quando se compara com o plástico preto.

Em seu estudo, realizado no Líbano (Beiteddine), Tomasziewicz *et al.* (2017) obtiveram uma média diária de captação de orvalho usando o plástico da OPUR de 0,13 mm/noite para o período de abril a outubro de 2014. Neste período, o clima é semiárido com uma estação de seca prolongada com temperatura média de cerca de 19,9°C e umidade relativa média de cerca de 66,9%. Já Maestre-Valero *et al.* (2011), coletaram cerca de 0,10 mm/noite utilizando o plástico padrão da OPUR para a região costal de Cartagena, Espanha (clima semiárido), durante maio a outubro de 2009. Já para o plástico preto os autores encontram uma média de 0,13 mm/noite de produção de água de orvalho, média esta, muito semelhante a encontrada neste presente estudo.

Sharan (2011) encontrou uma média de cerca de 0,11 mm/noite de produção de água de orvalho usando uma folha de alumínio, na Índia, (clima semi árido costal) para um ano de análise. Este valor é bem superior ao encontrado nessa presente pesquisa.

Para os demais materiais, fita adesiva e plástico tipo polipropileno (celofane), não foram encontrados, até o presente momento, estudos que fizessem uso destes materiais como superfície condensadora.

Embora a quantidade de orvalho seja bem pequena em relação a quantidade de água de chuva, ela não deve ser desprezada, uma vez que em períodos de seca, essa pequena quantidade pode ser substancial para a irrigação e/ou consumo humano, por exemplo. No entanto, observou-se que a relação entre a quantidade de orvalho coletada e a quantidade de água de chuva que foi coletada usando a superfície condensadora foi de 27,5% e 22,3% para o plástico OPUR; 23,7% e 17,9% para o plástico preto; 9,2% e 5,6% para o alumínio; 25,3% e 20,6% para a fita adesiva de polipropileno e 24,9 % e 19,6% para o plástico de polipropileno (celofane) para o inverno e para a primavera, respectivamente. Assim, pelo menos para o presente estudo, a quantidade de orvalho pode ser considerada significativa.

A neblina, outra fonte de água não convencional, também possui grande potencial para complementar os recursos hídricos. Locais que possuem nevoeiros frequentes captam grandes quantidades de água, como é o caso do Chile. Na região do Alto Patache, a média de captação de neblina foi de 6 L/m<sup>2</sup>/dia (média de 14 anos) (BATISHA, 2005). Além da grande quantidade de água, este método é mais simples, uma vez que a água presente no ar já está no estado líquido e não mais no estado de vapor. Porém, é necessário o estudo do potencial de captação de orvalho e de neblina, uma vez que alguns lugares não tem presença frequente de nevoeiros, e conseqüentemente, uma maior quantidade de orvalho pode ser coletada. Com exemplo, Meunier e Beysens (2016) coletaram uma quantidade maior de orvalho do que de nevoeiro, 6 mm de água de nevoeiro e 15 mm de água de orvalho, durante um período de um ano de análise (abril de 2010 e março de 2011) no Azerbaijão, utilizando superfícies condensadoras planares de 1 m<sup>2</sup>.

Analisando o rendimento de cada superfície condensadora, nota-se que o plástico padrão da OPUR, o plástico preto, a fita adesiva e o plástico de polipropileno (celofane) apresentaram rendimentos similares. Para o período de inverno, o plástico preto obteve um rendimento de cerca de 86,3% quando comparado com o plástico padrão. Já a fita adesiva e o plástico de polipropileno apresentaram um rendimento de aproximadamente 92,0% e 90,6%,

respectivamente. Porém, o alumínio anodizado, apresentou o pior rendimento, cerca de apenas 33,6%.

Já para o período de primavera, o plástico preto obteve um rendimento de cerca de 80,2% quando comparado com o plástico padrão. Já a fita adesiva e o plástico de polipropileno apresentaram um rendimento de aproximadamente 92,4 % e 87,6%, respectivamente. Entretanto, o alumínio anodizado, apresentou o pior rendimento, cerca de apenas 25,2%.

O Quadro 5.3 apresenta os resultados estatísticos (*p-value* e  $t$  crítico) para as grupos de resultados estudados.

**Quadro 5.2:** Resultados da análise estatística teste –  $t$  com nível de significância de 5% (OPUR e plástico preto, OPUR e alumínio anodizado, OPUR e fita adesiva de polipropileno, OPUR e plástico polipropileno (celofane))

Plástico OPUR e plástico preto	
$T_{\text{calculado}}$ (Teste- $t$ )	1,156
$T_{\text{crítico}}$	1,982
<i>p-value</i>	0,250
Plástico OPUR e alumínio anodizado	
$T_{\text{calculado}}$ (Teste- $t$ )	5,848
$T_{\text{crítico}}$	1,663
<i>p-value</i>	0,000
Plástico OPUR e fita adesiva polipropileno	
$T_{\text{calculado}}$ (Teste- $t$ )	0,534
$T_{\text{crítico}}$	1,982
<i>P-value</i>	0,594
Plástico OPUR e plástico polipropileno (celofane)	
$T_{\text{calculado}}$ (Teste- $t$ )	0,750
$T_{\text{crítico}}$	1,982
<i>p-value</i>	0,455

Observa-se por meio do Quadro 5.3 que os resultados do plástico OPUR e do plástico preto, do plástico OPUR e da fita adesiva de polipropileno, e do plástico OPUR e do plástico polipropileno (celofane) não foram diferentes significativamente, uma vez que os *p-values* foram maiores que 0,05 e  $T_{\text{calculado}} < T_{\text{crítico}}$ . Por outro lado, os

resultados obtidos com o Plástico OPUR e o alumínio anodizado foram diferentes significativamente ( $p\text{-value} > 0,05$  e  $T_{\text{calculado}} > T_{\text{crítico}}$ ).

#### **5.4.4 Comparação das superfícies condensadoras**

Quando se compara o preço do plástico padrão OPUR (cerca de R\$ 39,20/m<sup>2</sup> - USD\$ 1,00 = R\$ 3,92) com o preço dos demais materiais, observa-se que o maior rendimento apresentado por esse tipo de plástico padrão não justifica o seu uso devido ao seu alto custo e rendimentos não tão superiores.

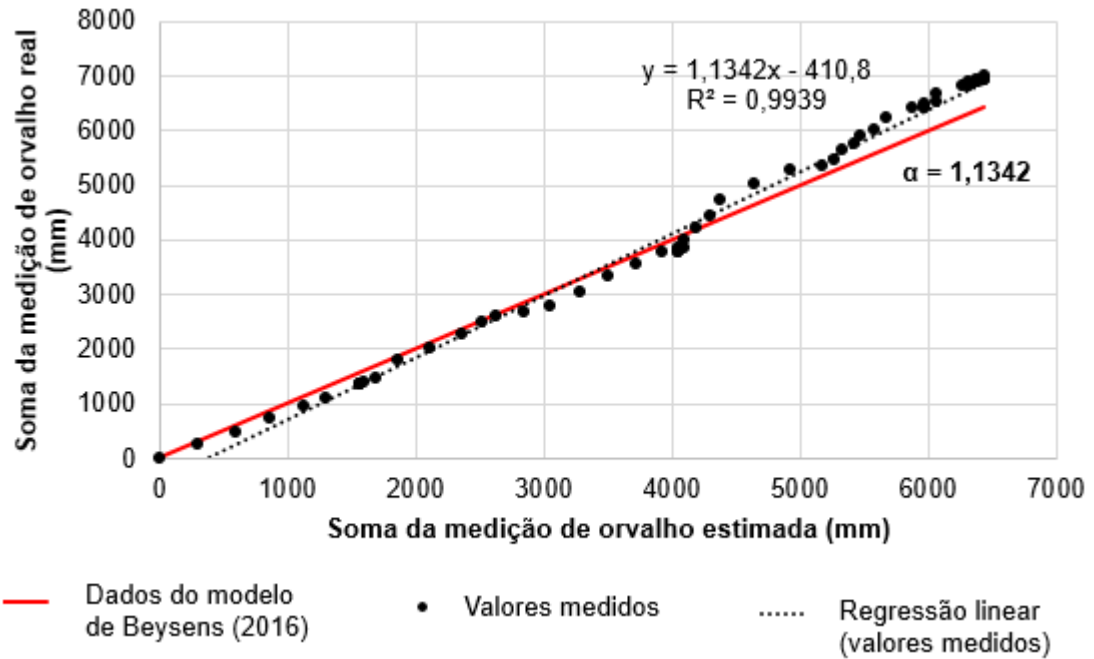
O preço do metro quadrado do plástico preto (R\$ 0,88/m<sup>2</sup>) representa cerca de 2,24% do preço do plástico da OPUR, sendo que uma área aproximadamente 16% maior é necessária para que o plástico preto tenha a mesma quantidade coletada de água condensada do que o plástico padrão no inverno e 25% maior para o período de primavera. Já o preço da fita adesiva (R\$ 2,72/m<sup>2</sup>) representa cerca de 6,94% do preço do plástico padrão e uma área de apenas 8,6% maior para a mesma quantidade seja coletada no inverno e 8,2% maior para o período de primavera. Finalmente, o plástico polipropileno (celofane) (R\$ 1,30/m<sup>2</sup>) representa cerca de 3,32% do preço do plástico padrão e uma área de apenas 9,9% maior é necessária para que seja coletada a mesma quantidade no inverno e 14,2% maior para a primavera.

Assim, a fita adesiva e o plástico de polipropileno (papel celofane) que apresentaram, tanto no inverno quanto na primavera, um rendimento médio de cerca de 90% quando comparados com o plástico padrão, e até o presente momento não foram estudados para a captação de água de vapor atmosférico, demonstram um grande potencial de uso para captação de água de orvalho. Além disso, o custo do metro quadrado destes materiais também é muito pequeno, o que justifica até um aumento da área da superfície condensadora para que quantidades maiores de água possam ser coletadas.

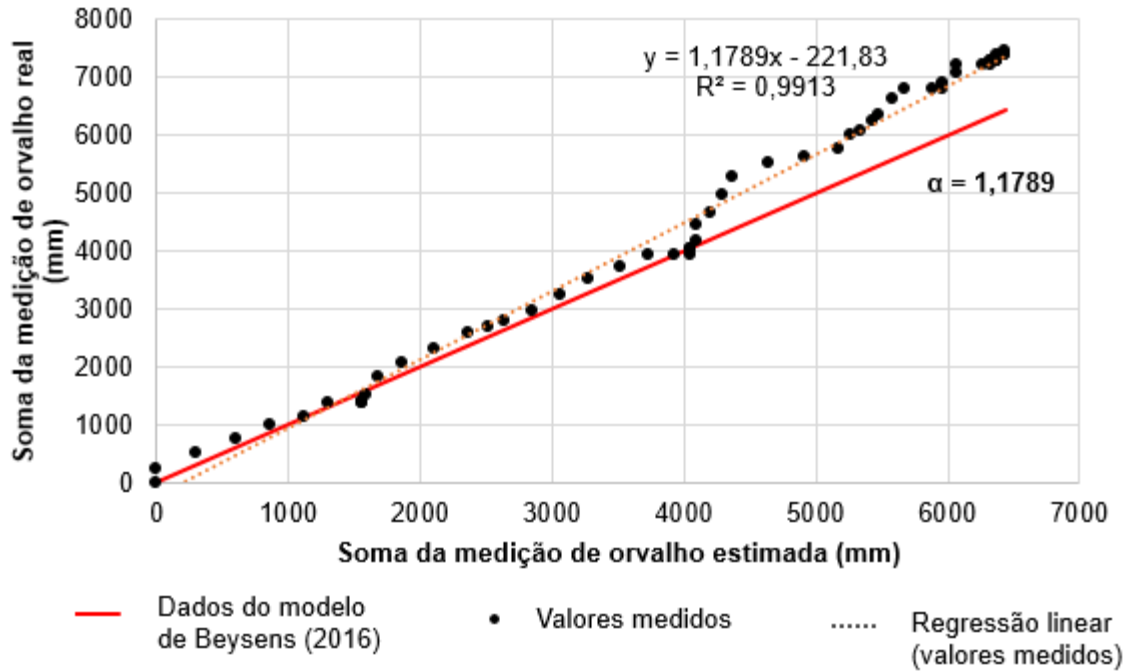
#### **5.4.5 Validação do modelo de rendimento de orvalho**

Comparando os valores acumulados estimados e os valores acumulados medidos experimentalmente de orvalho coletado, observa-se que o plástico preto e o plástico de polipropileno apresentaram o melhor coeficiente de ajuste para o valor

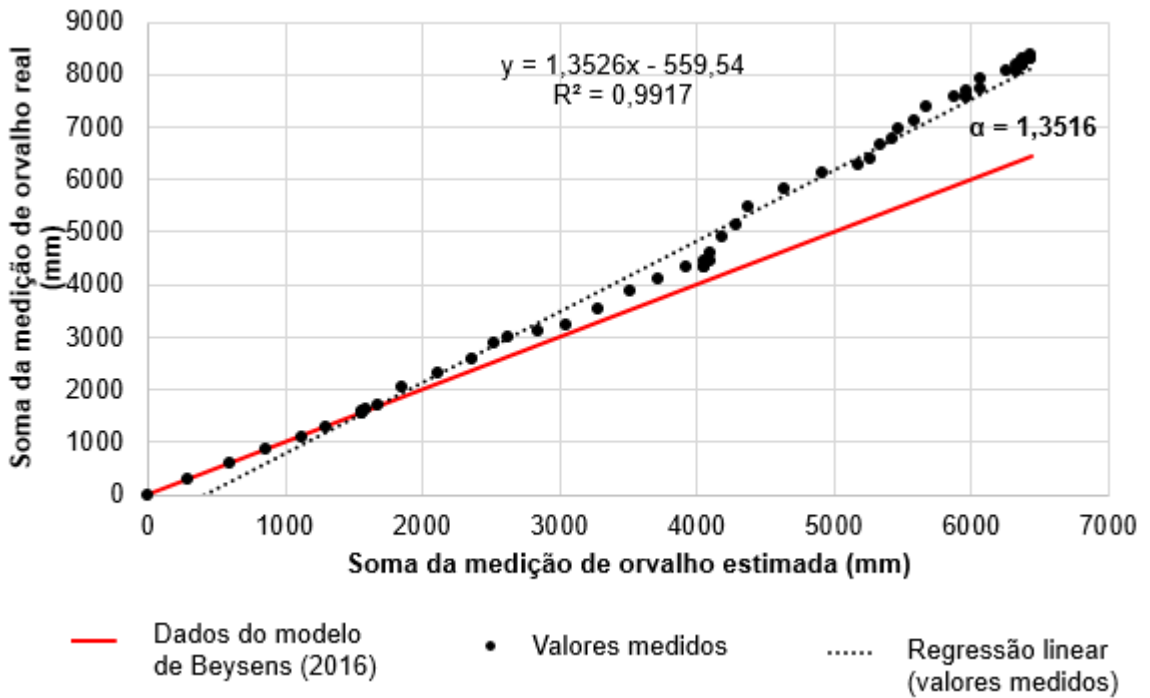
medido experimentalmente, cerca de 1,13 e 1,17, respectivamente (Figuras 5.7 e 5.8). Já a estimativa de produção de orvalho utilizando tanto o plástico OPUR quanto a fita adesiva obtiveram um coeficiente de ajuste de 1,35 e 1,22, respectivamente (Figuras 5.9 e 5.10). Por outro lado, a estimativa de captação de água utilizando alumínio anodizado foi subestimada em cerca de 42%, como mostra as Figura 5.11.



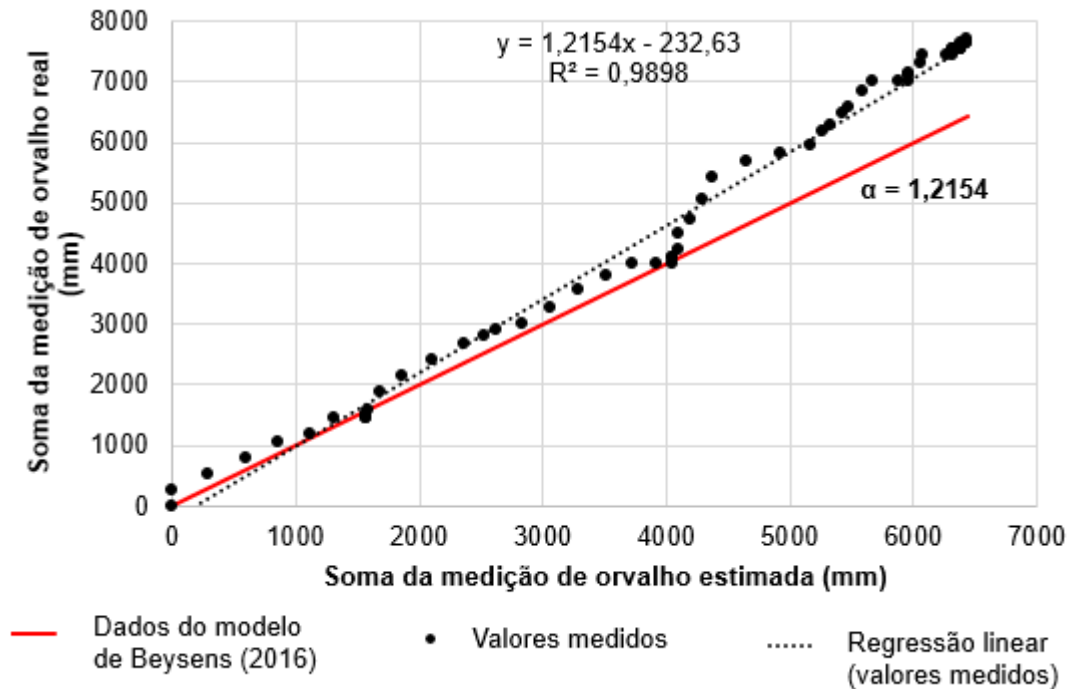
**Figura 5.7:** Relação entre os valores acumulados estimados e os valores acumulados medidos experimentalmente para o plástico preto.



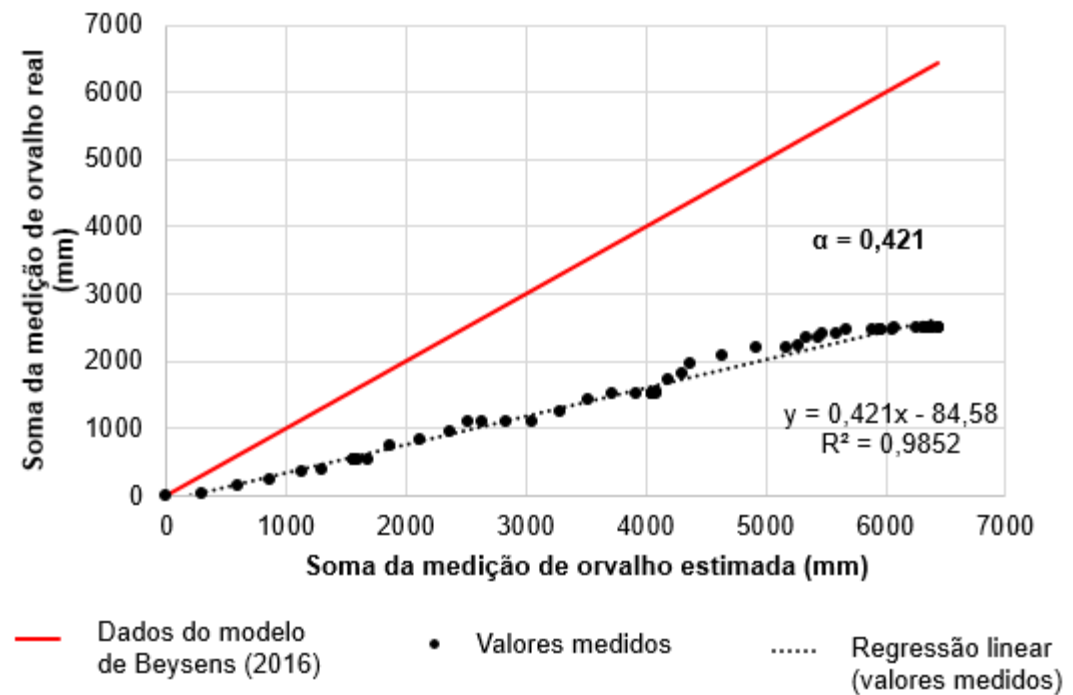
**Figura 5.8:** Relação entre os valores acumulados estimados e os valores acumulados medidos experimentalmente para o plástico tipo polipropileno (celofane).



**Figura 5.9:** Relação entre os valores acumulados estimados e os valores acumulados medidos experimentalmente para o plástico OPUR.



**Figura 5.10:** Relação entre os valores acumulados estimados e os valores acumulados medidos experimentalmente para a fita adesiva de polipropileno.



**Figura 5.11:** Relação entre os valores acumulados estimados e os valores acumulados medidos experimentalmente para o alumínio anodizado.

Beysens (2016) determinou experimentalmente que o coeficiente de ajuste para os 10 locais analisados em seu estudo seria um valor médio de cerca de 0,95. Porém, não foi informado em seu estudo qual a superfície condensadora utilizada para a validação de seu modelo. Acredita-se que seja o plástico padrão desenvolvido pela OPUR.

A diferença entre os valores estimados e medidos pode, possivelmente, também ser justificada pelo fato de que as variáveis meteorológicas utilizadas no cálculo das estimativas não foram obtidos no local do experimento, mas sim da estação meteorológica localizada a cerca de 1,5 km de distância do campo experimental. Segundo Kidron (1999) e Beysens (2016), esta diferença pode ser causada pela diferença de altitude entre o local do experimento e o local onde os dados são coletados. Além disso, os valores de nebulosidade utilizados na estimativa foram obtidos de previsões meteorológicas, que embora atuais, podem causar incertezas na estimativa. Ademais, o local de realização dos experimentos está localizado a cerca de 100 metros de uma lagoa (Figura 5.12), o que pode contribuir para uma maior umidade do ar.



X: Local de realização do experimento

**Figura 5.12:** Proximidade da área de experimento com a lagoa.

Dessa forma, apesar da diferença encontrada, conclui-se que o modelo desenvolvido por Beysens (2016) pode ser realmente utilizado para a estimativa da produção de orvalho na área em estudo. Já o índice de ajuste obtido pode ser utilizado para que valores mais precisos possam ser encontrados.

## **5.5 Conclusões**

Esta pesquisa analisou, experimentalmente, a quantidade de orvalho coletada em duas estações do ano (inverno e primavera) utilizando como materiais condensadores o plástico preto, plástico OPUR, alumínio anodizado, fita adesiva de polipropileno e plástico de polipropileno tipo celofane. Observou-se que apesar do plástico OPUR apresentar uma maior captação de água de orvalho, cerca de 0,151 mm/noite, o seu uso não é indicado devido ao seu alto custo, uma vez que materiais como a fita adesiva e o plástico tipo celofane apresentaram uma semelhante quantidade de orvalho coletada, cerca de 0,140 mm/noite para a fita adesiva e 0,135 mm/noite para o plástico de polipropileno (papel celofane), respectivamente, e a um custo bem inferior.

Ademais, observa-se que a quantidade de água coletada para o plástico padrão OPUR não difere significativamente ( $p > 0,05$ ) para a quantidade de água coletada usando o plástico preto, fita adesiva de polipropileno e plástico de polipropileno (celofane).

Dessa forma, essa pesquisa apresenta novos materiais que ainda não foram estudados na literatura, até o momento, e apresentam um grande potencial de captação de orvalho e competitividade com o plástico OPUR, que apesar de ter sido desenvolvido para esse fim, não apresentam uma quantidade de captação de orvalho que justifique o seu uso do ponto de vista financeiro. Porém, a durabilidade dos plásticos e a qualidade da água coletada não foram estudadas. Observou-se, entretanto, que as superfícies condensadoras permaneceram sem nenhum sinal de degradação durante os dias de experimento.

Durante o período experimental de captação de orvalho, pequenas quantidade de água foram coletadas, mas essa água pode ser indispensável para

complementar a demanda hídrica destinada a irrigação, consumo humano, dessedentação animal, dentre outros.

## 5.6 Referências bibliográficas

ALMEIDA, F. A. C.; ALMEIDA, A. L. B.; SILVA, J. F.; SANTOS, J. F. Influência de lonas de cobertura sobre as características tecnológicas do algodão BRS 200 marrom armazenado a céu aberto. **Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia**, v.9, n. 3, p. 3-13, 2012.

BATISHA, A. F. Feasibility and sustainability of fog harvesting. **Sustainability of Water Quality and Ecology**, v. 6, p. 1–10 , 2015, [doi:10.1016/j.swaqe.2015.01.002](https://doi.org/10.1016/j.swaqe.2015.01.002).

BEYSENS, D.; MILIMOUK, I.; NIKOLAYEV, V.; MUSELLI, M.; MARCILLAT, J. Using radiative cooling to condense atmospheric vapor: a study to improve water yield. **Journal of Hydrology**, v. 276, p. 1–11 , 2003, [doi:10.1016/S0022-1694\(03\)00025-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00025-8).

BEYSENS, D. Estimating dew yield worldwide from a few meteo data. **Atmospheric Research**, v. 167, p. 146–155, 2016, [doi:10.1016/j.atmosres.2015.07.018](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.07.018).

CARVAJAL, D.; MINONZIO, J.G.; CASANGA, E.; MUÑOZ, J.; ARACENA, A.; MONTECINOS, S.; BEYSENS, D. Roof-integrated dew water harvesting in Combarbalá, Chile. **Journal of Water Supply: Research and Technology - Aqua**, v. 67, n. 4, p. 357–374, 2018, [doi:10.2166/aqua.2018.174](https://doi.org/10.2166/aqua.2018.174).

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Transferência de Calor e Massa – Uma abordagem prática**. 4 ed. Porto Alegre: Ed. AMGH, 2012. 906 p.

ERNESTO, A. T. J.; JASSON, F. P. J. Winter dew harvest in Mexico City. **Atmosphere**, v. 7, n. 1, 2016, [doi:10.3390/atmos7010002](https://doi.org/10.3390/atmos7010002).

FREITAS, E. C. S.; PAIVA, H. N.; LEITE, H. G.; OLIVEIRA NETO, S. N. Crescimento e qualidade de mudas de *Cassia grandis* Linnaeus F. em resposta à adubação fosfatada e calagem. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 2, p. 509–519, 2017.

GERASOPOULOS, K.; LUEDEMAN, W. L.; OLÇEROGLU, E.; BENKOSKI, J.J. Effects of Engineered Wettability on the Efficiency of Dew Collection. **ACS Applied Materials and Interfaces**, v. 10, n. 4, p. 4066–4076, 2018, [doi:10.1021/acsami.7b16379](https://doi.org/10.1021/acsami.7b16379).

INMET- Instituto Nacional de Meteorologia. **Estações Automáticas**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/>. Acesso em: 3 maio. 2018.

INTELLICAST. **Intellicast website**. Disponível em: <http://www.intellicast.com>. Acesso em: 10 set. 2018.

JANEIRO, J. RODRIGUEZ-FDEZ, I.; RAMOS-SOTO, A.; BUGARÍN, A. Data mining

for automatic linguistic description of data: Textual weather prediction as a classification problem. **ICAART 2015 - 7th International Conference on Agents and Artificial Intelligence, Proceedings**, v. 2, p. 556–562, 2015.

KIDRON, G. J. Altitude dependent dew and fog in the Negev Desert, Israel. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 96, n. 1–3, p. 1–8, 1999, [doi: 10.1016/S0168-1923\(99\)00043-X](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00043-X).

LIU, W. T. H. **Aplicações de Sensoriamento Remoto**. 2 ed. Campo Grande: Ed. UNIDERP, 2006. 908p.

LU, X.; JIANG, D.; HE, G.; YU, H. GreenBDT: Renewable-aware scheduling of bulk data transfers for geo-distributed sustainable datacenters. **Sustainable Computing: Informatics and Systems**, n. August 2017, p. 1–10, 2018, [doi: 10.1016/j.suscom.2018.07.004](https://doi.org/10.1016/j.suscom.2018.07.004).

LUCCHI - Componentes para sistemas de iluminação e alumínios especiais. Disponível em: < <http://www.lucchi.com.br/>>. Acesso em: 3 Novembro 2018.

MAESTRE-VALERO, J. F.; MARTÍNEZ-ALVAREZ, V.; BAILLE, A.; MARTÍN-GÓRRIZ, B.; GALLEGO-ELVIRA, B. Comparative analysis of two polyethylene foil materials for dew harvesting in a semi-arid climate. **Journal of Hydrology**, v. 410, n. 1–2, p. 84–91, 2011, [doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.09.012](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.09.012).

MEUNIER, D.; BEYSENS, D. Dew, fog, drizzle and rain water in Baku (Azerbaijan). **Atmospheric Research**, v. 178–179, p. 65–72, 2016, [doi: 10.1016/j.atmosres.2016.03.014](https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.03.014).

MILETA, M.; BEYSENS, D.; NIKOLAYEV, V.; MILIMOUC, I.; CLUS, O.; MUSELLI, M. Fog and Dew Collection Projects in Croatia. **International Conference on “Water Observation and Information System for Decision Support”** (BALWOIS 2006), Ohrid, Macedonia, 2006.

OPUR - ORGANIZATION FOR DEW UTILIZATION. **OPUR**. Disponível em: <<http://www.opur.fr/>>. Acesso em: 3 maio 2018.

SANT’ANNA, V. R. S. **Análise de Sistemas Fotovoltaicos com Concentradores fixos da radiação Solar**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, p. 215. 2015

SHARAN, G. Harvesting dew with radiation cooled condensers to supplement drinking water supply in semi-arid coastal northwest India. **International Journal for Service Learning in Engineering**, v. 6, n. 1, p. 130–150, 2011.

SHARAN, G.; ROY, A.K.; ROYON, A.; BEYSENS, D. Dew plant for bottling water. **Journal of Cleaner Production** v. 155, p. 83–92, 2017, [doi:10.1016/j.jclepro.2016.07.079](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.079).

TOMASZKIEWICZ, M.; NAJM, M. A.; BEYSENS, D.; ALAMEDDINE, I.; EL-FADEL, M. Dew as a sustainable non-conventional water resource: a critical review.



## Capítulo 6: Condensador de vapor de água utilizando módulos termoelétricos

### 6.1 Introdução

A água, elemento indispensável para a vida na terra, é um recurso hídrico mal distribuído, uma vez que a maior parte da água disponível no planeta, cerca de 97%, é salgada e apenas 0,007% da água doce está em rios, lagos e atmosferas, ou seja, disponível para os diversos usos, dentre eles o consumo humano (PICCOLI *et al.*, 2016).

Apesar do Brasil possuir cerca de 209 milhões de habitantes, o que representa cerca de 2,7% da população mundial, encontra-se no território brasileiro cerca de 12% da disponibilidade de água doce total do planeta. Porém, esse recurso também é mal distribuído no território nacional. Como exemplo, a região Norte, com apenas 5% da população, reúne aproximadamente 80% da água nacional disponível. Já as regiões próximas ao oceano Atlântico, possuem mais de 45% da população, porém, possuem menos de 3% dos recursos hídricos (ANA, 2018; IBGE, 2018).

Associada a má distribuição de água, estão a poluição por ações antropológicas e uso inconsciente dos recursos hídricos, assim como, o baixo índice de precipitação em algumas regiões. Como consequência, a escassez de água potável em diversas regiões do mundo se torna um dos problemas mais críticos (MING *et al.*, 2017).

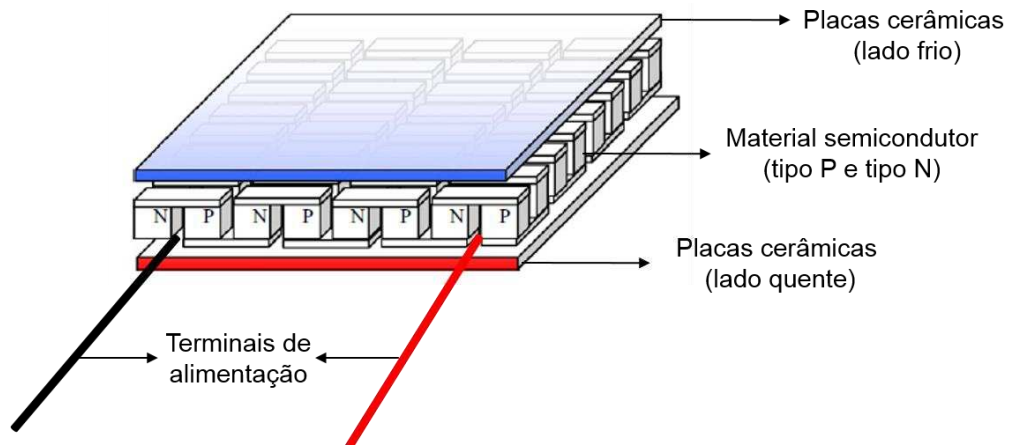
Nos últimos anos, fontes não convencionais de água vem sendo estudadas para complementar os recursos hídricos disponíveis. Sendo assim, os sistemas condensadores de vapor de água utilizando módulos termoelétricos são opções promissoras. Esses aparelhos são capazes de converter a água em estado de vapor para o estado líquido e, geralmente, própria para o consumo (NANDY *et al.*, 2014).

Os módulos termoelétricos, comumente chamados de módulos *Peltier*, operam com base nos efeitos *Seebeck* e *Peltier*. O efeito *Peltier* consiste na geração de uma diferença de temperatura em duas junções de materiais diferentes (tipo P e tipo N) quando uma diferença de potencial é aplicada em seus terminais. Já o efeito *Seebeck*, é o inverso, ou seja, uma diferença de potencial é produzida devido a

diferença de temperatura entre as junções de semicondutores de diferentes materiais.

Os módulos possuem uma camada externa de cerâmica e em seu interior, material semicondutor do tipo N e do tipo P, dependendo da dopagem na camada de valência (Figura 6.1). Um módulo é feito de diversas junções P-N para que haja uma alta diferença de temperatura entre os dois lados. Além disso, a diferença de temperatura também dependerá do resfriamento do lado quente, porque do contrário, o calor fluirá para o lado frio.

A configuração de um módulo de *Peltier* geralmente possui de 32 a 256 junções e pode ter uma diferença de temperatura entre as faces de até cerca de 70 °C quando a temperatura do lado quente é de cerca de 50 °C. Para atingir essa diferença de temperatura, a potência necessária para um módulo de 30 x 30mm é de cerca de 20 W. Já para um módulo de 40 x 40 mm a potência chega em torno de 80 W (MUÑOZ-GARCÍA *et al.*, 2013).



**Figura 6.1:** Componentes do módulo termoelétrico.  
**Fonte:** (MUÑOZ-GARCÍA *et al.*, 2013) adaptado.

Os sistemas de resfriamento por meio do uso de módulos termelétricos tem sido cada vez mais utilizados devido ao seu baixo índice de manutenção, pois não possuem partes móveis quando comparados com sistemas tradicionais de resfriamento. Os sistemas tradicionais de resfriamento usam, em geral, compressores e mudança de fase de fluídos de refrigeração e são, no entanto, mais eficientes, atualmente, do que os módulos termoelétricos.

Muñoz-García *et al.* (2013) desenvolveram um protótipo com o uso de módulos termoelétricos alimentados por células fotovoltaicas para produzir água e irrigar mudas de árvores. Já Henker *et al.* (2014), Nandy *et al.* (2014) e Joshi *et al.* (2017) desenvolveram sistemas de captação de água atmosférica para consumo humano. Porém, Henker *et al.* (2014) foram mais além e desenvolveram também um sistema de desinfecção com uma lâmpada germicida UV. Jradi, Ghaddar e Ghali (2011) desenvolveram um sistema capaz de coletar água potável da atmosfera no Líbano, usando vinte módulos termoelétricos. Dessa forma, observa-se o interesse pelos módulos termoelétricos para condensação de vapor de água atmosférico. Esse volume de água coletada pode ser utilizado para o consumo humano e animal, por exemplo.

## **6.2 Objetivos**

Objetiva-se desenvolver um sistema condensador de vapor de água utilizando módulos termoelétricos e analisar a quantidade de água condensada coletada, assim como a eficiência do protótipo desenvolvido.

## **6.3 Materiais e Método**

### **6.3.1 Módulo termoelétrico**

O módulo utilizado nesta pesquisa foi um módulo TEC – 12706, 40 x 40mm que possui 127 junções com um diferença de temperatura máxima, entre as faces, de cerca de 70 °C. É composto por cerâmica alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 96% branca). O Quadro 6.1 apresenta suas especificações de desempenho (HB ELECTRONIC, 2018; THERMONAMIC, 2018).

**Quadro 6.1:** Especificações de desempenho do módulo

Parâmetros	Temperatura do lado quente (°C)	
	27	50
Máxima diferença de temperatura (°C)	66	75
Tensão máxima aplicada (V)	14,4	16,4
Corrente máxima (A)	6,4	6,4
Resistência ( $\Omega$ )	1,98	2,30
Capacidade de resfriamento do módulo (W)	66	75

**Fonte:** HB ELECTRONIC (2018); THERMONAMIC (2018).

### **Avaliação do comportamento elétrico do módulo**

Utilizando um módulo termoelétrico TEC – 12706, avaliou-se o comportamento da corrente no módulo em função da tensão aplicada com o objetivo de desenvolver uma equação característica do módulo em relação a tensão e corrente. Para tal, utilizou-se uma fonte de tensão variável HK-3003D da Hikari, variando a tensão de 0,5 em 0,5 V. A face quente do módulo foi acoplada, utilizando pasta térmica, a um dissipador de calor de 27 aletas (8,5 x 7 cm). O sistema também contou com o auxílio de uma ventoinha de fonte de computador de potência máxima de 1,68 W, como mostra a Figura 6.2. Todo o sistema desenvolvido foi termicamente isolado com poliestireno expandido.

Assim, desenvolveu-se uma equação que relaciona a corrente no módulo em função da sua tensão de alimentação.



**Figura 6.2:** Montagem com o módulo Peltier, dissipador de calor e ventoinha.

### **Avaliação do comportamento da temperatura do módulo**

Avaliou-se também a temperatura do módulo utilizando uma câmera termográfica FLIR E60 (FLIR SYSTEMS, 2010).

Para uma correta medição da temperatura da superfície, fez-se necessário a configuração de alguns parâmetros, tanto do ambiente como da superfície do módulo termoelétrico. Portanto, primeiramente a câmera foi configurada com os parâmetros de emissividade da alumina (0,90) (KLEIN TOOLS, 2018; OMEGA, 2018), umidade relativa do ar, distância do objeto e temperatura refletida.

Segundo o manual do usuário da câmera termográfica FLIR E60, a temperatura refletida pode ser obtida por meio de uma folha de papel alumínio amassada e colocada sobre um papel cartão. O lado com o papel alumínio deve ser colocado no foco da câmera configurada com emissividade 1,0. O valor mensurado de temperatura, deverá ser utilizado como sendo o valor de temperatura refletida (FLIR SYSTEMS, 2010).

O valor de umidade relativa do ar foi obtido por meio do sensor de temperatura e umidade DHT22 fabricado pela *Aosong Electronics*. Este é um sensor digital que utiliza um termistor para a medição de temperatura e um sensor capacitivo para a medição de umidade relativa do ar, capaz de medir temperaturas entre  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$  e valores de umidade relativa do ar entre 0,0% e 99,9%, com precisão de  $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $\pm 2\%$  e resolução de  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $0,1\%$ , respectivamente. É um sensor cuja

distância de transmissão dos dados não deve ultrapassar 20 metros e possui tempo mínimo de resposta de 2 segundos (AOSONG, 2018; MARTÍN-GARÍN et al., 2018).

Posteriormente, a temperatura média da superfície do módulo era registrada em função da tensão aplicada no módulo. Assim como na medição de corrente, a tensão de alimentação foi variada de 0,5 em 0,5 V, usando a fonte HK-3003D da Hikari. Finalmente, analisou-se a diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura da superfície do módulo termoeletrico em função da tensão de alimentação. Uma equação que relaciona a diferença de temperatura e tensão foi desenvolvida para tal.

### **6.3.2 Velocidade do fluxo de ar**

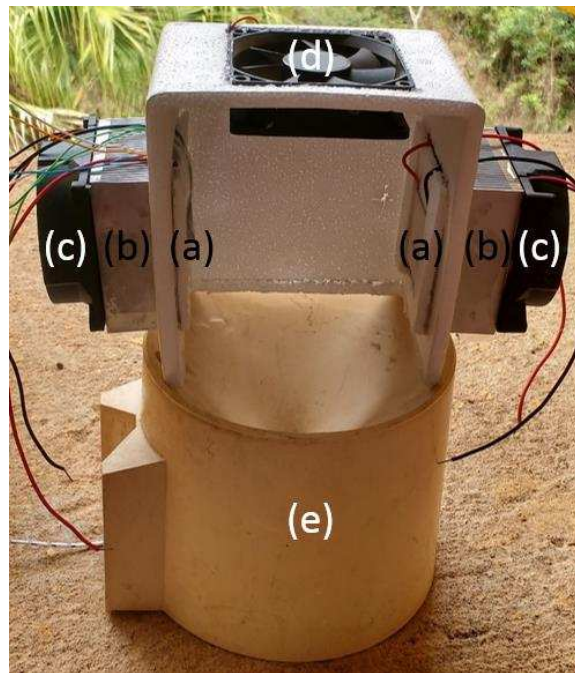
Analisou-se o fluxo de ar no interior do sistema de condensação de acordo com a tensão aplicada nos terminais da ventoinha responsável por renovar o fluxo de ar. A tensão foi variada de um em um volt, utilizando uma fonte de tensão HK-3003D da Hikari. Já a medição da velocidade do ar foi realizada utilizando um anemômetro de fio quente digital TAFR-200 da Instrutherm. Sua escala de medição é de 0,1 a 25 m/s com resolução de 0,01 m/s e precisão de  $\pm 5\%$  da leitura + 1 dígito (INSTRUTHERM, 2016).

Assim, desenvolveu-se uma equação que relaciona a velocidade do fluxo de ar em função da tensão de alimentação.

### **6.3.3 Sistema de condensação experimental**

O sistema de condensação foi desenvolvido utilizando uma caixa quadra de poliestireno expandido (comumente denominado de “isopor”), sem fundo, de capacidade de 500 ml, dimensões externas de 148 x 120 x 75 mm e internas de 132 x 104 x 59mm, com o objetivo de isolar termicamente o sistema de condensação. Os módulos termoeletricos foram fixados em paredes laterais juntamente com o dissipador de calor de alumínio e cada das ventoinhas para auxiliar na troca de calor. O protótipo foi desenvolvido para ter capacidade de operar com dois módulos termoeletricos fixados em suas laterais, como mostra a Figura 6.3. Porém, apenas um módulo termoeletrico foi utilizado nesta presente pesquisa devido à limitação da fonte de alimentação. Uma ventoinha auxiliar foi

fixada na parte superior do protótipo com o objetivo de insuflar ar e, conseqüentemente, aumentar o rendimento de captação de água. O sistema condensador foi fixado sob um pluviômetro de báscula para que a água que fosse sendo condensada escorresse por gravidade e fosse direcionada para o coletor (Figura 6.3). Quando o coletor atingia sua capacidade, i. e. de 2 ml, o mesmo despejava a água.



**Figura 6.3:** Sistema condensador, (a) módulos termoeletricos, (b) dissipador de calor, (c) ventoinha para dissipar o calor, (d) ventoinha para renovação do ar, (e) pluviômetro de báscula.

O sistema de condensação foi avaliado quanto ao consumo energético, rendimento de extração de água, quantidade de água coletada por  $m^2$  de superfície condensadora e coeficiente de *performance* do módulo termoeletrico.

A avaliação destes parâmetros se deu em função da tensão aplicada no módulo termoeletrico, velocidade de renovação do ar e umidade relativa do ar. Foram utilizados 8, 6 e 4 V para a alimentação do módulo e velocidades de aproximadamente 1, 2 e 3 m/s para renovação do ar. Os valores de umidade do ar foram divididos em quatro faixas, 60 a 70%, 70 a 80%, 80 a 90% e 90 a 95%.

Além disso, o sistema ficou em funcionamento durante o mês de outubro de 2018 e foram analisados os valores médios dos parâmetros: quantidade de água coletada, consumo de energia elétrica, coeficiente de extração de água e eficiência do módulo termoelétrico. Lembra-se aqui, que o experimento foi realizado na marquise do 2º andar do prédio do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa e que o valor máximo de umidade do ar foi cerca de 95% e o mínimo de cerca de 60%.

### **Avaliação da eficiência do módulo termoelétrico**

O coeficiente de *performance* do módulo termoelétrico, COP, indica a relação entre a quantidade de calor latente absorvida pela água condensada e a demanda elétrica do módulo termoelétrico, como mostra a Equação 6.1 (VIÁN; ASTRAIN; DOMÍNGUEZ, 2002).

$$COP = \frac{M_a C_L}{C_e} \quad (6.1)$$

em que:

- $M_a$  = Total de água coletada (kg);
- $C_L$  = Calor latente de condensação da água ( $2260 \times 10^3$  kJ/kg); e
- $C_e$  = Demanda elétrica do módulo termoelétrico (W).

O coeficiente COP do módulo foi calculado toda vez que o sistema coletava 2 ml de água. Dessa forma, o calor sensível da água condensada não foi considerado, uma vez que é um valor muito pequeno e, conseqüentemente, não contribui expressivamente para o cálculo do COP.

### **Avaliação rendimento de extração de água**

Calculou-se o rendimento de extração de água com base na quantidade de água disponível e a quantidade de água coletada. Dessa forma, primeiro calculou-se a umidade absoluta, quantidade de água (kg) por m<sup>3</sup> de ar seco, de acordo com as Equações 6.2, 6.3, 6.4 a ou 6.4 b, 6.5 e 6.6. A quantidade de água disponível sobre a superfície condensadora durante o período de experimento foi calculada

por meio da Equação 6.7, utilizando como área da superfície condensadora 16 cm<sup>2</sup>. Finalmente o rendimento de extração de água foi calculado de acordo com a Equação 6.8.

$$W = 0,62198 \frac{P_v}{P - P_v} 1000 \quad (6.2)$$

em que,

- W = Razão de mistura (g<sub>vapor</sub>.kg<sub>ar seco</sub><sup>-1</sup>);  
P = Pressão atmosférica (kPa); e  
P<sub>v</sub> = Pressão parcial de vapor (kPa) (Equação 6.3).

$$P_v = \frac{u_r}{100} P_{vs} \quad (6.3)$$

em que,

- u<sub>r</sub> = Umidade relativa (%); e  
P<sub>vs</sub> = Pressão de vapor de saturação (kPa) (Equação 6.4a ou 6.4b) (WILHELM, 1976).

$$\ln(P_{vs}) = 24,2779 - \frac{6238,64}{T_{bs}} - 0,344438 \ln(T_{bs}) \quad (6.4a)$$

$$-40^\circ\text{C} \leq T_{bs} \leq 0^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned} \ln(P_{vs}) = & \frac{-7511,52}{T_{bs}} + 89,63121 + 0,023998970 T_{bs} \\ & - 1,1654551 \times 10^{-5} T_{bs}^2 - 1,2810336 \times 10^{-8} T_{bs}^3 \\ & + 2,0998405 \times 10^{-11} T_{bs}^4 - 12,150799 \ln(T_{bs}) \end{aligned} \quad (6.4b)$$

$$110\text{ }^{\circ}\text{C} \geq T_{bs} \geq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$$

em que,

$T_{bs}$  = Temperatura de bulbo seco (K).

$$U_a = \frac{W}{v} \quad (6.5)$$

em que,

$U_a$  = Umidade absoluta ( $\text{g}_{\text{vapor}} \cdot \text{m}^3_{\text{ar seco}}^{-1}$ );

$W$  = Razão de mistura ( $\text{g}_{\text{vapor}} \cdot \text{kg}_{\text{ar seco}}^{-1}$ ); e

$v$  = Volume específico,  $\text{m}^3/\text{kg}$  (Equação 6.6) (WILHELM, 1976).

$$v = \frac{R_a T_{bs}}{P} (1 + 1,6078 W) \quad (6.6)$$

em que,

$R_a$  = Constante dos gases para o ar ( $0,28705\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ );

$T_{bs}$  = Temperatura de bulbo seco (K);

$P$  = Pressão atmosférica (kPa); e.

$W$  = Razão de mistura ( $\text{g}_{\text{vapor}} \cdot \text{kg}_{\text{ar seco}}^{-1}$ ).

$$M = U_a v A \Delta t \quad (6.7)$$

em que:

$M$  = Massa de água disponível (kg);

$U_a$  = Umidade absoluta ( $\text{kg}_{\text{vapor de água}} / \text{m}^3_{\text{ar seco}}$ );

$v$  = Velocidade do vento a dois metros de altitude (m/s);

$W$  = Razão de mistura ( $\text{g}_{\text{vapor}} \cdot \text{kg}_{\text{ar seco}}^{-1}$ );

$A$  = Área da superfície ( $\text{m}^2$ ); e

$\Delta t$  = Intervalo de tempo em análise (s).

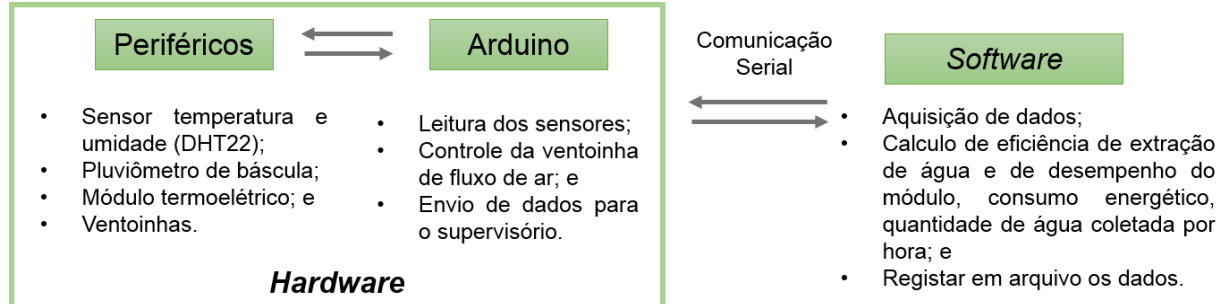
$$\eta_e = \frac{M_c}{M} 100 \quad (6.8)$$

em que,

- $\eta_e$  = Rendimento de extração de água do ambiente (%);
- $M$  = Massa de ar disponível no ar (kg); e
- $M_c$  = Quantidade de massa de água condensada coletada (kg).

### 6.3.4 Sistema automático para captação de água e aquisição de dados

Todo o sistema foi projetado para ser controlado automaticamente. Assim, foi desenvolvido um sistema supervisor, na linguagem C#, usando o Visual Studio C# 2017 para que, juntamente com a plataforma Arduino Mega, pudesse registrar a temperatura do ar ambiente, umidade relativa do ar e quantidade de água coletada. Além disso, esse sistema automático controlava a velocidade do ventilador para variação do fluxo de ar e realizava os cálculos de eficiência do sistema. A Figura 6.4 apresenta o funcionamento deste sistema automático para condensação de água.



**Figura 6.4:** Esquema de funcionamento do sistema automático para captação de água e aquisição de dados.

### Hardware

O sensor DHT22 fabricado pela *Aosong Electronics* foi responsável tanto pela medição de temperatura do ar, quanto pela umidade relativa do ar.

Já o pluviômetro de báscula foi utilizado para mensurar da quantidade de água condensada. Esse sistema conta com um reservatório, que ao atingir seu limite, despeja a água e envia um pulso para o microcontrolador. Isso é possível uma vez que o pluviômetro conta com uma chave magnética *reed switch* e um ímã fixado na

extremidade superior do coletor de água. Dessa forma, quando o reservatório despejava a água, a chave magnética era fechada e o sinal é enviado para o Arduino. Cada pulso enviado representa 2 ml de água condensada.

Com o objetivo de analisar a influência da velocidade do fluxo de ar na superfície condensadora, a cada pulso do pluviômetro de báscula, o microcontrolador altera a tensão de alimentação nos terminais de alimentação do *cooler* e, conseqüentemente a velocidade de rotação. Esse controle foi feito usando o método de *PWM (Pulse With Modulation)*, em que por meio da modulação da largura de pulso, pode-se variar a velocidade da ventoinha. Para que o Arduino pudesse acionar a ventoinha, utilizou-se um transistor TIP 122 da *Fairchild Semiconductor*, como mostra a Figura 6.5.

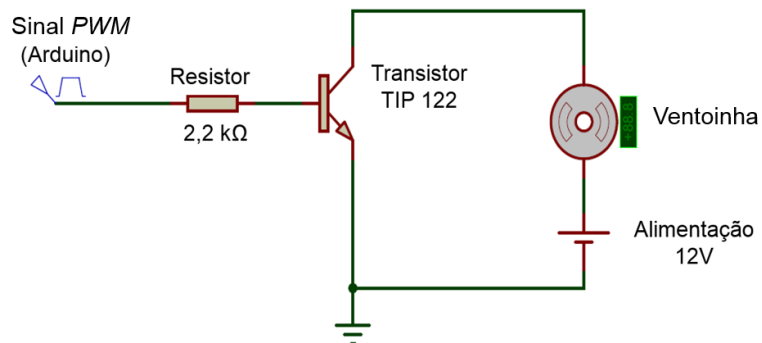


Figura 6.5: Esquema de acionamento do *cooler* responsável pelo fluxo de ar.

## 6.4 Resultados e discussão

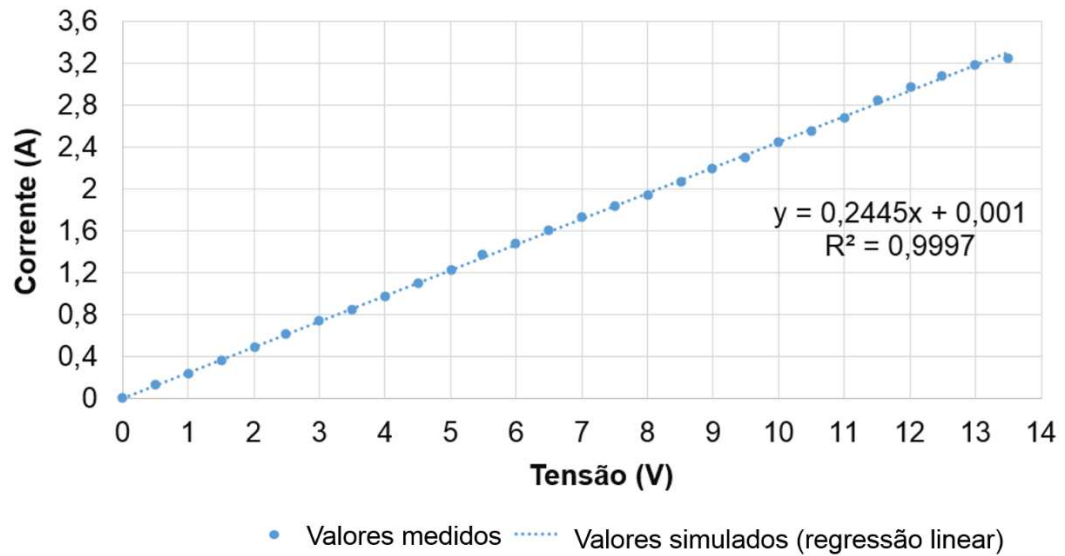
### 6.4.1 Análise do módulo termoelétrico

#### Corrente versus tensão dos módulos termoelétricos

A Figura 6.6 mostra os valores de corrente em função da tensão, assim como a equação linear da equação corrente versus tensão e o valor de  $R^2$ . Observa-se que a resistência encontrada para o módulo foi de cerca de 4,10  $\Omega$ . Dessa forma, o módulo apresentou uma potência máxima de cerca de 43,88 W para uma tensão máxima aplicada de 13,5 V. Uma tensão maior do que 13,5 V não foi aplicada aos terminais do módulo devido a limitações da fonte de alimentação utilizada.

Dessa forma, observou-se que as características testadas dos módulos utilizados diferiram das características fornecidas pelos fabricantes no *datasheet* do

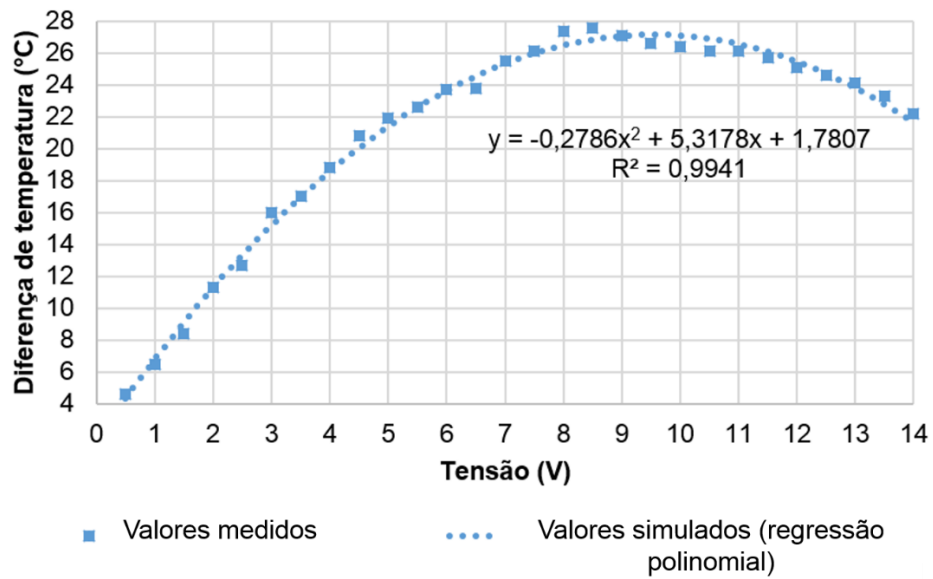
equipamento, como por exemplo a resistência e a corrente. Segundo o *datasheet*, o valor da resistência do módulo é de cerca de  $2 \Omega$ , ou seja, 50% menor do que o valor encontrado neste trabalho, conseqüentemente, a corrente também foi cerca de 50% menor nesta presente pesquisa.



**Figura 6.6:** Relação entre corrente versus tensão do módulo termoelétrico utilizado nesta pesquisa.

### **Relação entre temperatura da superfície fria versus tensão no módulo termoelétrico**

A Figura 6.7 apresenta a diferença de temperatura entre a temperatura ambiente do ar e a temperatura da superfície do módulo termoelétrico em função da tensão, assim como, a regressão polinomial de grau 2 e o valor de  $R^2$ .

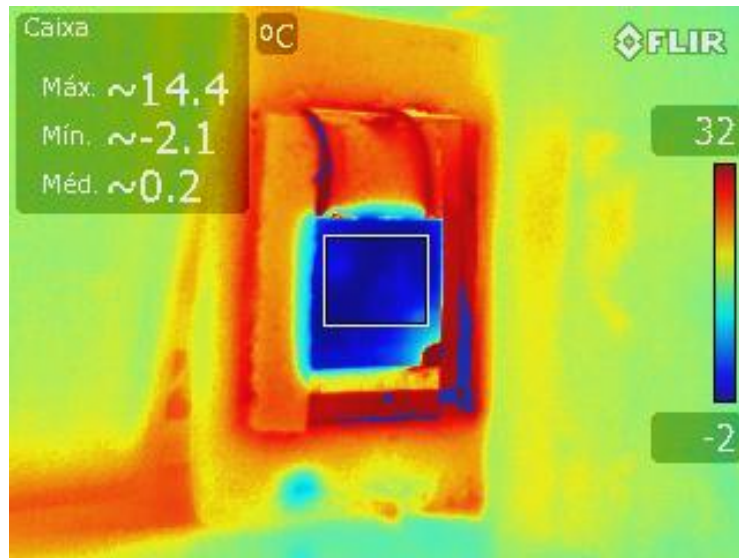


**Figura 6.7:** Relação entre temperatura da superfície fria versus tensão no módulo termoelétrico utilizado neste estudo.

Observa-se que a máxima diferença de temperatura obtida foi de 27,6 °C para uma tensão de 8,5 V. Após esse valor de tensão, a diferença de temperatura começou a decrescer, o que pode ser explicado pelo fluxo de calor fluindo do lado quente para o frio devido a uma má eficiência do sistema de refrigeração (dissipador + *cooler*) do lado quente.

O valor máximo para a alimentação do módulo termoelétrico, durante os experimentos, foi de 8V, pois esse era um valor próximo ao maior resfriamento observado no módulo. Uma maior alimentação não era favorável, uma vez que, para esse sistema, a taxa de resfriamento diminuiu com valores maiores de tensões, e conseqüentemente, ocorre um maior consumo energético.

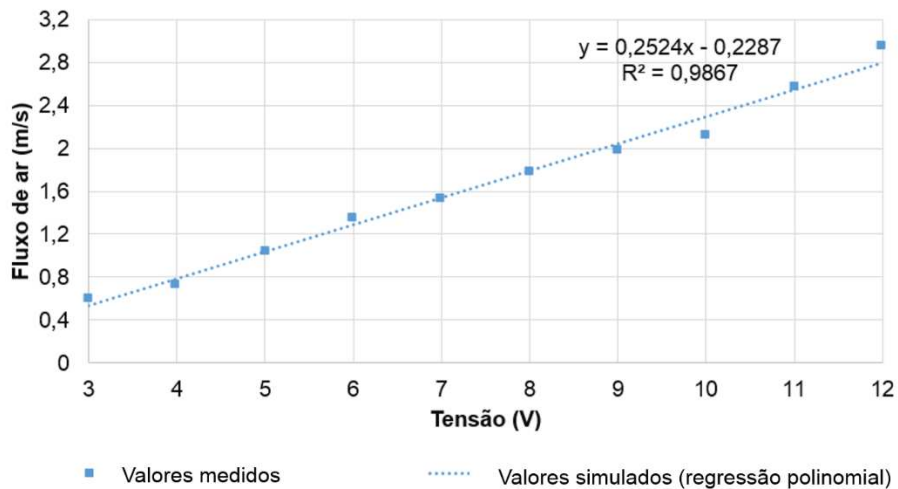
Ademais, observou-se que há uma grande variação da distribuição espacial da temperatura na superfície do módulo como mostra a Figura 6.8. Além disso, uma pequena área do lado direito inferior do módulo (aproximadamente 2,5%) não resfriava. Este fato ocorreu em todos os módulos termoelétricos testados, que foram em número de três. Dessa forma, concluiu-se que a temperatura dos módulos termoelétricos não foram uniformes, provavelmente devido à baixa qualidade tecnológica dos mesmos.



**Figura 6.8:** Imagem termográfica do módulo termoelétrico alimentado em 8 V.

#### 6.4.2 Fluxo de ar no sistema condensador

A Figura 6.9 apresenta a relação da velocidade do fluxo de ar em função da tensão e a respectiva regressão linear que descreve a relação entre a velocidade do fluxo de ar e da tensão da ventoinha, assim como o valor de  $R^2$ .



**Figura 6.9:** Relação entre o fluxo de ar e a tensão da ventoinha.

Durante o experimento, escolheu-se valores de alimentação da ventoinha de 5V, 9V e 12 V, o que corresponderia a uma velocidade do ar de cerca de 1, 2 e 3 m/s, respectivamente, para analisar a influência do fluxo de ar na condensação do

vapor de água. Observou-se que a tensão mínima para funcionamento da ventoinha foi de 3V.

### 6.4.3 Sistema automático do condensador de vapor de água

#### Arduino

O programa desenvolvido na plataforma Arduino foi responsável por fazer as leituras de temperatura do ar ambiente e umidade relativa do ar quando solicitado e verificar se 2 ml de água haviam sido coletadas. Em caso positivo, o fluxo de ar no interior do protótipo era modificado, alterando a tensão nos terminais de alimentação da ventoinha. A Figura 6.10 exemplifica o funcionamento do programa desenvolvido na plataforma Arduino (ARDUINO, 2018). A Figura 6.4 mostra a relação entre a plataforma Arduino e o programa de aquisição de dados.

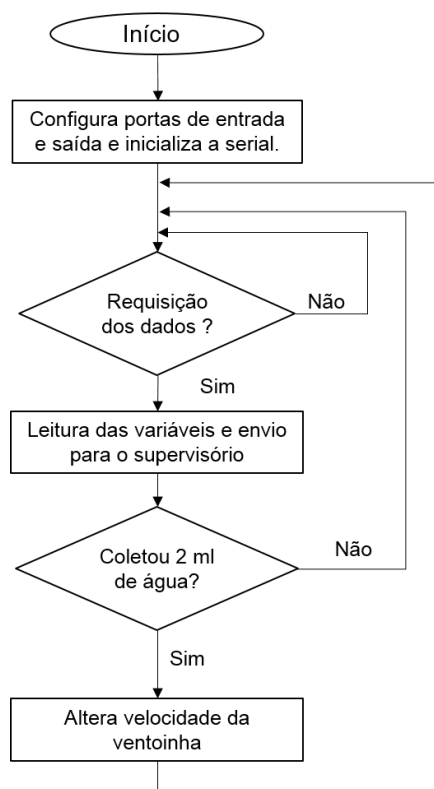
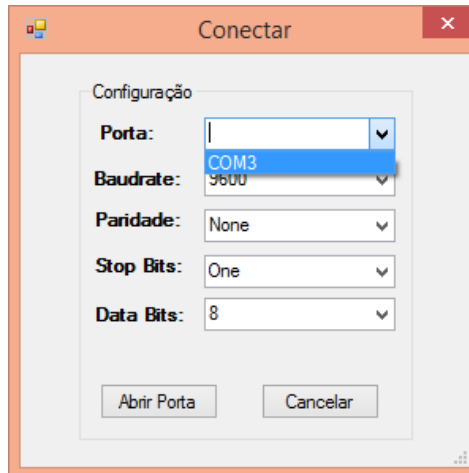


Figura 6.10: Fluxograma do funcionamento do programa desenvolvido no Arduino.

## Sistema supervisor e de aquisição de dados

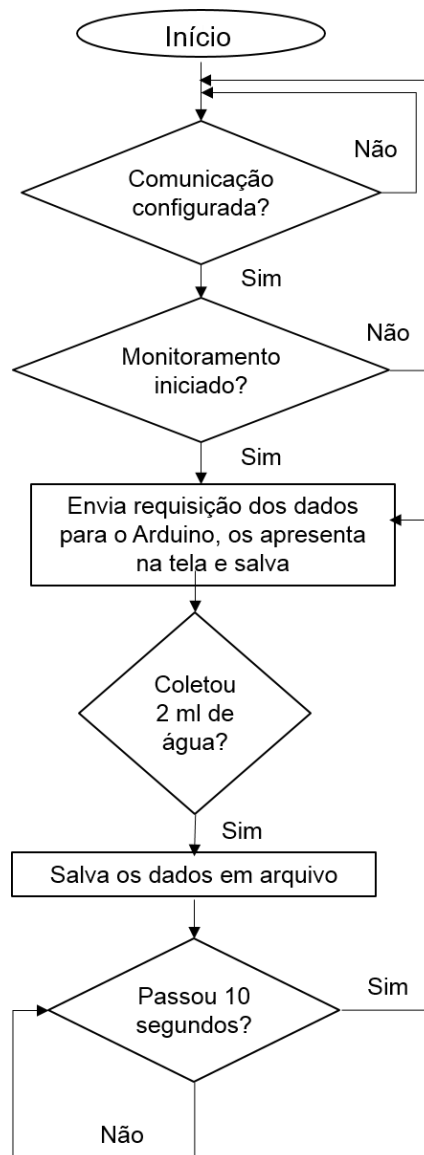
Primeiramente foi necessário estabelecer a comunicação com a plataforma Arduino por meio do botão conectar. Parâmetros como velocidade da comunicação, número de bits e paridade foram pré configurados. Assim, fez-se necessário apenas a escolha da porta de comunicação (Figura 6.11).



**Figura 6.11:** Tela de configuração da comunicação serial do software de aquisição de dados e a plataforma Arduino.

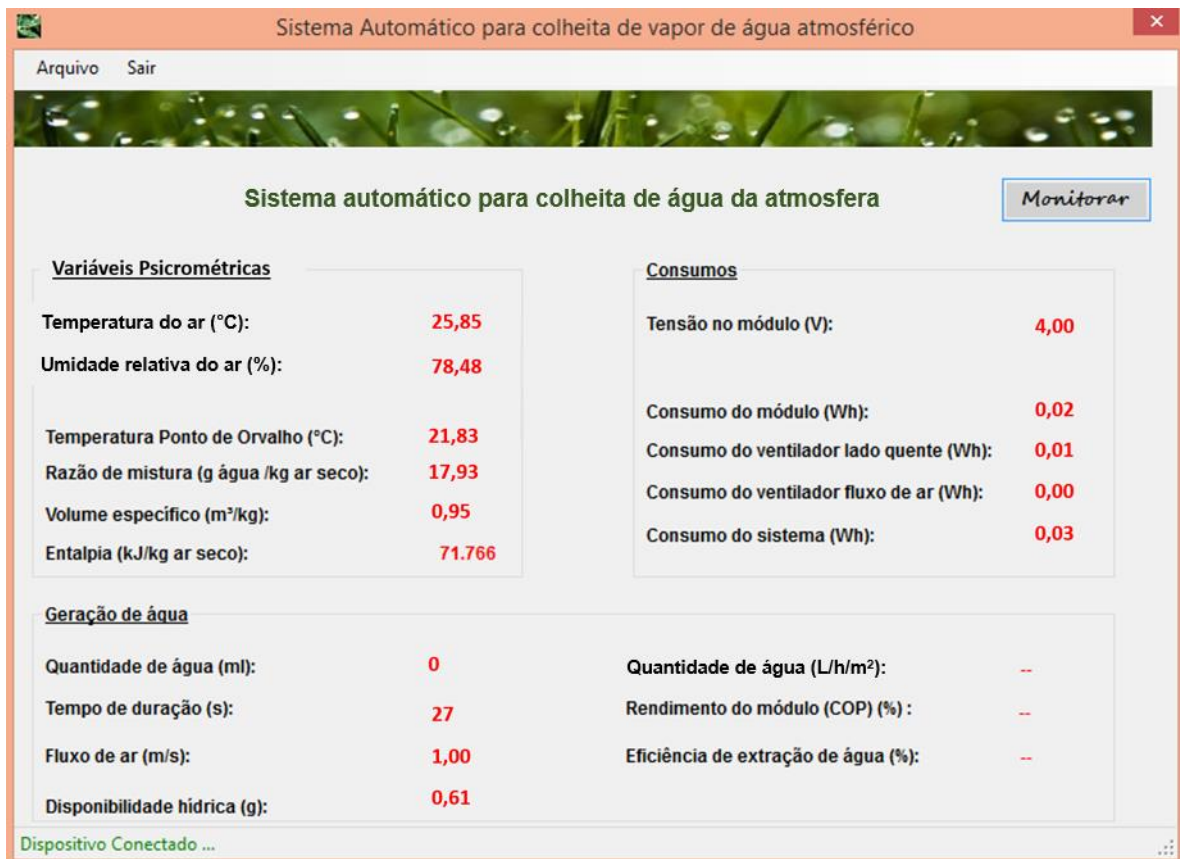
Após a conexão ser estabelecida, foi necessário iniciar o monitoramento do sistema por meio do botão monitorar. Assim, a cada intervalo de 10 segundos o programa fazia requisição dos dados para o Arduino e recebia os dados de temperatura do ar ambiente, umidade do ar, o fluxo de ar atual e se os 2 ml de água já haviam sido coletados. Se sim, o software salvava os dados durante o período de coleta dos 2 ml de água e fazia os cálculos referentes ao rendimento de extração hídrica, a eficiência do módulo (COP do módulo), consumo energético e a extrapolação para a quantidade de água que poderia ser coletada em 1 m<sup>2</sup> de superfície condensadora utilizando módulos termoeletrônicos. O *software* também recebia o valor da potência do módulo e das ventoinhas, porém as mesmas eram pré estabelecidas no Arduino e não mensuradas em tempo real. Ademais, o programa desenvolvido também tinha a funcionalidade de salvar os dados quando solicitado pelo usuário, independentemente se os 2 ml de água fossem coletados ou não.

A Figura 6.12 apresenta o fluxograma do programa supervisorio desenvolvido, exemplificando seu funcionamento.



**Figura 6.12:** Fluxograma do funcionamento do *software* supervisorio desenvolvido.

Já a Figura 6.13 mostra a tela do *software* desenvolvido dividida em três blocos: variáveis psicrométricas, consumos e geração de água. Nota-se que a quantidade de água condensada (L/h/m<sup>2</sup>), COP do módulo (%) e a eficiência de extração de água (%) foram calculados apenas quando o sistema coleta as 2 ml de água.

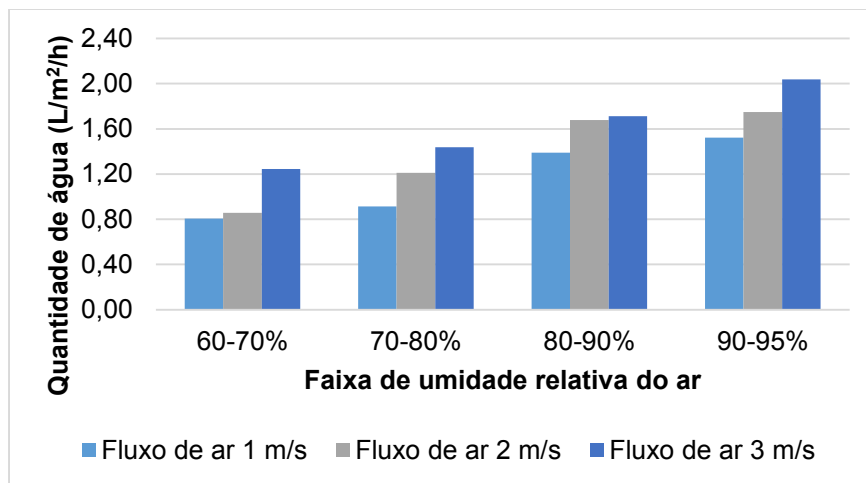


**Figura 6.13:** Tela principal do programa supervisorio desenvolvido.

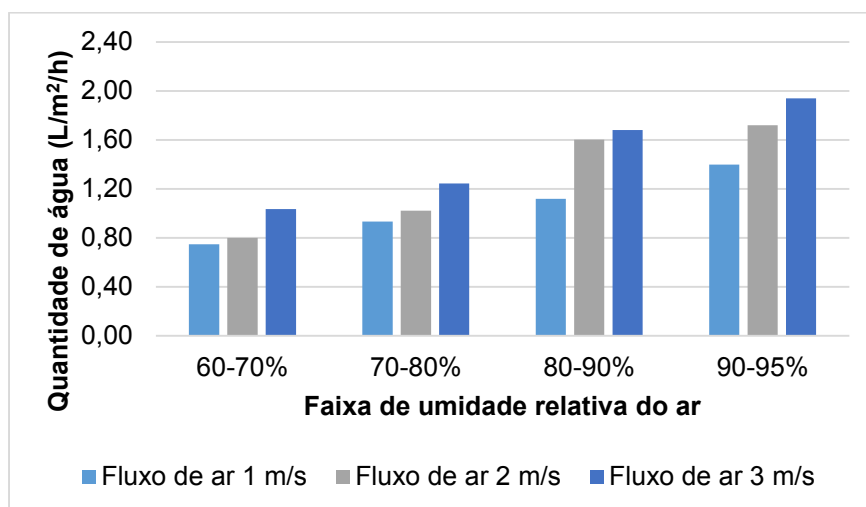
### Quantidade de água condensada

A Figura 6.14 apresenta a quantidade de água média que poderia ser coletada por metro quadrado de superfície condensadora, em função da tensão de alimentação do módulo termoeletrico ser de 8, 6 ou 4 V.

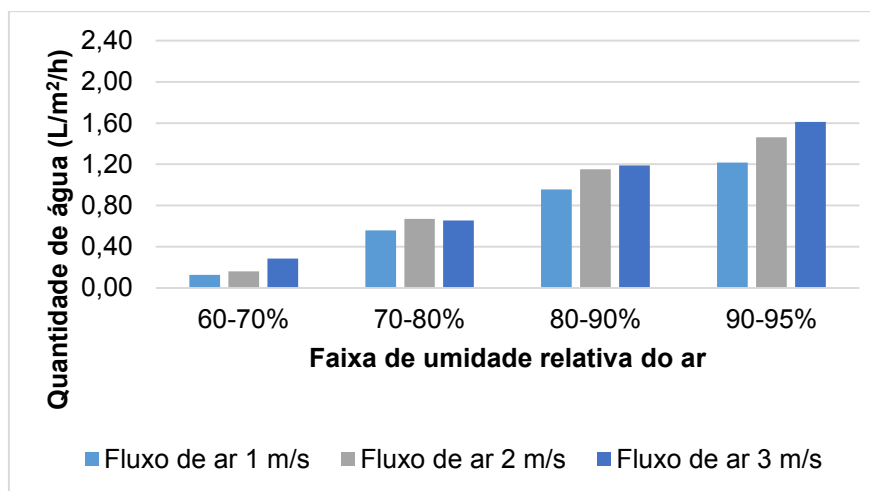
Nota-se que a maior quantidade de água que poderia ser coletada foi de cerca de 2,04 L/m<sup>2</sup>/h para uma tensão de alimentação do módulo de 8 Volts, velocidade de renovação do ar de 3 m/s e umidade relativa do ar maior que 90%. Por outro lado, a menor quantidade de água, cerca de 0,13 L/m<sup>2</sup>/h poderiam ser coletadas em dias mais secos (umidade do ar 60 – 70%), alimentação do módulo de 4V e velocidade de renovação do ar de 1 m/s.



(A)



(B)



(C)

**Figura 6.14:** Quantidade de água condensada coletada em função da tensão de alimentação do módulo termoeletrico: (A) 8 V (B) 6V e (C) 4 V.

Dessa forma, observou-se claramente que a quantidade de água coletada é proporcional a umidade relativa, fluxo de ar e tensão do módulo termoelétrico.

Isso pode ser explicado pelo fato de que com uma maior velocidade de renovação do ar, mais vapor de água atinge a superfície fria e, conseqüentemente, se condensa. Assim, maior quantidade de água pode ser formada. Porém, ocorreu uma limitação na ventoinha, pois o valor máximo alcançado foi de 3 m/s, assim não se pôde estudar o valor ótimo de velocidade do vento para a formação de vapor de água condensado para o módulo estudado.

Ao que refere sobre a influência da tensão do módulo termoelétrico na geração de condensação observou-se que, a tensão de alimentação de 8V, como pode ser observado na Figura 6.14, foi a tensão em que mais água pôde ser coletada para todas as faixas de umidade e fluxo de ar medidas. Assim, esta foi determinada como sendo a tensão ótima de operação do protótipo.

Portanto, observou-se que analisando apenas a quantidade de água gerada, a melhor tensão de alimentação foi a de 8V, a melhor velocidade de renovação do ar foi de 3 m/s e a melhor umidade relativa foi a maior possível.

Em seu trabalho, Oliveira (2013) coletou uma quantidade média de 0,26 L/m<sup>2</sup>/h para uma média de umidade relativa do ar de 75% sem o uso de dispositivos para renovação do ar, utilizando a mesma tecnologia de módulos termoelétricos. Observou-se que para todos os valores de tensão de alimentação estudados do módulo termoelétrico e para todas as velocidades do ar para a faixa de umidade entorno de 75%, os valores obtidos nessa presente pesquisa foram superiores aos valores coletados por Oliveira (2013). Por exemplo, para a menor velocidade de renovação de 1m/s, tensão de alimentação de 4 V e faixa de umidade relativa 70-80%, foram coletadas nessa presente pesquisa cerca de 0,56 L/m<sup>2</sup>/h, ou seja, mais que o dobro coletado por Oliveira (2013). Dessa forma, observa-se a importância da renovação do ar.

Já Henker *et al.* (2012) analisaram a quantidade de água condensada para uma umidade relativa média de 80% usando uma velocidade de renovação do ar de cerca de 2 m/s e obteve cerca de 2,6 L/m<sup>2</sup>/h. Esta é uma quantidade superior a encontrada neste presente estudo para os mesmos valores de umidade relativa do ar e velocidade do ar. Acredita-se que essa diferença pode ser atribuída ao diferente

modelo do protótipo desenvolvido, assim como projetos diferentes de resfriamento da parte quente do módulo termoelétrico, o que interfere na temperatura da face fria, e o próprio módulo, uma vez que não possuem temperatura uniforme em suas superfícies.

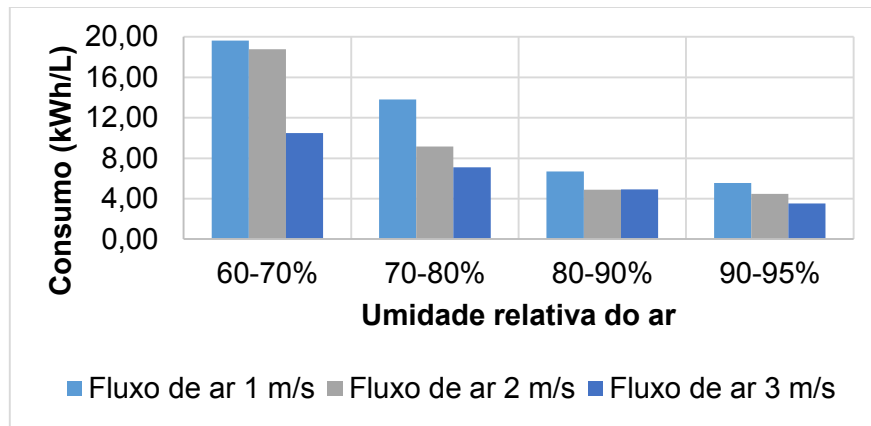
### **Consumo de energia elétrica e custo do vapor de água condensado**

Calculou-se o consumo de energia elétrica do sistema necessário para geração de um litro de água em função da tensão de alimentação do módulo (Figura 6.15).

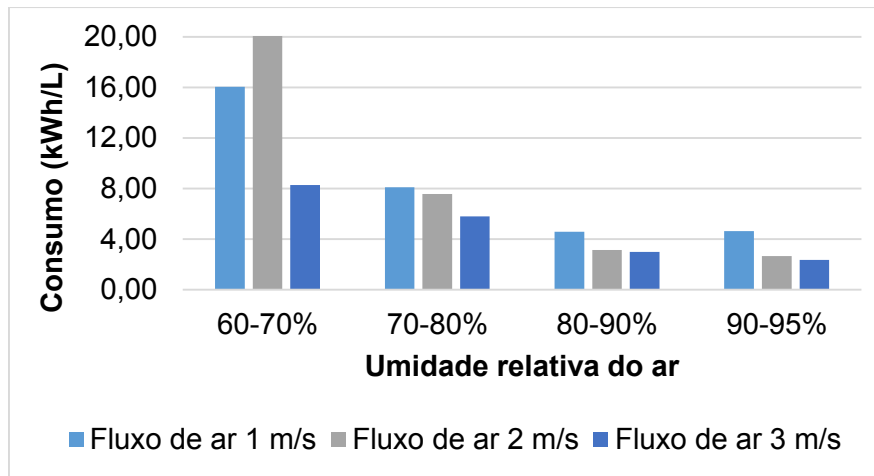
Observa-se que para valores de umidade relativa na faixa de 90 a 95%, quanto menor a tensão de alimentação do módulo, menor o consumo para geração de um litro de água para todas as velocidades do fluxo de ar estudadas. Isso acontece porque apesar de ser necessário um tempo maior para coletar um litro de água para tensões de alimentação do módulo de 6 e 4 V, quando comparados a tensão de alimentação de 8 V, por exemplo, o consumo do módulo é inferior e, conseqüentemente, o consumo para geração de um litro de água.

O mesmo acontece para os demais valores de umidade relativa do ar e velocidade de renovação do ar quando se compara o consumo de energia elétrica para geração de um litro de água para valores de tensão de alimentação do módulo de 8 e 6 Volts. Observa-se que o consumo energético para geração de um litro de água utilizando um módulo alimentado a 6 V é inferior do que o consumo energético de um módulo alimentado a 8 V, exceto para uma faixa de umidade entre 60-70% com velocidade de renovação do ar de 2m/s. Dessa forma, torna-se necessário a investigação e repetição de testes para comprovar esse maior consumo.

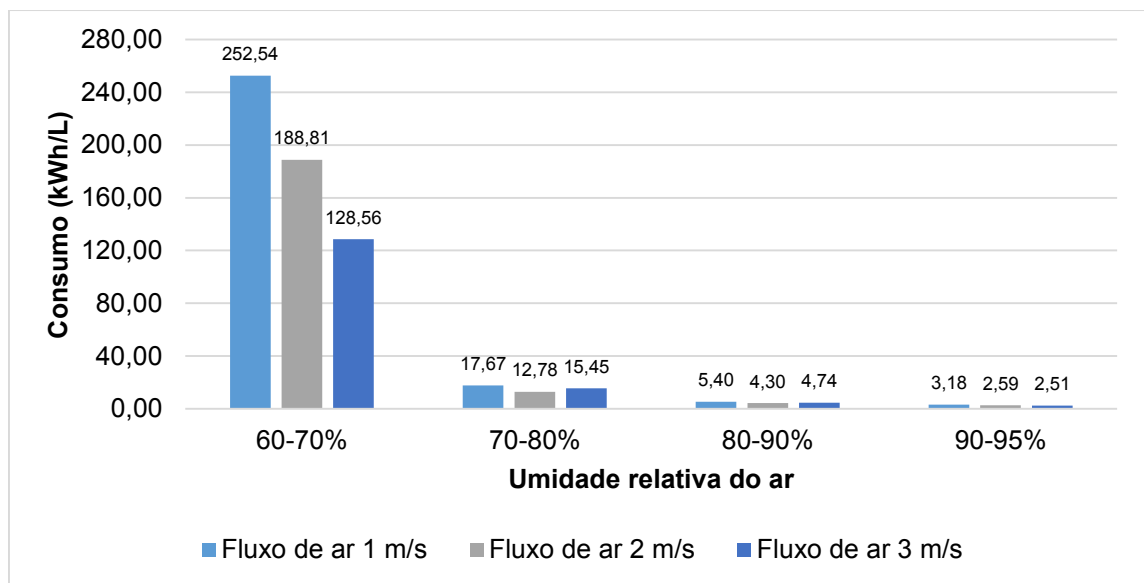
Por outro lado, o módulo alimentado a 4 V apresentou o maior consumo energético para geração de um litro de água, especialmente, quando a umidade relativa do ar era baixa (60 -70%). Isso pode ser explicado pelo fato de que é necessário um período muito superior para geração de um litro de água. Como exemplo, o módulo termoelétrico alimentado em 8 V atuando nessa faixa de umidade relativa do ar e com velocidade de renovação do ar de 3 m/s, necessitou cerca de 0,83 horas para gerar 1 L/m<sup>2</sup>, ao passo que, módulos termoelétricos alimentados em 4 V necessitam de cerca de 3,45 horas para gerar 1 L/m<sup>2</sup>.



(A)



(B)



(C)

**Figura 6.15:** Consumo do sistema para condensação de água em função da alimentação do módulo termoeletrônico (A) 8 V (B) 6V e (C) 4 V.

Considerando a tarifa de energia elétrica para consumidores B1, ou seja, residencial normal, e com bandeira verde e sem impostos, de R\$/kWh 0,58684 CEMIG (2018), calculou-se o custo do litro de vapor de água condensado de acordo com o consumo elétrico de todo o sistema para Viçosa, MG. O Quadro 6.2 apresenta a estimativa do custo de água coletada em função da tensão de alimentação do módulo, faixa de umidade relativa do ar e velocidade de renovação do fluxo de ar.

**Quadro 6.2:** Estimativa do custo médio do litro de água condensada (R\$) em função da tensão de alimentação do módulo e faixa de umidade relativa média

<b>Estimativa do custo médio do litro de água condensada (R\$/L)</b>			
<b>Alimentação do módulo 8V</b>			
<b>Faixa de umidade relativa</b>	<b>Fluxo de ar 1 m/s</b>	<b>Fluxo de ar 2 m/s</b>	<b>Fluxo de ar 3 m/s</b>
<b>60- 70%</b>	11,53	11,01	6,16
<b>70 – 80%</b>	8,11	5,37	4,17
<b>80 – 90%</b>	3,92	2,88	2,89
<b>90 – 95%</b>	3,27	2,62	2,07

<b>Estimativa do custo médio do litro de água condensada (R\$/L)</b>			
<b>Alimentação do módulo 6V</b>			
<b>Faixa de umidade relativa</b>	<b>Fluxo de ar 1 m/s</b>	<b>Fluxo de ar 2 m/s</b>	<b>Fluxo de ar 3 m/s</b>
<b>60- 70%</b>	9,42	11,82	4,86
<b>70 – 80%</b>	4,76	4,44	3,40
<b>80 – 90%</b>	2,69	1,85	1,76
<b>90 – 95%</b>	2,72	1,56	1,39

<b>Estimativa do custo médio do litro de água condensada (R\$/L)</b>			
<b>Alimentação do módulo 4 V</b>			
<b>Faixa de umidade relativa</b>	<b>Fluxo de ar 1 m/s</b>	<b>Fluxo de ar 2 m/s</b>	<b>Fluxo de ar 3 m/s</b>
<b>60- 70%</b>	148,20	110,80	75,44
<b>70 – 80%</b>	10,37	7,50	9,07
<b>80 – 90%</b>	3,17	2,52	2,78
<b>90 – 95%</b>	1,87	1,52	1,47

Observa-se que o custo por litro de água condensada diminui à medida que a umidade relativa do ar e o fluxo de ar aumentam.

Além disso, nota-se que do ponto de vista financeiro de consumo de energia elétrica, o menor valor para geração de água foi de 1,39 R\$/L de água para uma tensão de alimentação dos módulos de 6 V, velocidade de renovação do ar de 3 m/s e umidade relativa do ar entre 90 a 95%.

Avaliando todos os cenários possíveis de alimentação dos módulos termoelétricos, umidade relativa do ar e velocidade de renovação do ar, observa-se que, na maioria dos casos, a tensão ótima que minimiza o gasto em energia elétrica foi de 6 V.

### **Coeficiente de extração de água**

Além da quantidade de água gerada pelo sistema, calculou-se o coeficiente de extração de água do sistema. O Quadro 6.3 apresenta os coeficientes de extração em função da tensão de alimentação do módulo termoelétrico, faixa de umidade relativa do ar e velocidade do fluxo de ar para renovação do ar.

Ademais, por meio do Quadro 6.3 pode-se observar que o sistema desenvolvido apresenta uma baixa eficiência de extração. O valor máximo alcançado foi de apenas 2,24 % para uma alimentação do módulo de 8V, velocidade de 1 m/s e valores de umidade do ar maiores que 90%.

Observou-se que quanto maior era a velocidade de renovação do ar, menor o coeficiente de extração de água. Isso pode ser explicado pelo fato de que com maiores velocidades do ar, mais água estava disponível no sistema. Porém, o módulo não tinha capacidade de extrair toda essa água. Dessa forma, o início era minimizado.

Nestas condições, observou-se que a tensão ótima que maximiza o coeficiente de extração, para a maioria dos cenários, foi de 8 V.

**Quadro 6.3:** Coeficiente de extração de água médio (%) em função da tensão de alimentação do módulo e faixa de umidade relativa média

<b>Coeficiente de extração médio (%)</b>			
<b>Alimentação do módulo 8V</b>			
<b>Faixa de umidade relativa</b>	<b>Fluxo de ar 1 m/s</b>	<b>Fluxo de ar 2 m/s</b>	<b>Fluxo de ar 3 m/s</b>
<b>60- 70%</b>	1,22	0,67	0,63
<b>70 – 80%</b>	1,42	0,97	0,79
<b>80 – 90%</b>	1,89	1,43	0,96
<b>90 – 95%</b>	2,24	1,56	1,20

<b>Coeficiente de extração médio (%)</b>			
<b>Alimentação do módulo 6V</b>			
<b>Faixa de umidade relativa</b>	<b>Fluxo de ar 1 m/s</b>	<b>Fluxo de ar 2 m/s</b>	<b>Fluxo de ar 3 m/s</b>
<b>60- 70%</b>	1,12	0,40	0,51
<b>70 – 80%</b>	1,31	0,75	0,66
<b>80 – 90%</b>	1,95	1,32	0,96
<b>90 – 95%</b>	1,56	1,63	1,22

<b>Coeficiente de extração médio (%)</b>			
<b>Alimentação do módulo 4 V</b>			
<b>Faixa de umidade relativa</b>	<b>Fluxo de ar 1 m/s</b>	<b>Fluxo de ar 2 m/s</b>	<b>Fluxo de ar 3 m/s</b>
<b>60- 70%</b>	0,10	0,16	0,17
<b>70 – 80%</b>	0,74	0,56	0,34
<b>80 – 90%</b>	1,60	0,98	0,66
<b>90 – 95%</b>	2,22	1,31	0,98

### **Coeficiente COP do módulo termoelétrico**

O Quadro 6.4 apresenta a eficiência média do módulo em função da tensão de alimentação do módulo, velocidade de renovação do ar e umidade relativa. Nota-se que o maior valor de coeficiente encontrado foi de cerca de apenas 54%.

É possível observar que a medida que a umidade relativa do ar aumenta, assim como a velocidade de renovação do ar, o coeficiente de *performance* (COP) aumenta, isso se deve ao fato de que uma quantidade maior de vapor de água condensada ser coletada e com um menor consumo de energia elétrica, uma vez que para maiores umidades relativas do ar, menos o ar precisa ser resfriado e,

consequentemente, menos energia é necessária para o resfriamento até a condensação.

Dessa forma, observa-se que a tensão ótima que maximiza o coeficiente de *performance* do módulo (COP), para a maioria dos cenários, foi de 6V.

**Quadro 6.4:** Coeficiente de *performance* médio do módulo (%) em função da tensão de alimentação do módulo e faixa de umidade relativa

<b>Coeficiente COP médio do módulo (%)</b>			
<b>Alimentação do módulo 8V</b>			
<b>Faixa de umidade relativa</b>	<b>Fluxo de ar 1 m/s</b>	<b>Fluxo de ar 2 m/s</b>	<b>Fluxo de ar 3 m/s</b>
<b>60- 70%</b>	3,78	4,35	10,00
<b>70 – 80%</b>	5,30	8,66	12,3
<b>80 – 90%</b>	10,82	16,58	17,2
<b>90 – 95%</b>	13,71	18,06	24,6
<b>Coeficiente COP médio do módulo (%)</b>			
<b>Alimentação do módulo 6V</b>			
<b>Faixa de umidade relativa</b>	<b>Fluxo de ar 1 m/s</b>	<b>Fluxo de ar 2 m/s</b>	<b>Fluxo de ar 3 m/s</b>
<b>60- 70%</b>	7,74	2,94	12,43
<b>70 – 80%</b>	10,11	12,13	18,15
<b>80 – 90%</b>	23,23	30,52	38,52
<b>90 – 95%</b>	15,12	34,42	44,38
<b>Coeficiente COP médio do módulo (%)</b>			
<b>Alimentação do módulo 4 V</b>			
<b>Faixa de umidade relativa</b>	<b>Fluxo de ar 1 m/s</b>	<b>Fluxo de ar 2 m/s</b>	<b>Fluxo de ar 3 m/s</b>
<b>60- 70%</b>	0,34	0,54	1,70
<b>70 – 80%</b>	4,79	9,61	8,88
<b>80 – 90%</b>	19,70	28,11	29,73
<b>90 – 95%</b>	30,70	44,21	53,99

## 6.5 Conclusões

Este trabalho desenvolveu um sistema condensador de vapor água automático com módulos termoeletrônicos. Foram avaliados: a quantidade de água coletada,

eficiência de extração de água e coeficiente de *performance* do módulo termoelétrico.

Umidade relativa do ar acima de 90 % e a velocidade de renovação do ar de 3 m/s, bem como uma tensão de alimentação do módulo de 8 V foram as melhores condições para a obtenção de uma maior quantidade de vapor de água condensado.

Quanto ao rendimento de extração de água, observou-se que a tensão de 8 V foi considerada ótima para otimizar o coeficiente de extração. Mesmo assim, o rendimento de extração de água é muito pequeno, o que contribui para o aumento de energia elétrica e diminuição do coeficiente de *performance* do módulo. O máximo coeficiente de extração encontrado foi de 2,24 %.

O maior coeficiente de *performance* do módulo encontrado foi de 54%. A tensão ótima que maximiza o coeficiente de *performance* do módulo (COP), para a maioria dos cenários, foi de 6V.

O valor do litro de vapor de água condensado variou entre R\$ 148,20 para menor faixa de umidade relativa do ar (60 -70%), menor tensão de alimentação do modulo termoelétrico (4V) e menor velocidade de renovação do ar (1m/s) e R\$ 1,39 para uma tensão de alimentação dos módulos de 6 V, velocidade de renovação do ar de 3 m/s e umidade relativa do ar entre 90 a 95%.

O sistema condensador desenvolvido pode ser alimentado por um sistema fotovoltaico com o objetivo de tornar o sistema autossustentável. Dessa forma, o custo para a produção de água poderá ser minimizado. Além disso, sugere-se o uso do sistema condensador apenas durante a noite, pois a umidade relativa é maior e, conseqüentemente, há uma maior produção de água e menor consumo de energia elétrica.

Dessa forma, essa tecnologia que utiliza módulos termoelétricos podem ser uma boa alternativa para geração de água em regiões que sofram com problemas de escassez de água. Porém, estudos devem continuar sendo desenvolvidos para aumentar a eficiência destas módulos termoelétricos para produção de água.

## **6.6 Referências bibliográficas**

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Quantidade de água**. Disponível em:

<<http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/aguas-no-brasil/panorama-das-aguas/quantidade-da-agua>>. Acesso em: 14 set. 2018.

ARDUINO. ARDUINO MEGA 2560. Disponível em: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-mega-2560-rev3>. Acesso em: 14 nov. 2018.

AOSONG. **Temperature and humidity module - AM2302 product manual**. Disponível em: <[http://img.filipeflop.com/files/download/Datasheet\\_DHT22\\_AM2302.pdf](http://img.filipeflop.com/files/download/Datasheet_DHT22_AM2302.pdf)>. Acesso em: 19 mar. 2018.

CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais. **Valores de tarifas e serviços**. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Paginas/valores-de-tarifa-e-servicos.aspx>. Acesso em: 29 out. 2018.

FLIR SYSTEMS. **User's manual FLIR Exx Series**. 2010.

HB ELECTRONIC. **Thermoelectric Cooler - TEC1-12706**. Disponível em: <[https://www.allelectronics.com/mas\\_assets/media/allelectronics2018/spec/PJT-13.pdf](https://www.allelectronics.com/mas_assets/media/allelectronics2018/spec/PJT-13.pdf)>. Acesso em: 25 set. 2018.

HENKER, E.; RODRIGUES, F.S.; COSTA, B. M.; KEARCHER, J.; MACHADO, E. L. Água potável com desumidificação do ar e energia solar: adaptação ao stress hídrico no RS. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 19, n. 3, p. 345–352, 2014, [doi:10.1590/S1413-41522014019000000741](https://doi.org/10.1590/S1413-41522014019000000741).

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Projeção da população do Brasil e das Unidades da Federação. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/>>. Acesso em : 05 dez. 2018

INSTRUTHERM. **Manual de instruções Termo anemômetro digital TAFR-200**. 2016.

JOSHI, V. P.; JOSHI, V.S.; KOTHARI, H.A.; MAHAJAN, M. D.; CHAUDHARI, M. B.; SANT, K. D. Experimental Investigations on a Portable Fresh Water Generator Using a Thermoelectric Cooler. **Energy Procedia**, v. 109, n. November 2016, p. 161–166, 2017, [doi:10.1016/j.egypro.2017.03.085](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.085).

JRADI, M.; GHADDAR, N.; GHALI, K. Experimental and theoretical study of an integrated thermoelectric–photovoltaic system for air dehumidification. **International journal of energy research**, n. 2011, p. 135–147, 2011, [doi:10.1002/er.1848](https://doi.org/10.1002/er.1848).

KLEIN TOOLS. **Emissivity Chart**. Disponível em: <<https://www.kleintools.com/sites/kleintools/files/instructions/Emissivity-Chart-139697ART.pdf>>. Acesso em: 26 set. 2018.

MARTÍN-GARÍN, A.; MARTÍN-GARÍN, J.A.; BAIRI, A.; MILLÁN-MEDEL, J.; SALALIZARRAGA, J. M. Environmental monitoring system based on an open source platform and the internet of things for a building energy retrofit. **Automation in Construction**, v. 87, n. March 2017, p. 201–214, 2018, [doi:10.1016/j.autcon.2017.12.017](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.017).

MING, T.; GONG, T.; RICHTER, R.K.; WU, Y.; LIU, W. A moist air condensing device for sustainable energy production and water generation. **Energy Conversion and Management**, v. 138, p, 638–650, 2017, [doi: 10.1016/j.enconman.2017.02.012](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.012).

MUÑOZ-GARCÍA, M. A.; MOREDA, G. P.; RAGA- ARROYO, M. P.; MARÍN-GONZÁLEZ, O. Water harvesting for young trees using Peltier modules powered by photovoltaic solar energy. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 93, p. 60–67 , 2013, [doi: 10.1016/j.compag.2013.01.014](https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.01.014).

NANDY, A.; SAHA, S.; GANGULY, S.; CHATTOPADHYAY, S. A Project on Atmospheric Water Generator with the Concept of Peltier Effect. **International Journal of Advanced Computer Research**, v. 4, n. 15, p. 481 , 2014.

OLIVEIRA, M. C. C. **Desenvolvimento e análise técnica e econômica de um condensador de vapor atmosférico utilizando tecnologias termelétrica e solar fotovoltaica**. Dissertação de Mestrado no curso de Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Itajubá. Itajubá. 2013.

OMEGA. **Table of Total Emissivity**. Disponível em: <<https://www.omega.com/temperature/z/pdf/z088-089.pdf>>. Acesso em: 26 set. 2018.

PICCOLI, A. S.; KLIGERMAN, D. C.; COHEN, S. C.; ASSUMPCAO, R.F. A Educação Ambiental como estratégia de mobilização social para o enfrentamento da escassez de água. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 21, n. 3, p. 797–808, 2016, [doi:10.1590/1413-81232015213.26852015](https://doi.org/10.1590/1413-81232015213.26852015).

THERMONAMIC. **Specification of Thermoelectric Module TEC1-12706**. Disponível em: <<http://www.thermonamic.com/tec1-12706-english.pdf>>. Acesso em: 25 set. 2018.

VIÁN, J. G.; ASTRAIN, D.; DOMÍNGUEZ, M. Numerical modelling and a design of a thermoelectric dehumidifier. **Applied Thermal Engineering** v. 22, n. 4, p. 407–422, 2002, [doi:10.1016/S1359-4311\(01\)00102-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(01)00102-8).

WILHELM, L. R. Numerical calculation of psychrometric properties in SI units. **Transactions of the ASAE**, p, 318–325, 1976

## Capítulo 7: Conclusão Geral

Por meio do desenvolvimento dos capítulos dessa dissertação e dos resultados obtidos, foi possível concluir que o vapor de água condensado, embora em uma pequena quantidade de água quando comparado com outras fontes não convencionais, como a água de chuva, tem potencial para complementar os recursos hídricos. Dessa forma, a água presente na atmosfera pode se tornar importante tanto para consumo humano quanto para a irrigação. Além disso, a condensação de vapor de água atmosférico é uma fonte limpa de água e que ocorre em escala global, podendo assim, ser utilizada tanto para consumo humano quanto para irrigação, que representa a maior demanda de água.

Diferentes métodos para a extração de água presente na atmosfera vem sendo utilizados e pesquisados em diversos lugares do mundo. A tecnologia do resfriamento radiativo passivo vem se destacando, uma vez que é um método que não utiliza energia elétrica e é de fácil instalação e manutenção. Por outro lado, pesquisas vem sendo realizados para aumentar a extração de água usando os módulos termoelétricos e minimizar o consumo de energia elétrica gasta para essa tecnologia.

Apesar da cidade de Viçosa não apresentar grandes períodos de seca, há períodos com baixos índices pluviométricos. Assim, a água coletada da atmosfera poderá ser uma fonte suplementar de água, uma vez que Viçosa, MG, apresenta períodos noturnos bem úmidos, o que favorece a captação de água de vapor atmosférico, afirmando assim o seu potencial.

Em escala nacional, a região Norte do país, especificamente o estado do Amapá, apresenta melhores condições para extração de água da atmosfera, uma vez que possui maior quantidade de água no ar, maior rendimento de orvalho, menor resfriamento do ar para que haja a condensação e menor fluxo de calor para condensação do vapor de água. Assim o mapeamento do potencial de produção de orvalho para o Brasil mostra a distribuição espacial deste recurso natural ainda pouquíssimamente explorado.

Para métodos de extração de água da atmosfera que utilizam energia elétrica, como os módulos termoelétricos, o uso de energia fotovoltaica para a alimentação

do sistema se torna uma importante alternativa. Dessa forma, o sistema para a extração de água se torna sustentável do ponto de vista energético e ainda gera água potável.

No Brasil, a pesquisa para exploração desta fonte não convencional de água ainda está em fase inicial. Assim, estudos e incentivos são necessários no país para que a extração de água da atmosfera se torne viável, tanto do ponto de vista técnico com o aumento do rendimento de extração de água da atmosfera quanto do ponto de vista econômico. Portanto, essa pesquisa se torna extremamente importante para avaliar o potencial de captação de água da atmosfera e incentivar o estudo dessa fonte não convencional de água, uma vez que a análise de potencial de captação de água da atmosfera em escala nacional, assim como experimentos por meio do resfriamento radiativo passivo ainda não haviam sido realizados no Brasil.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A – Registro do Software *PsyCalculator*



REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL  
Ministério Da Indústria, Comércio Exterior e Serviços  
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

Diretoria de Patentes, Programas de Computador e Topografias de Circuitos Integrados

#### Certificado de Registro de Programas de Computador

##### Processo nº: BR 51 2018 001063-6

O Instituto Nacional da Propriedade Industrial expede o presente certificado de Registro de Programas de Computador, válido por 50 anos a partir de 1º de janeiro subsequente à data de Criação: 01 de abril de 2018, em conformidade com o parágrafo 2º, artigo 2º da Lei Nº 9.609, de 19 de Fevereiro de 1998.

Título: **PsyCalculator**

Data de Criação: 01 de abril de 2018

Titular(es): UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

Autor(es): ARTHUR CAIO VARGAS E PINTO  
/ DELLY OLIVEIRA FILHO  
/ LARISSA CAROLINA CORRAIDE DA SILVA  
/ MATHEUS LIMA DINIZ ARAÚJO

Linguagem: C#

Campo de Aplicação: AG-02, ME-01

Tipo Programa: AT-01, IT-01, TI-03

Algoritmo Hash: SHA-512

Resumo Digital: 9e824fdc97ec06f622a153bbeae63779073c09bf47783d5bd5431460462e86cf992a84f7ba597c  
51745b647faf4bc30364ac1c481e17c73b93db095fd2f89428

Expedido em: 10 de julho de 2018

Aprovado por Liane Elizabeth Caldeira Lage

