



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica  
Unidad Profesional “Adolfo López Mateos”  
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

---

---

Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica

**ESTRUCTURA BIOINSPIRADA PARA INTENSIFICAR LA CONDENSACIÓN  
DE LA HUMEDAD DEL AMBIENTE**

Presenta:

Salvador Andrade González

Para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecánica

Directores de Tesis:

Dr. Ignacio Carvajal Mariscal  
M. en C. Guilibaldo Tolentino Eslava



Ciudad de México, 1 de Noviembre de 2022



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

## SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

SIP-14  
REP 2017

### ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México siendo las 16:00 horas del día 18 del mes de Noviembre del 2022 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Posgrado de SEPI ESIME Zacatenco para examinar la tesis titulada:

ESTRUCTURA BIOINSPIRADA PARA INTENSIFICAR LA CONDENSACIÓN DE LA HUMEDAD DEL AMBIENTE

del alumno:

<b>Apellido Paterno:</b>	Andrade	<b>Apellido Materno:</b>	González	<b>Nombre (s):</b>	Salvador
--------------------------	---------	--------------------------	----------	--------------------	----------

Número de registro: B 2 0 1 1 2 3

Aspirante del Programa Académico de Posgrado: Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica

Una vez que se realizó un análisis de similitud de texto, utilizando el software antiplagio, se encontró que el trabajo de tesis tiene 13% de similitud. **Se adjunta reporte de software utilizado.**

Después que esta Comisión revisó exhaustivamente el contenido, estructura, intención y ubicación de los textos de la tesis identificados como coincidentes con otros documentos, concluyó que en el presente trabajo SI  **NO**  **SE CONSTITUYE UN POSIBLE PLAGIO.**

**JUSTIFICACIÓN DE LA CONCLUSIÓN:** El porcentaje de similitud, el cual es de 13%, es debido a palabras técnicas usadas en la mayoría de las publicaciones que tratan el tema. Además, no constituyen partes importantes tales como objetivos, metodologías, resultados o conclusiones de la tesis. Adicionalmente, las similitudes no sobrepasan el 1% de coincidencia con algún otro trabajo.

**\*\*Es responsabilidad del alumno como autor de la tesis la verificación antiplagio, y del Director o Directores de tesis el análisis del % de similitud para establecer el riesgo o la existencia de un posible plagio.**

Finalmente, y posterior a la lectura, revisión individual, así como el análisis e intercambio de opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR**  **SUSPENDER**  **NO APROBAR**  la tesis por **UNANIMIDAD**  o **MAYORÍA**  en virtud de los motivos siguientes:

Cumple los objetivos planteados y satisface el formato. Se aprueba por unanimidad.

#### COMISIÓN REVISORA DE TESIS

\_\_\_\_\_  
Director de Tesis  
Dr. Ignacio Carvajal Mariscal

\_\_\_\_\_  
Presidente  
Dr. Florencio Sánchez Silva

\_\_\_\_\_  
Secretario  
Dr. José Alfredo Jiménez

SECCION DE ESTUDIOS DE  
PRESIDENTE DEL POSGRADO DE INVESTIGACIÓN  
PROFESORES ZACATENCO

\_\_\_\_\_  
Director de Tesis  
M. en C. Guilibaldo Tolentino Ealeva

\_\_\_\_\_  
Tercer Vocal  
Dr. Jorge Ernesto De León Ruiz



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

## SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

### CARTA DE AUTORIZACIÓN DE USO DE OBRA PARA DIFUSIÓN

En la Ciudad de México el día 14 del mes de Noviembre del año, el (la) que suscribe Salvador Andrade González alumno(a) del programa Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica con número de registro B201123, adscrito(a) a SEPI ESIME Zacatenco manifiesta que es autor(a) intelectual del presente trabajo de tesis bajo la dirección de Dr. Ignacio Carvajal Mariscal y M. en C. Guilibaldo Tolentino Eslava y cede los derechos del trabajo intitulado ESTRUCTURA BIOINSPIRADA PARA INTENSIFICAR LA CONDENSACIÓN DE LA HUMEDAD DEL AMBIENTE, al Instituto Politécnico Nacional, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expresado del autor y/o director(es). Este puede ser obtenido escribiendo a las siguiente(s) dirección(es) de correo. salvador.andr.gon@gmail.com, icarvajal@ipn.mx y tolentino@ipn.mx. Si el permiso se otorga, al usuario deberá dar agradecimiento correspondiente y citar la fuente de este.

Salvador Andrade González

Dr. Ignacio Carvajal Mariscal

M. en C. Guilibaldo Tolentino  
Eslava



# Índice general

<b>Resumen .....</b>	<b>VI</b>
<b>Agradecimientos.....</b>	<b>VIII</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 1 .....</b>	<b>3</b>
<b>Antecedentes .....</b>	<b>3</b>
1.1    Escasez de agua a nivel mundial .....	4
1.1.1    Escasez de agua en México .....	4
1.2    Recolección de agua .....	6
1.2.1    Recolección de agua de la niebla .....	8
1.3    Métodos y tecnologías para la captación de agua a partir de la humedad en el ambiente.....	8
1.4    Humedad.....	12
1.4.1    Humedad relativa.....	13
1.5    Punto de rocío.....	13
1.6    Vapor Saturado .....	13
1.7    Nucleación de una gota de agua.....	13
1.7.1    Nucleación Homogénea .....	14
1.7.2    Nucleación Heterogénea.....	14
1.8    Humectabilidad.....	14
1.9    Fuerzas adhesivas y cohesivas .....	14
1.9.1    Fuerzas cohesivas.....	14
1.9.2    Fuerzas adhesivas .....	15
1.10    Tensión superficial e Interfacial .....	15
1.10.1    Tensión superficial .....	15
1.10.2    Tensión Interfacial.....	15
1.11    Angulo de contacto .....	15
1.12    Materiales hidrofóbicos e hidrofílicos .....	16
1.13    Presión de Laplace .....	17
<b>Capítulo 2 .....</b>	<b>18</b>
<b>Superficie bioinspirada.....</b>	<b>18</b>
2.1    Biomímesis.....	19
2.2    Ejemplos de estructuras en la naturaleza que permiten la recolección de agua .....	20

2.3	Características de la superficie y de las espinas de los cactus.....	22
2.4	Estado del arte .....	24
2.5	Diseño de la superficie bioinspirada .....	26
2.5.1	Diseño de la superficie de la base.....	27
2.5.2	Diseño de la superficie de las espinas.....	29
<b>Capítulo 3 .....</b>		<b>32</b>
<b>Instalación experimental.....</b>		<b>32</b>
3.1	Instalación experimental.....	33
3.2	Selección de equipo y materiales .....	34
3.2.1	Humidificador.....	34
3.2.2	Tripié/atril .....	34
3.2.3	Acrílico.....	34
3.2.4	Manguera y empaques .....	35
3.3	Montaje del sistema de recolección de agua .....	35
3.4	Materiales Hidrofóbicos.....	36
3.4.1	Silicon Shine (Muc – Off).....	37
3.4.2	Miracle Shine (Muc – Off) .....	38
3.4.3	Fabric Protect.....	38
3.5	Manufactura aditiva de las espinas .....	38
3.6	Impresión de la base .....	40
3.7	Pruebas de los materiales hidrofóbicos.....	40
3.7.1	Prueba del comportamiento de las gotas de agua sobre la superficie de las espinas .....	42
3.8	Pruebas experimentales a la superficie propuesta.....	43
3.9	Observaciones a partir de los experimentos preliminares .....	48
3.10	Análisis de incertidumbre .....	51
<b>Capítulo 4 .....</b>		<b>53</b>
<b>Análisis de resultados .....</b>		<b>53</b>
4.1	Comportamiento de la humedad relativa.....	54
4.2	Efecto del ángulo de inclinación de la superficie.....	56
4.3	Comparación de los arreglos de espinas .....	57
<b>Conclusiones.....</b>		<b>61</b>
<b>Bibliografía .....</b>		<b>65</b>
<b>1</b>	<b>Anexo.....</b>	<b>70</b>

1.1	Tablas de recopilación de datos de ambos arreglos.....	70
1.1.1	Tablas de datos del arreglo escalonado fila – fila .....	70
1.1.2	Tablas de datos del arreglo escalonado intercalado .....	72
1.2	Graficas de comparación de humedad relativa de ambos arreglos .....	74
1.2.1	Graficas del arreglo escalonado fila – fila .....	74
1.2.2	Graficas del arreglo escalonado intercalado.....	76
1.3	Tablas y graficas de cálculo del coeficiente de efectividad de nucleación de ambos arreglos ..	78
1.3.1	Arreglo escalonado fila – fila .....	78
1.3.2	Arreglo escalonado intercalado .....	79
1.4	Tablas y gráficas de comparación de ambos arreglos. ....	80
1.5	Regresión lineal múltiple y correlaciones. ....	83

## Resumen

En el presente estudio se realizó el diseño de una superficie bioinspirada para incrementar la captación de humedad del ambiente, como una solución alterna a las ya existentes para mitigar la presente escasez de agua en la Ciudad de México y otras regiones del país.

Se eligió el cactus de la especie *Ferocactus Latispinus* y recurriendo a la biomímesis se diseñó una superficie que se compone de canales, ranuras y espinas, con material hidrofóbico en la base y la punta de las espinas. La base de la superficie bioinspirada y los dos tipos de espinas elegidos se fabricaron por manufactura aditiva. Para analizar la captación de gotas de agua, durante el fenómeno meteorológico conocido como neblina, se construyó una celda de visualización que cuenta con un humidificador para el suministro de aire húmedo y dos higrómetros para registrar las temperaturas de bulbo seco y la humedad relativa. Se realizaron pruebas a la superficie variando su ángulo de inclinación,  $0^\circ - 55^\circ$ , para dos tipos de distribución de las espinas sobre la base y un valor de humedad relativa entre 60 y 80%.

Se encontró que se logra una mayor captación de humedad y por ende una mayor recolección de gotas de agua cuando la superficie se encuentra en un ángulo de  $45^\circ$  a  $55^\circ$  respecto a la horizontal. Además, se determinó que la capa de material hidrofóbico en las puntas de las espinas favorece la nucleación de las microgotas de la niebla. Se observó que la distribución en la que se alternan filas de diferente tipo de espinas sobre la base es la que obtuvo el mayor coeficiente de recolección de gotas. Finalmente, se encontró que la captación de humedad dependerá en gran medida del porcentaje de la humedad relativa, siendo que mientras mayor sea este parámetro, más rápido ocurrirá la nucleación de gotas de agua.

**Palabras Clave** — agua, superficie bioinspirada, espina, superficie, recolección.

## Abstract

In the present study, a bioinspired surface was designed to increase the capture of humidity from the environment, as an alternative solution to the existing ones to mitigate the current water scarcity in Mexico City and other regions of the country.

The cactus of the species *Ferocactus Latispinus* was chosen and resorting to biomimicry, a surface was designed that consists of dados, grooves and thorns., with hydrophobic material at the base and tip of the spines. The base of the bioinspired surface and the two types of spines chosen were manufactured by additive manufacturing. To analyze the capture of water droplets, during the meteorological phenomenon known as haze, a display cell was built that has a humidifier for the supply of humid air and two hygrometers to record dry bulb and relative humidity temperatures. Surface tests were carried out by varying its angle of inclination,  $0^{\circ}$  -  $55^{\circ}$ , for two types of distribution of the spines on the base and one value of relative humidity between 60 and 80%.

It was found that a greater capture of moisture is achieved and therefore a greater collection of water droplets when the surface is at an angle of  $45^{\circ}$  to  $55^{\circ}$  with respect to the horizontal. In addition, it was determined that the layer of hydrophobic material at the tips of the spines favors the nucleation of microdroplets of the fog. It was observed that the distribution in which rows of different types of spines alternate on the basis is the one that obtained the highest droplet collection coefficient. Finally, it was found that moisture capture will depend largely on the percentage of relative humidity, and the higher this parameter, the faster the nucleation of water droplets will occur.

**Keywords** — water, bioinspired, spine, surface, collection.

## **Agradecimientos**

Al Instituto Politécnico Nacional, por haberme permitido y apoyado a recibir la formación de un postgrado, a manera poder complementar mi formación profesional y seguir aspirando a un mejor desarrollo de esta. Es un logro y un orgullo pertenecer a una institución tan grande y reconocida a nivel mundial.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo y patrocinio para la realización de este proyecto de tesis.

A la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica unidad profesional Zacatenco, por haberme otorgado un lugar en sus instalaciones y formar parte de su comunidad, así como convivir con sus docentes, quienes fueron participes en el proceso de mi formación de postgrado de manera directa e indirecta, y quienes realizaron un aporte, que el día de hoy se ve reflejado en la culminación de este proyecto.

Al Doctor Ignacio Carvajal Mariscal, por haberme recibido como uno de sus alumnos, por haberme orientado con sus conocimientos en los momentos de incertidumbre en la realización de esta tesis, por ayudarme a poder llevarla a cabo de la mejor manera posible en el tiempo dado.

A mis compañeros de posgrado, por haberme apoyado y brindado su mano a la hora de realizar las pruebas y ensayos de este proyecto, ya que sin ellos este proyecto no hubiera sido posible de realizar.

A mis familiares y amigos por todas sus enseñanzas, sugerencias y apoyo cuando más abatido me sentía, inculcándome la alegría de compartir nuestros proyectos, viendo los grandes logros y tropiezos de una forma amena.

A mis padres, quienes sin escatimar esfuerzo alguno han sacrificado gran parte de su vida para darme una formación y educación adecuada, quienes su mayor ilusión es verme convertido

en una persona de provecho, a ellos quienes me enseñaron que debo aspirar a buenos pensamientos, palabras y obras. A ellos que son mis seres más queridos, sinceramente, gracias.

## **Introducción**

El acceso a un suministro seguro de agua es un derecho humano. Sin embargo, con el aumento de la población, el calentamiento global y la contaminación debido a la actividad humana, es uno que está cada vez más amenazado. En la actualidad, se tiene contemplado que para 2030, entre 30 y 40 países sufrirán de un estrés hídrico irreversible, por lo que carecerán de agua potable. México es uno de los países que se encuentra contemplado en aquella lista, esto debido a los problemas que presenta a nivel nacional y que están relacionados con el abastecimiento de agua potable. En la Ciudad de México se han lanzado diferentes campañas a través de los años para combatir este problema, sugiriendo diferentes métodos para la solución a la escasez de agua, sin embargo, no se ha logrado que el abastecimiento público logre una cobertura total de la ciudad.

El objetivo de este tema de tesis es el diseño de una superficie bioinspirada mediante el método de biomímesis para incrementar la captación de humedad del ambiente, esta propuesta de bajo impacto ambiental servirá como una solución alterna a las ya existentes.

Esto se justifica ya que mediante el uso de la biomímesis es posible desarrollar diversos tipos de soluciones a la problemática actual del agua. En la naturaleza, muchas especies presentan soluciones eficientes para garantizar su seguridad hídrica, las cuales pueden inspirarnos para la resolución de la problemática actual por medio de la creación de materiales que ayuden en la purificación, suministro y gestión del agua potable.

En el Capítulo 1 se abordan los antecedentes que se tienen sobre la problemática actual de la escasez de agua potable, la recolección de agua y conceptos de los fenómenos físicos que ocurren para dar paso a ello.

En el Capítulo 2 se muestra cómo se llevó a cabo el diseño de la superficie bioinspirada, con base en las características destacadas en investigaciones previamente realizadas.

En el Capítulo 3 se describen los materiales utilizados para llevar a cabo la experimentación, además de la elaboración de las piezas que conforman la superficie bioinspirada.

Finalmente, en el Capítulo 4 se presentan los experimentos realizados y el análisis de los resultados obtenidos por medio de ellos.

# Capítulo 1

## Antecedentes

## **1.1 Escasez de agua a nivel mundial**

La gran mayoría del agua está contenida en los océanos, y el agua dulce representa solo el 2.5% de toda el agua en el planeta. Del 2.5% de agua dulce, la mayoría está atrapada en forma de glaciares y nieve (1.74% en total), mientras que solo el 0.79% de toda el agua se encuentra en lagos, ríos y como agua subterránea. (Agua.org, s.f.)

A través de nuevos modelos hidrológicos desarrollados por el WRI (World Resources Institute) se demostró que el consumo de agua a nivel mundial se ha incrementado de manera alarmante desde 1960 debido a la creciente demanda, y no muestra signos de desaceleración. Los datos revelan que cuarenta y cuatro países enfrentan niveles altos de estrés hídrico. Para una mejor visualización de los datos, dirigirse a la página de [“17 Countries, Home to One-Quarter of the World's Population, Face Extremely High-Water Stress](#) por Rutger, Paul y Leah”.

Se espera que el consumo mundial de agua alcance los 6 billones de metros cúbicos al año para el año 2030 a medida que la población avanza hacia los 8.200 millones proyectados. (Rutger Willem Hofste, 2019)

### ***1.1.1 Escasez de agua en México***

México es una de las primeras naciones que sufrirá por falta de agua; no solo el cambio climático influirá en esta problemática, también la contaminación y la falta de infraestructura para utilizar este recurso con eficiencia. De acuerdo con estimaciones de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) más de la mitad de agua que se consume en el país se pierde por evaporación, pero, sobre todo, por infraestructura ineficiente, en mal estado u obsoleta. (Consejo Consultivo del agua, 2019)

A nivel nacional, en 2019 el mayor porcentaje de área con sequía de moderada a excepcional (D1-D4) se registró al 15 de agosto y fue de 31.4 %, mientras que el menor porcentaje

de estas categorías de sequía se observó a inicios del año con 6.5 % (CONAGUA, 2019). Para una mejor visualización de los datos y de la Figura 1, dirigirse al artículo de “[Reporte del Clima en México, Reporte anual 2019](#), por el Servicio Meteorológico Nacional, CONAGUA”



**Figura 1** Monitoreo de sequía en México de enero a diciembre de 2019.

### 1.1.1.1 Escasez de agua en la Ciudad de México

El gobierno de la Ciudad de México ha reconocido que se tiene un problema de escasez de agua, y a través de los años se han elaborado diversos planes para abordar el problema. Algunos de estos son el Programa de Acción Climática (2014) y el Plan Verde (2011), que enfatizan la necesidad de proteger los acuíferos. Además, la SEDEMA elaboró la campaña informativa llamada “Cuidar el agua es cosa de todos”, que ilustra de dónde proviene el agua de la ciudad, por qué el suministro es insuficiente y cómo las personas pueden reducir su consumo.

De acuerdo con la SEDEMA, se pueden identificar cinco tipos de escasez de agua: física, económica, gerencial, institucional y política. La escasez de agua de la Ciudad de México se puede caracterizar como física, gerencial o institucional. (Gutierrez, Noviembre 2019).

- La escasez física es un tipo absoluto de escasez, donde las fuentes de agua están limitadas por la naturaleza.

- La escasez gerencial ocurre cuando los sistemas de agua no se mantienen o administran adecuadamente.
- La escasez institucional significa el fracaso de la sociedad para hacer frente a los crecientes desequilibrios entre la oferta y la demanda y para preservar el medio ambiente.

En la Tabla 1 se pueden observar ya clasificados los tipos de escasez de agua y los motivos de ello. Obtenido de: “[Water Scarcity and Supply Challenges in Mexico City's Informal Settlements](#), por Jennifer Gutiérrez, PENN”.

**Tabla 1** Razones de la escasez de agua, clasificadas según la tipología de escasez de Molle y Mollinga.

<b>Física</b>	<b>Gerencial</b>	<b>Institucional</b>
Patrones de lluvia cambiantes	30-45% de agua potable perdida por fugas	Población creciente = Demanda creciente
Niveles bajos del acuífero	La extracción supera la recarga natural del acuífero	Por cada hectárea urbanizada, la recarga reduce unos 2,5 millones de litros al año
	No aprovechar el agua de lluvia	Uso irresponsable y derrochador
	Contaminación	

## 1.2 Recolección de agua

La recolección de agua suele referirse a la recolección del agua de lluvia para un uso determinado de acuerdo con las necesidades que se presenten. Este agua puede utilizarse inmediatamente, o almacenarse en estanques sobre el suelo o en depósitos subterráneos para su uso posterior. La recolección de agua es una práctica que data desde hace 4000 años A. C., y que ha permitido a sociedades, que habitaron y siguen habitando, subsistir en áreas áridas donde las fuentes de agua dulce son escasas o no están disponibles.

Con el pasar de los siglos, las diferentes civilizaciones a través de la historia y alrededor del mundo desarrollaron diferentes métodos para la recolección de escorrentía, como los que son mencionados a continuación y algunos de ellos pueden observarse en la Figura 2:

- Estructuras de tierra.
- Cisternas.
- Riego por escurrimiento.
- Presas.
- Qanats (canales artificiales de agua subterránea).
- Pozos de ladrillo.
- Tanques de almacenamiento.



**Figura 2** *Métodos de recolección de escorrentía.*

En la figura se pueden observar los siguientes métodos: A) y C) Cisterna, B) Estructuras de tierra, D) Riego por escurrimiento, E) Presas, F) Qanats. Elaboración propia.

Todos estos métodos siguen usándose actualmente, pero con la implementación de tecnologías innovadoras que ayudan a facilitar la captación y el redireccionamiento del agua de lluvia.

Por otro lado, mientras ciertas civilizaciones se enfocaban a este tipo de recolección de agua, otras observaron que se podía recolectar agua a partir de la humedad en el ambiente, siendo esto posible mediante la captación de gotas de agua, que se presentaban sobre ciertas superficies cuando había neblina.

### ***1.2.1 Recolección de agua de la niebla***

Este método se basa en que el agua se puede recolectar de las nieblas en condiciones climáticas favorables. Diminutas gotas de agua presentes en la niebla se precipitan cuando entran en contacto con objetos. La recolección de agua de la niebla es útil cuando otras fuentes de agua son escasas y generalmente se limita a regiones áridas y semiáridas remotas con climas tropicales o subtropicales.

Este método fue la base para que se desarrollaran diferentes metodologías para aumentar su eficiencia y nuevas tecnologías para captar agua a partir de la humedad en el ambiente.

## **1.3 Métodos y tecnologías para la captación de agua a partir de la humedad en el ambiente**

El método de recolección de agua a partir de la humedad en el ambiente es un método que se lleva utilizando desde hace ya más de 2 mil años, y fue hasta mediados del siglo XVI que se tuvo un mayor conocimiento de este; y hasta el siglo XX que se empezó a investigar sobre cómo mejorar la eficiencia del método y hacer uso de diferentes tecnologías. En la Figura 3 se ilustra los inventos citados a continuación.

Los atrapanieblas son grandes redes hechas de una malla de polipropileno que se cuelga entre dos postes para que, al pasar niebla o masas nubosas por ellas, atrapen gotas de agua en las mallas que las componen. La falta de agua superficial, subterránea y la carencia de lluvias, en

diversos sitios habitables de nuestro planeta, ha llevado a la fabricación de estos sistemas para disponer de agua para el consumo humano y diversas actividades como la agricultura y la pecuaria. Su uso está mayormente documentado desde el Siglo XVI, época en que fueron usados en la Cuenca de México y en el desierto de Atacama en Chile. El rendimiento del sistema depende de muchas variables, principalmente están las ambientales y el diseño del atrapanieblas. La humedad del aire, el punto de rocío, la velocidad y dirección del viento, entre otros, son factores para un óptimo funcionamiento de los atrapa nieblas. (Garciglia, 2014)

En 1900, Friedrich Zibold, un ingeniero ruso, descubrió 13 grandes montones de piedras de forma cónica. Concluyó que aquello debían ser condensadores que producían agua a partir del aire, un agua que luego se transportaba a la ciudad por medio de las tuberías. De acuerdo con sus cálculos, cada uno de los condensadores produciría unos 55.400 litros de agua diarios. Para demostrar su hipótesis construyó su propio condensador, siguiendo el modelo de los descubiertos. Su condensador tenía 6 metros de altura y un diámetro de 8 metros en su parte superior. Estaba rodeado de un muro de 1 metro de altura y 20 metros de ancho que creaba un área en forma de cuenco donde se recogería el agua. Para construirlo utilizó piedras extraídas de la costa. Cada día producía 360 litros de agua. Estudios posteriores demostraron que de no haberse empleado para su construcción piedras (guijarros de playa) con una forma tal que permitían un contacto termal mínimo, creando miles de pequeños espacios que el aire caliente podía atravesar, el condensador jamás habría funcionado. Zibold consideró que su teoría quedaba confirmada y constituyó la base para los posteriores desarrollos de “pozos de aire”, como el famoso condensador de Achille Knapen construido en Trans-en-Provence, Francia, y por extensión de toda la tecnología posterior al respecto. (Carvajal, 2016)

En 2004, se fundó la compañía Aquaer Generator, quien diseñó una máquina que captura el agua presente en la atmósfera, por poca que sea, y provoca su condensación. El resultado son gotas de agua que caen en un lugar a casi 30°C y una humedad relativa del 17 %. Gracias a unos filtros que incorpora se puede potabilizar para después ser almacenada en un depósito lista para su consumo. El límite de trabajo del Aquaer Generator está en un 8% de humedad relativa y 45 grados de temperatura. Es capaz de producir de 15 – 5000 litros de agua potable al día (dependiendo del modelo a utilizar) incluso en las condiciones más extremas, en pleno desierto y su consumo eléctrico es equivalente al de una lavadora. (Aquaer Generator, 2016)

En 2008, Marc Parent, inventor y empresario francés fundó Eole Water S.A.S. (EoleWater), una empresa que desarrolla y comercializa sus invenciones. Entre ellas, un dispositivo que combina un molino de viento y un sistema de aire acondicionado (OMPI, 2015). Esta tecnología, en primer lugar, genera electricidad de la misma manera en que lo hace una turbina de viento. Esa energía le permite funcionar a todo el sistema que genera el agua. La turbina traslada el aire a un sistema de refrigeración formado por distintas bases en las que la humedad del aire se condensa y genera agua. Después, el agua fluye en un tanque de almacenamiento y es tratada mediante un sistema de cinco niveles de purificación que permite producir agua potable destinada a diversos fines. La máquina puede producir unos 1.000 litros diarios si la velocidad del viento es de 35 km/h y se registran niveles medios de humedad. La tecnología no requiere ningún otro insumo externo aparte del viento, no produce residuos y es completamente ecológica. (OMPI, 2015)

En 2010, The Dew Bank ganó el premio Bronce en los premios de diseño IDEA. La botella Dew Bank fue diseñada por Kitae Pak y se basa en el método de obtención de agua del escarabajo de Namib. La botella está hecha de acero inoxidable y cuando se deja afuera durante la noche, el

metal se enfría. A medida que el aire cercano aumenta de temperatura a medida que el nuevo día amanece, su humedad se condensa en la cúpula de la botella. Luego, el agua viaja hacia abajo hacia pequeños espacios que aseguran que solo el agua pase a través y hacia el área donde se almacena el agua. Este ejemplo de biomimetismo proporcionaría aproximadamente un vaso de agua por día. (Zoe L., s.f.)

En 2012, la empresa Watergen, desarrollo su primera máquina que condensa agua a partir de la humedad en el ambiente. El mecanismo patentado por la empresa trabaja con una tecnología que bautizaron GENius y que está diseñado a partir de delgadas láminas de plástico, apiladas para formar una doble corriente de aire alterna que fluye una en contra otra para generar un intercambiador de calor gradual. De acuerdo con la descripción, "el uso de plástico es único, permitiendo la refrigeración y el calentamiento gradual de las corrientes de aire, mientras que la condensación de agua se limita a un área pequeña predeterminada". El equipo además filtra el aire de una manera "única y robusta", cuenta con un tratamiento de purificación con ozono. El resultado es, en palabras de sus inventores, "un agua casi pura". (Raimon, Infobae, 2017)

En 2015, se fundó Warka Water Inc, después de haber desarrollado su primer prototipo para la condensación de agua, cuyo invento consiste en una estructura de juncos con la forma de un jarrón gigante de 10 metros. En su interior una red tupida de nylon o polipropileno forma una especie de segundo jarrón con la base acabada en pico. El agua se condensa cuando el aire reduce su temperatura y es canalizada usando la gravedad a un contenedor en la base de la torre. Está pensado para áreas en las que la población no tiene acceso a tecnología, materiales o fuentes de energía. (Queremos Verde, s.f.)

En 2017, Sunglacier desarrolló un sistema (DC-03) que utiliza el efecto Peltier para captar el agua del aire. En este caso el equipo es autónomo pues recurre a la energía solar para generar la

electricidad que necesita para funcionar. Una base solar genera 18w que alimentan una base Peltier, que a su vez enfría un cono de aluminio. El cono al enfriarse provoca una diferencia de temperatura con el aire y hace que el agua se condense en su superficie. Cuando se forman las gotas de agua éstas resbalan y caen a un recipiente. (Queremos Verde, s.f.)



**Figura 3** Dispositivos utilizados para la captación de agua a partir de la humedad del ambiente.

Dispositivos ilustrados en el orden mencionado respecto a su aparición en el tiempo como se menciona en el texto, de izquierda a derecha de manera descendente. Elaboración propia.

## 1.4 Humedad

La humedad es la cantidad de vapor de agua en el aire. Si hay mucho vapor de agua en el aire, la humedad será alta. (Society, 2011)

### **1.4.1 Humedad relativa**

La humedad relativa es la cantidad de vapor de agua real en el aire, expresada como un porcentaje de la cantidad máxima de vapor de agua que el aire puede contener a la misma temperatura.

### **1.5 Punto de rocío**

El punto de rocío es la temperatura en la que el aire está saturado de vapor de agua. Cuando el aire ha alcanzado la temperatura del punto de rocío a una presión particular, el vapor de agua en el aire está en equilibrio con el agua líquida, lo que significa que el vapor de agua se condensa a la misma velocidad a la que se evapora el agua líquida.

Por debajo del punto de rocío, el agua líquida comenzará a condensarse en superficies sólidas (como briznas de hierba) o alrededor de partículas sólidas en la atmósfera (como polvo o sal), formando nubes o niebla. (Lallanilla, 2014)

### **1.6 Vapor Saturado**

El vapor saturado, es el tipo de vapor que se produce cuando las fases líquida y gaseosa del agua existen simultáneamente a una temperatura y presión determinadas. Durante la condición de saturación, la velocidad a la que se vaporiza el agua es igual a la velocidad a la que se condensa. (Corrosionpedia, 2019)

### **1.7 Nucleación de una gota de agua**

Las gotas de agua tienen fuerzas de tensión superficial de modo que, para que pueda aumentar de tamaño por condensación, a partir de vapor, la tensión superficial tiene que ser contrarrestada por un fuerte gradiente de presión de vapor. La formación de gotas será estable y seguirán creciendo si su tamaño supera un valor crítico, mientras que las de tamaño inferior desaparecerán. El tamaño crítico, está determinado por el equilibrio entre la tendencia de

crecimiento y la de desaparición, y estas a su vez, dependen de que las gotas de agua se formen en un espacio libre o en contacto con otro cuerpo. (Renom, s.f.)

### ***1.7.1 Nucleación Homogénea***

La condensación de vapor de agua en la forma de gotas en un medio físico, debido a la existencia de una fuerte saturación se denomina Nucleación Homogénea.

### ***1.7.2 Nucleación Heterogénea***

El proceso en el cual las gotas de agua se forman sobre los núcleos de condensación (concentraciones de partículas, de tamaño microscópico, que tienen una gran afinidad con el agua), se designa como Nucleación Heterogénea.

## **1.8 Humectabilidad**

La humectabilidad o mojabilidad, es la preferencia de una superficie sólida a estar en contacto con un líquido en lugar de otro fluido que lo rodea (líquido o gas). Las fuerzas adhesivas y cohesivas entre el sólido y el líquido determinan la humectabilidad. (Laurén, What is wettability?, 2019)

## **1.9 Fuerzas adhesivas y cohesivas**

### ***1.9.1 Fuerzas cohesivas***

La cohesión es la atracción entre moléculas que se parecen entre sí. Las fuerzas cohesivas son fuerzas intermoleculares que hacen que el líquido resista la separación. Las fuerzas de cohesión entre moléculas en un líquido se comparten con todas las moléculas vecinas. Aquellas en la superficie no tienen moléculas vecinas arriba y, por lo tanto, exhiben fuerzas de atracción más fuertes sobre sus vecinas más cercanas dentro y debajo de la superficie. (Laurén, What is wettability?, 2019)

### **1.9.2 Fuerzas adhesivas**

La adhesión es la interacción entre moléculas diferentes. La fuerza de adhesión es causada por fuerzas que actúan entre dos sustratos, como fuerzas mecánicas y electrostáticas. Cuando se ponen en contacto dos líquidos inmiscibles, las fuerzas de adhesión juegan un papel. Las fuerzas de adhesión también son importantes cuando el líquido entra en contacto con el sólido. (Laurén, What is the difference between surface and interfacial tension?, 2018)

### **1.10 Tensión superficial e Interfacial**

La tensión superficial e interfacial se representan típicamente por la letra griega minúscula gamma,  $\gamma$  (sigma,  $\sigma$ , también se usa a veces) y representa la fuerza por unidad de longitud. Su unidad SI es milinewton por metro (mN/m). (Laurén, What is the difference between surface and interfacial tension?, 2018)

#### **1.10.1 Tensión superficial**

La tensión superficial es la propiedad de un líquido en contacto con un gas, en la superficie, que le permite resistir una fuerza externa, debido a la naturaleza cohesiva de las moléculas del líquido.

#### **1.10.2 Tensión Interfacial**

La tensión interfacial es la fuerza de atracción entre las moléculas en la interfaz de dos fluidos. Puede ser líquido-líquido, líquido-sólido o sólido-aire.

### **1.11 Angulo de contacto**

El ángulo de contacto es una medida de humectabilidad. El ángulo de contacto de  $90^\circ$  se considera un valor umbral. Cuando el ángulo de contacto es superior a  $90^\circ$ , la mojabilidad es mala, y cuando está por debajo de  $90^\circ$ , la mojabilidad es buena. Cuando los ángulos de contacto son

inferiores a  $5^\circ$ , la superficie se considera típicamente completamente humedecida, (Laurén, What is wettability?, 2019).

En la Figura 4 se muestra el equilibrio de las tres tensiones interfaciales, donde  $\sigma^{\text{Sólido}}$ ,  $\sigma^{\text{Líquido}}$ ,  $\sigma^{\text{Sólido-Líquido}}$  y  $\theta$  son la energía libre superficial de la fase sólida, la tensión superficial de la fase líquida, la energía libre interfacial entre las fases sólida y líquida y el ángulo de contacto, respectivamente. Adaptado de: “[Interfacial Free Energy and Wettability](#), ScienceDirect, 2014, por Toshihiro Tanaka”.

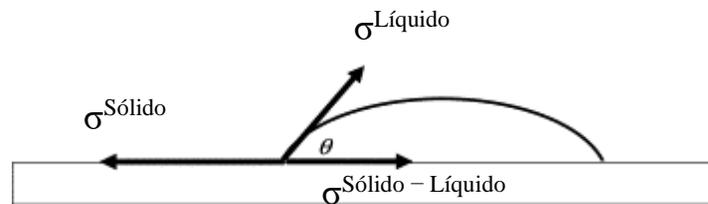


Figura 4 Ángulo de contacto

### 1.12 Materiales hidrofóbicos e hidrofílicos

- Hidrofílico: Los materiales con una afinidad especial por el agua, aquellos por los que se propaga, maximizando el contacto, se conocen como hidrófilos.
- Hidrofóbico: Los materiales que repelen el agua de forma natural, provocando la formación de gotitas, se conocen como hidrofóbicos.

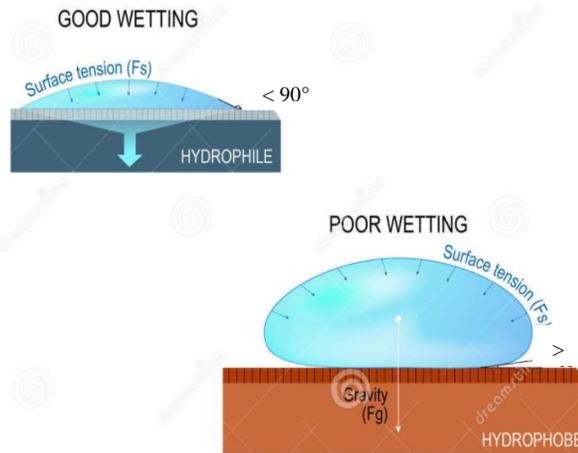
En la Figura 5 se pueden ver ilustradas las anteriores definiciones. Adaptado de: “[Superficie hidrofílica e hidrofóbica](#), Dreamstime”. Si la gota se esparce y humedece una gran área de la superficie, entonces el ángulo de contacto es inferior a 90 grados y esa superficie se considera hidrófila o amante del agua. Pero si la gota forma una esfera que apenas toca la superficie, el ángulo de contacto es de más de 90 grados y la superficie es hidrófoba o teme al agua. Las superficies donde las gotas apretadas forman un ángulo de contacto de más de 160 grados se

consideran superhidrófobas. Si las gotitas se extienden casi planas, con un ángulo de contacto de aproximadamente 20 grados, la superficie es superhidrófila.

Estos fenómenos ocurren esencialmente por una cuestión de química de la superficie, que está determinada por las características de los materiales utilizados. La forma de una superficie también puede amplificar los efectos (Chandler, 2013).

### 1.13 Presión de Laplace

La diferencia de presión entre el interior y el exterior de una gota se denomina presión de Laplace. Este efecto se produce debido a la tensión superficial en la interfaz entre el líquido a granel y el líquido en gotas. Existe una relación proporcional entre la presión de Laplace y el tamaño de las gotas de forma reversible. Por lo tanto, las gotas que tienen un tamaño pequeño tendrán temperaturas de ebullición más altas que las más grandes.



**Figura 5** *Materiales hidrofóbicos e hidrofílicos*  
Comportamiento del agua en superficies hidrofóbicas e hidrofílicas.

# Capítulo 2

## Superficie bioinspirada

## 2.1 Biomímesis

La biomímesis, biomimética o biomimetismo es la ciencia que se basa en estudiar e imitar la naturaleza (sus diseños, organización y procesos naturales) para diseñar soluciones a problemas que surjan, a partir de la imitación de estrategias probadas y optimizadas durante miles de millones de años por la naturaleza. (Simbiotia, s.f.)

En la Figura 6 se muestra un ejemplo de aplicación de biomímesis para la construcción de un casco de ciclismo de ruta. Adaptado de: “[Exposición Biomímesis](#), por EASDALCOI, 10/03/2016”.

Esta inspiración del entorno natural se puede basar en:

- Identificar una característica de algún ser vivo de la naturaleza que nos resulte de interés y a partir de ahí intentar generar un desarrollo tecnológico.

- A partir de un problema que tenemos, buscar ideas en el entorno natural que puedan solucionarlo. El campo de la biomimética requiere conocimientos en diversas disciplinas. (Bhushan, 2018)

Incluye:

1. Biología según se aplica al uso y examen de la naturaleza para biomiméticos,
2. Química según se relaciona con la comprensión de recubrimientos e interacciones para tratamientos superficiales derivados de la naturaleza viva.



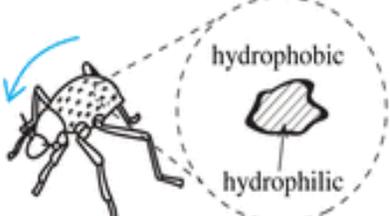
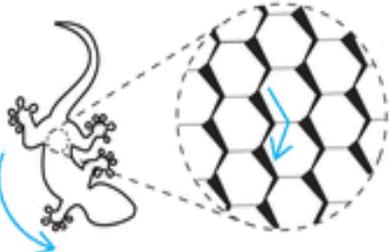
Figura 6 Aplicación de biomímesis

3. Ingeniería como se relaciona con la generación de dispositivos y aplicaciones para unir materiales y superficies derivados de la naturaleza viva
4. Ciencia de los materiales en lo que respecta a la generación de materiales nuevos y únicos inspirados en los que se encuentran en la naturaleza viva.
5. Nanofabricación en lo que respecta a nuevas técnicas y procesos de generación de superficies y materiales, arte y arquitectura en su relación con el campo de la biomimética en su conjunto.

## 2.2 Ejemplos de estructuras en la naturaleza que permiten la recolección de agua

Varias especies de animales, plantas e insectos han desarrollado estructuras superficiales y químicas que les permiten recolectar la humedad del ambiente. Estas especies presentan áreas donde las gotas formadas a partir de la humedad del ambiente pueden depositarse y crecer antes de ser finalmente transportadas hacia una zona designada o deseada.

**Tabla 2** Especies capaces de recolectar agua a partir de la humedad del ambiente

Especie	Mecanismo	Explicación
		<p>Las gotas de agua crecen en protuberancias hidrofílicas sin cera antes de ser transportadas hacia la boca por los alrededores cerosos hidrófobos.</p>
		<p>Una superficie hidrofílica soporta una fina película de agua y la acción capilar dirige el agua a través de canales asimétricos, favoreciendo el transporte hacia la boca</p>



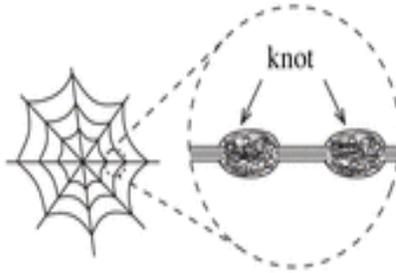
C. scutulatus (serpiente de cascabel Mojave)



Durante los aguaceros, al enrollarse, ponen sus bucles corporales en estrecho contacto entre sí, y el agua se retiene en los bajíos formados entre los bucles.



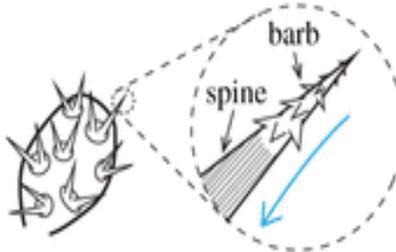
Araneae (telaraña)



Debido a la presión de Laplace y a los gradientes de energía superficial, las gotas de agua se mueven a lo largo de seda hidrofílica hacia nudos.



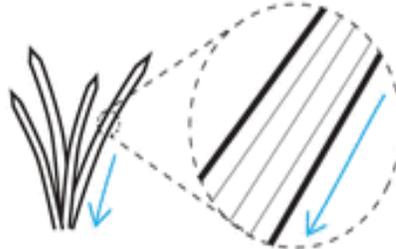
Ferocactus latispinus (cactus)



Las gotas de agua colectadas en las espinas y/o en las puntas de las púas, crecen y se mueven de estas hacia la base, donde son absorbidas, debido al gradiente de presión de Laplace.



Stipagrostis sabulicola (cactus)



Las gotas de agua son canalizadas por las hojas hidrofílicas hacia la base de la planta y eventualmente alcanzan las raíces.

En la Tabla 2 se pueden apreciar ejemplos de algunas especies de animales, insectos (y estructuras exteriores elaborados por ellos), y de plantas, junto con una ilustración del funcionamiento de sus estructuras y una breve explicación de esta. Adaptado de: "[Bioinspired materials and surfaces for green science and technology](#), The Royal Society Publishing site, por Bharat Bhushan".

Entre las estructuras presentadas, podemos considerar, para fines de este proyecto, que la estructura presentada por las espinas de los cactus es la que más conviene utilizar, debido al método que presenta para captar la humedad del ambiente.

### 2.3 Características de la superficie y de las espinas de los cactus

De acuerdo con investigaciones previas realizadas por la comunidad científica, las espinas que cubren la superficie de las distintas especies de cactus son fundamentales para su supervivencia. La mayoría de estas especies se encuentran en zonas secas, por lo que, para asegurar su supervivencia, deben almacenar suficiente agua, de tal forma que, se ha estimado que los cactus se componen entre un 90 – 94% de agua. Estos bancos de espinas actúan de manera parecida a mini paraguas, que brindan sombra al cactus. Al poder otorgar sombra, se evita que la planta pierda agua por evaporación.



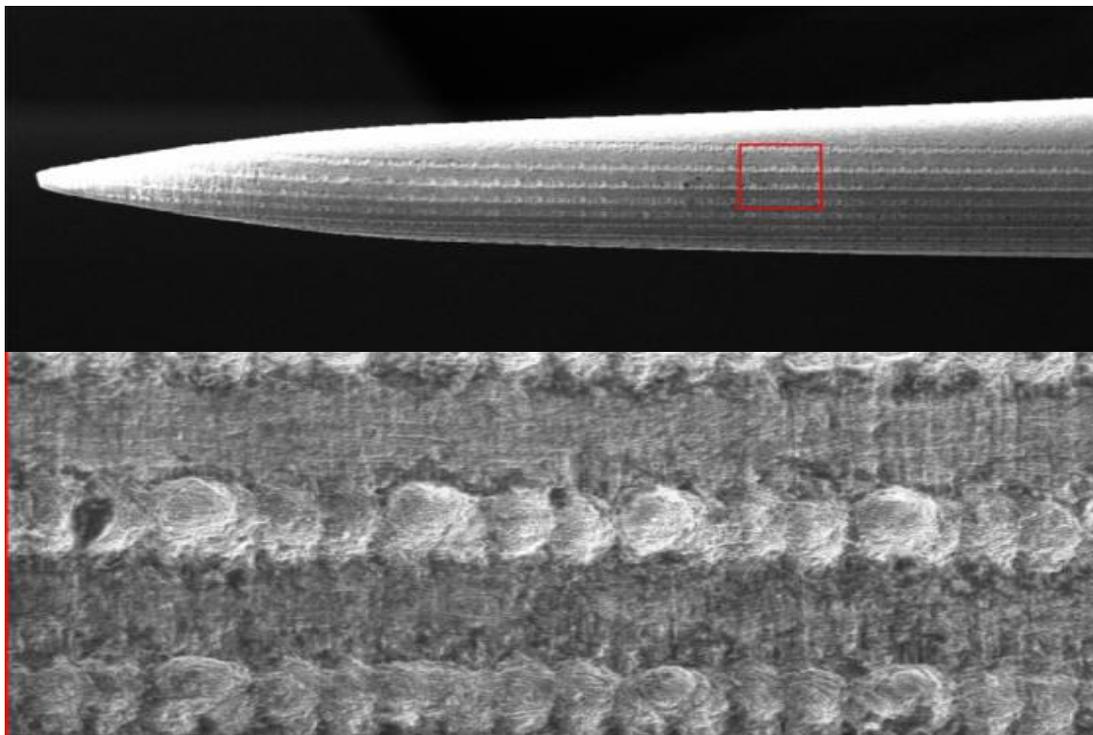
Figura 7 *Ferocactus glaucescens*

En la Figura 7 se pueden observar la estructura y patrones que tiene el *Ferocactus glaucescens* sobre su superficie, respecto a los canales que se forman y las espinas que se encuentran sobre los bordes de estos. Obtenido de: “[¿Cuál es la función de las espinas de los cactus?](#)”, por Mónica Sánchez, Ciber Cactus”.

Los cactus han demostrado cualidades interesantes para la sociedad científica, respecto a la recolección de humedad en el aire y el transporte de agua. Las superficies cilíndricas con puntas cónicas cuentan con superficies de mojabilidad heterogénea y tienen tasas de recolección de agua

similares, sin embargo, solo el cono transporta las gotas de agua hacia su base. El papel que juega la geometría cónica en la conducción de gotas es primordial, ya que su gradiente de curvatura da como resultado un gradiente de presión de Laplace dentro de las gotas. Además, las ranuras sobre la superficie de la espina del cactus, así como también de las púas orientadas en la punta de la columna influyen también en el gradiente de presión de Laplace y el gradiente de humectabilidad, los cuales propician el transportar agua desde la punta hasta la base de la columna. Al imitar estas características, se podría mejorar la eficiencia de un sistema de recolección de humedad en el ambiente.

En la Figura 8 se pueden apreciar las características de la superficie de la espina que dan como resultado una superficie heterogénea, la cual influye en el transporte de las gotas de agua. Adaptado de: “[Directional water-collecting behavior of pine needle surface](#), The Royal Society Publishing site, por Yanling Wan.”



**Figura 8** *Detalles y características de la superficie de las espinas de los cactus*

Grupos de estudio científicos han realizado ya diversos intentos para recrear este fenómeno, donde incluyen una geometría de forma cónica inspirada en las espinas de los cactus, así como la introducción de manchas hidrofílicas sobre un fondo hidrofóbico inspirado en los escarabajos del desierto; mientras son sometidos a un proceso de captación de agua, ya sea por condensación o neblina sola, donde:

- Bajo la niebla, las microgotas suspendidas en la niebla golpean la superficie hidrófila. Las gotas se vuelven más grandes debido a la coalescencia de las microgotas.
- Bajo la condición de condensación, las gotas se nuclean en la superficie. El proceso de condensación del vapor de agua es impulsado por el cambio de fase que comienza con las nanogotas. El proceso de condensación depende del grado de subenfriamiento y de la humedad relativa.

## **2.4 Estado del arte**

Un grupo de investigadores, de The Ohio State University, del Nanoprobe Laboratory for Bio- & Nanotechnology and Biomimetics (NLBB), ha llevado a cabo ya diferentes investigaciones respecto a los efectos de la superficie de las espinas de los cactus, en la eficiencia de la tasa de recolección de agua.

En una de ellas, las mediciones realizadas respecto a la recolección de agua mostraron que la tasa de recolección de agua era mayor bajo neblina sola en comparación con la obtenida por condensación, mientras que, al combinar la condensación junto con la neblina, la tasa de recolección de agua aumento en aproximadamente dos veces la tasa en la niebla sola. Además, el ángulo perteneciente a la geometría triangular no afecta la tasa de recolección de agua, sin embargo, se demostró que mientras más corta era la longitud, la tasa de recolección aumentaba. (Dong Song, 2019)

En otra investigación, se demostró que, para recolectar agua de la niebla, las gotas de agua recolectadas son impulsadas por el gradiente de presión de Laplace y la gravedad. El gradiente de presión de Laplace domina en un ángulo de inclinación  $0^\circ$ , mientras que la gravedad domina la tasa de recolección de agua en un ángulo de inclinación de  $45^\circ$ . Entre los dos factores impulsores, el efecto debido a la gravedad es más prominente. La tasa de recolección de agua permanece independiente del ángulo de la punta, independientemente del ángulo de inclinación. Las ranuras y la humectabilidad heterogénea también aumentan la tasa de recolección de agua. (Dev Gurera, 2019)

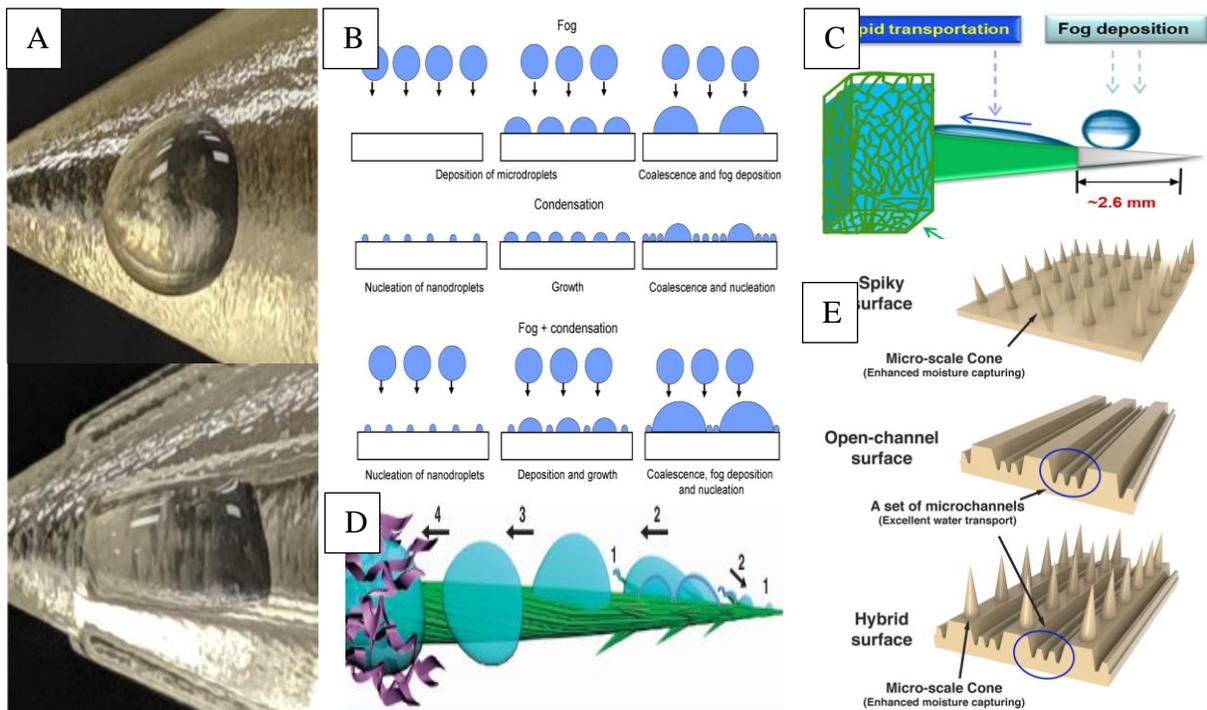
Y finalmente, en una tercera investigación, se encontró que, el área de la superficie de un cono dicta la tasa de recolección de agua. En la condensación, las gotas se nuclean en la superficie, a diferencia de las gotas que se depositan bajo el flujo de niebla. Por lo que la superficie es el factor dominante. Tener una matriz siempre aumenta la tasa de recolección de agua, debido al efecto en cascada de las gotas que caen. (Bharat Bhushan, 2019)

Un estudio, realizado por un grupo conformado por investigadores de diferentes instituciones, estableció que la eficiencia de la recolección de niebla se puede regular optimizando la longitud de la región hidrófoba mientras se combina con una región hidrofílica, ya que se demostró que la eficiencia de esta combinación puede resultar 2 veces superior que la de una superficie completamente hidrofílica y 4 veces a la de una superficie completamente hidrofóbica. (Dongliang Chen, 2018)

Por otro lado, un estudio realizado por investigadores de Changchun University of Science and Technology, del Key Laboratory of Cross-scale Micro and Nano Manufacturing, concluyó que el gradiente de presión de Laplace y el gradiente de rugosidad de la superficie generado por el

gradiente de forma son las dos fuerzas impulsoras principales para el movimiento de las gotas de agua desde la punta hasta la raíz de la espina. (Yanling Wan, 2019)

Finalmente, un estudio llevado a cabo por investigadores de diferentes universidades de Corea del Sur, estableció que las superficies estructuradas híbridas que poseen estructuras cónicas a microescala con conjuntos de microcanales, exhiben una presión capilar mejorada junto con capacidades de captura de humedad, por lo que tienen capacidades de recolección de agua hasta 2.4 y 4.7 veces más altas que las superficies planas de control en condiciones de flujo de baja y alta velocidad, respectivamente. (Sun Woo Kima, 2020)



**Figura 9** Resultados obtenidos tras los experimentos llevados a cabo en las investigaciones previas.

En la figura se pueden observar las siguientes investigaciones: A) Área de la superficie de un cono, B) Tipos de recolección de agua, C) Combinación de región hidrofílica e hidrofóbica, D) Fuerzas impulsoras principales y E) Superficies estructurada híbrida

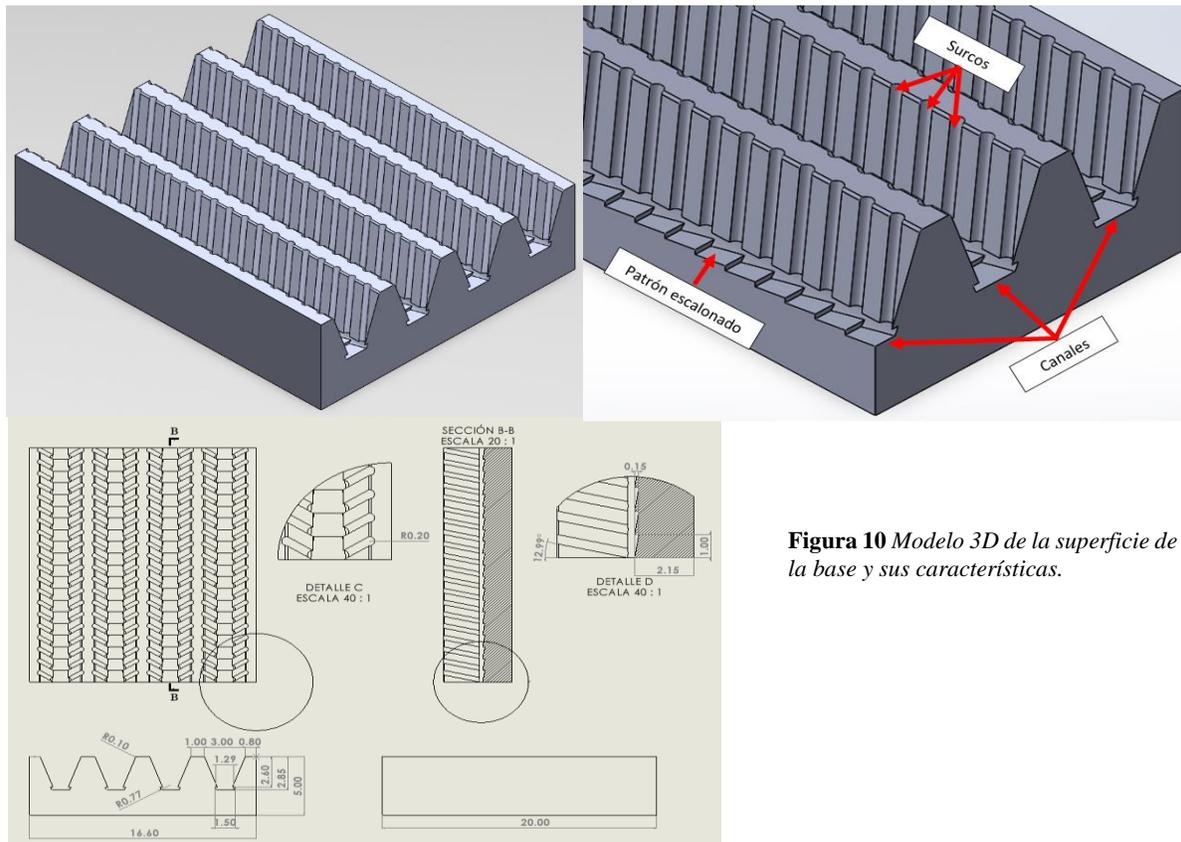
## 2.5 Diseño de la superficie bioinspirada

Para el diseño de la superficie bioinspirada en la superficie y espinas de los cactus, se optó por el diseño de una superficie estructurada híbrida, debido a una capacidad de recolección de agua

superior en comparación con una superficie plana, además de ello, tanto las espinas como la superficie contara con canales, ya que esto permitirá redirigir las gotas de agua nucleadas sobre toda la superficie hacia el recipiente de recolección, además de que permitirá a las espinas tener una superficie heterogénea, lo que facilitara la nucleación de las gotas de agua.

### 2.5.1 *Diseño de la superficie de la base*

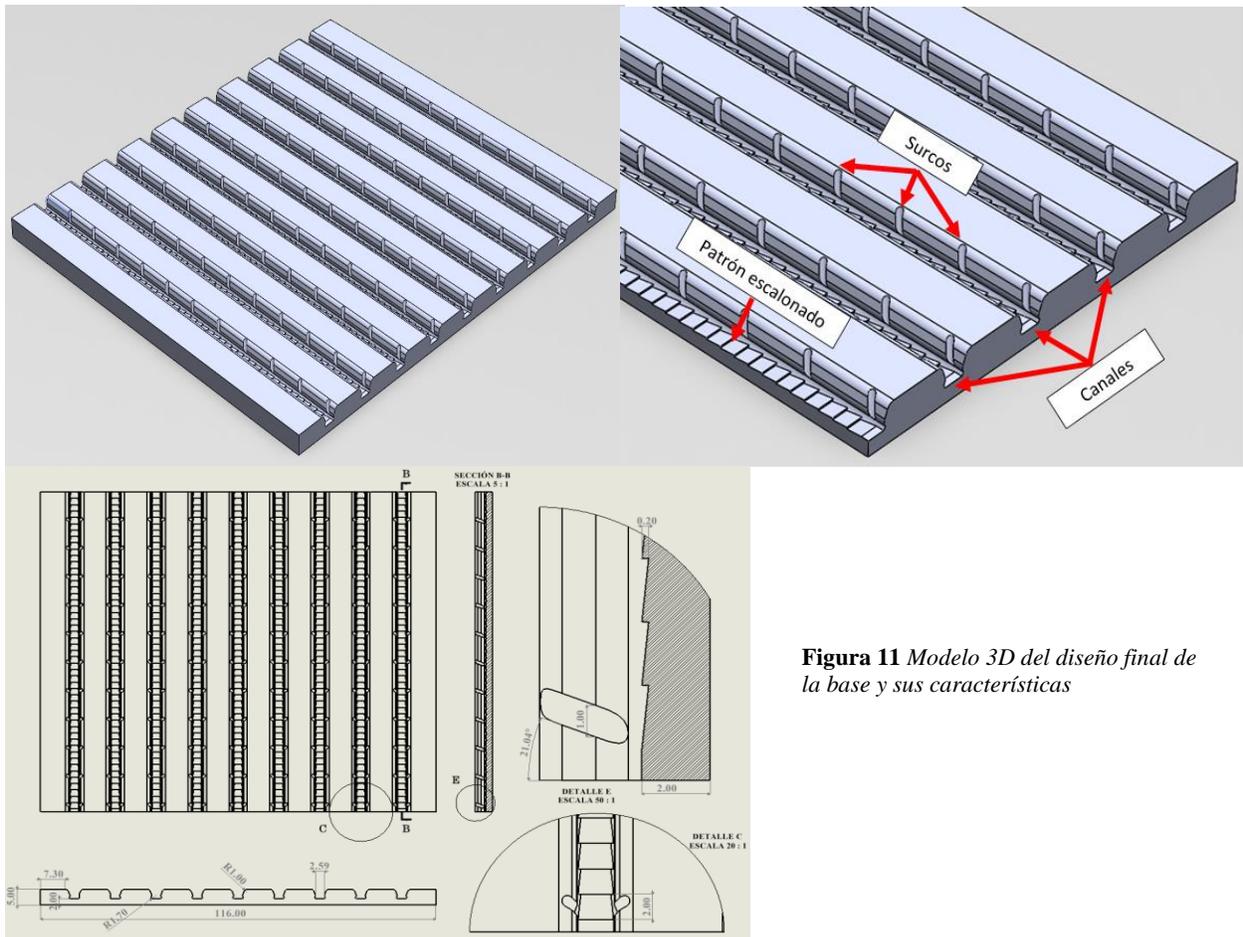
Para el diseño de la superficie, se optó por una base de 10 cm x 10 cm x .5 cm, por lo que, para su modelado previo, se diseñó una base de 1.6 cm x 2 cm x 0.5 cm. Se decidió realizar un canal en forma de trapecoide, con ranuras diagonales sobre las superficies laterales, y en el fondo se incluyó una superficie con escalones, Figura 10. Sin embargo, debido a que las dimensiones reducidas representaron un problema para su manufactura aditiva, impresión 3D, se tuvo que rediseñar toda la superficie.



**Figura 10** Modelo 3D de la superficie de la base y sus características.

### 2.5.1.1 Rediseño de la superficie de la base

La base rediseñada tiene unas dimensiones de 10.1 cm x 11.6 cm x 0.5 cm, tratando de conservar por completo las características del diseño previo, pero utilizando medidas más adecuadas que nos permitieran conservar los efectos de capilaridad sobre la superficie y que no representara un problema para su manufactura, Figura 11.



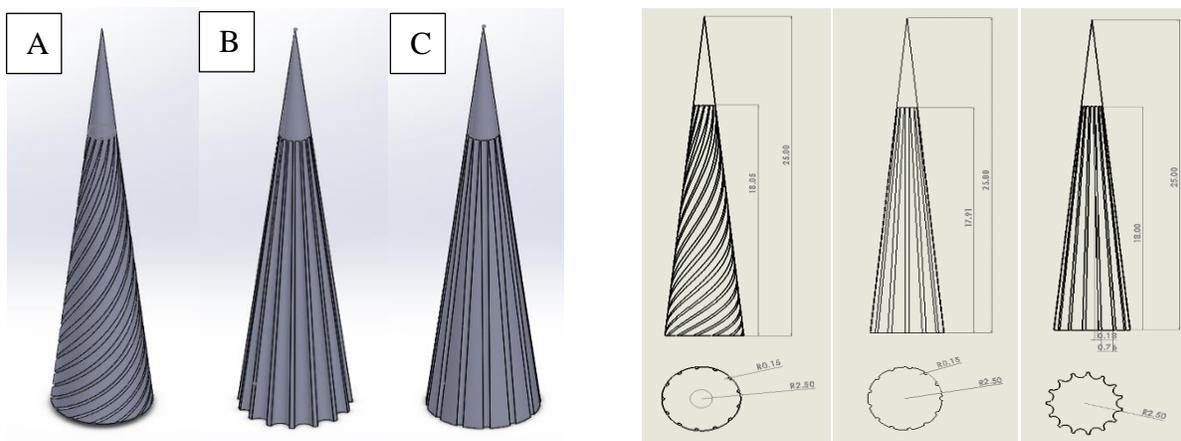
**Figura 11** Modelo 3D del diseño final de la base y sus características

En cada cara lateral hay 11 ranuras con una separación de 9 mm de centro a centro, con un arreglo de 50 escalones al fondo del surco, y con un redondeo de 1 mm sobre las esquinas superiores e inferiores de los surcos. Estas características fueron agregadas a la superficie de la placa para permitir el flujo rápido y dirigido de las gotas de agua hacia el contenedor, de tal forma que se

reduzca lo más posible la fuerzas de adhesión, permitiendo que cuando las gotas de agua sean lo suficientemente grandes como para que la presión externa supere la presión interna, las gotas generen una cadena de nucleación entre ellas.

### 2.5.2 *Diseño de la superficie de las espinas*

Para el diseño de la superficie de las espinas, se optó por una figura cónica de 2.5 cm de alto x 0.5 cm de radio. Se decidió realizar un canal en forma circular alrededor de la superficie de la espina, esto para aumentar la heterogeneidad en la superficie y que ayude a direccionar hacia la base las gotas de agua formadas sobre la superficie, mediante el efecto de la capilaridad. Se realizaron 3 diferentes diseños cada uno con tipo canal, en la Figura 12 podemos ver las ilustraciones de estos, siendo en orden de izquierda a derecha: espina con canal helicoidal, espina con canal de diámetro variable y espina con canal de diámetro constante, estos diseños se pensaron para tratar de imitar en la medida de lo posible la superficie de la espina del cactus y de esta forma, poder observar cómo los patrones de estos canales afectan el fenómeno de capilaridad y por ende la nucleación de las gotas. Sin embargo, debido a que sus dimensiones reducidas representaron un problema para la elaboración, se tuvo que rediseñar la superficie de las espinas.



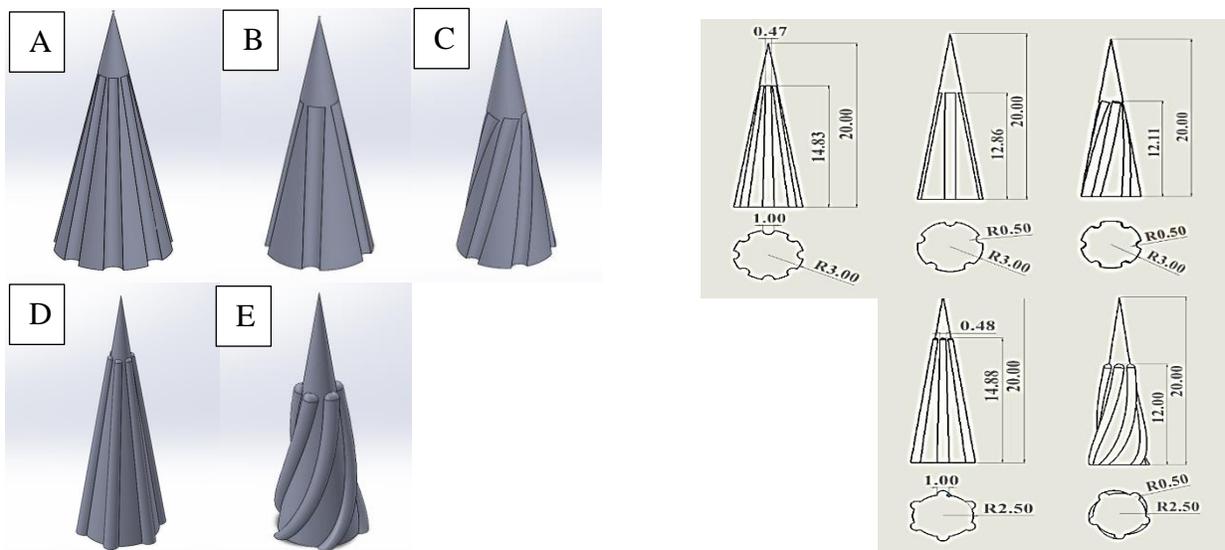
**Figura 12** Modelos 3D del diseño final de las espinas y sus características.

A) Espina con canal helicoidal, B) Espina con canal de diámetro variable y C) Espina con canal de diámetro constante.

### 2.5.2.1 Rediseño de la superficie de la espina

Para el rediseño de la superficie de las espinas, se realizaron 5 modelos de 2 cm de alto x 0.6 cm de radio, tratando de conservar las características de los canales de los diseños previos, pero cambiando sus dimensiones.

En la Figura 13 podemos observar 5 diseños de espinas siendo que los tres primeros presentan diseños de canales de forma helicoidal, canales de diámetro variable y canales de diámetro constante respectivamente; mientras que en los 2 modelos restantes se decidió realizar bordes sobre la superficie en lugar de ranurados, por lo que se obtuvo un diseño con bordes de diámetro variable y otro con bordes helicoidales.



**Figura 13** Modelo 3D de los diseños finales de las espinas a seleccionar y sus características.

A) Espina con canal helicoidal, B) Espina con canal de diámetro variable, C) Espina con canal de diámetro constante, D) Espina con bordes de diámetro variable y E) Espina con bordes helicoidales.

Para las espinas con canal y borde helicoidal se utilizó un paso variable con los valores que se presentan en la Tabla 3.

**Tabla 3** Características de los pasos variables de las espinas con bordes (derecha) y surcos (izquierda) helicoidales.

	A	Rev	P	Diá		A	Rev	P	Diá
1	0mm	0	124.5mm	6mm	1	0mm	0	14.5mm	5mm
2	12mm	0.1726	14.5mm	2.4mm	2	12mm	0.3	65.5mm	2mm
3					3				

Número de revoluciones (Rev), altura (A), diámetro (Diá) y paso de rosca (P) para las regiones a lo largo de la hélice. Elaboración propia.

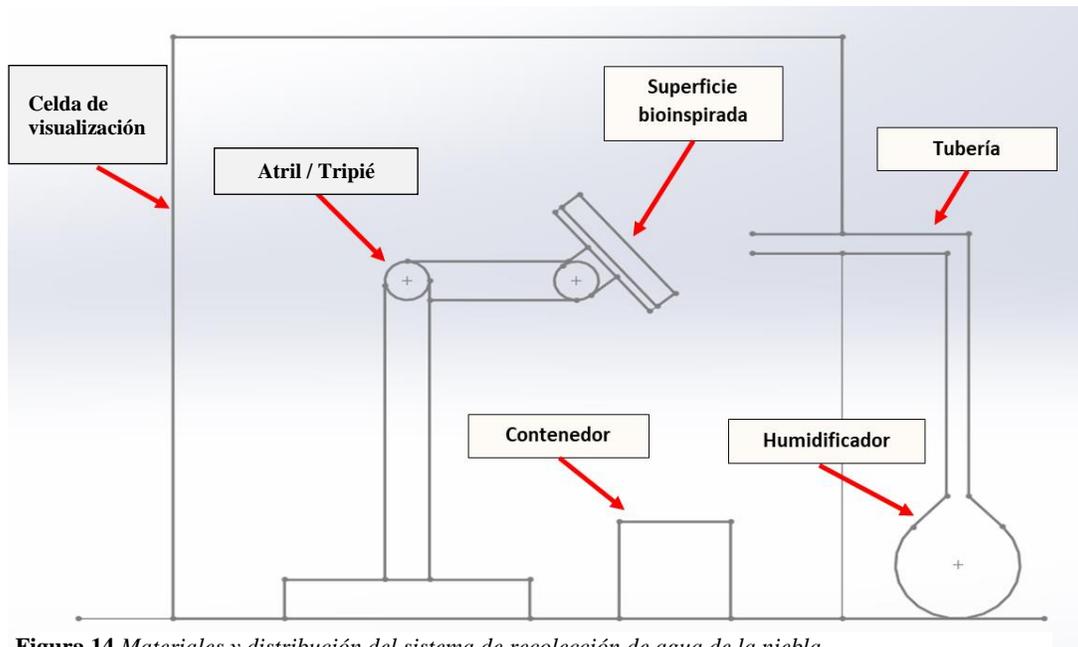
Para cada modelo se utilizó un 1 mm de diámetro para elaborar las ranuras y bordes, de modo que se obtuviera una espina de 6 mm de base en cada caso.

# Capítulo 3

## Instalación experimental

### 3.1 Instalación experimental

El esquema de la distribución de los componentes que conforman la instalación experimental se muestra en la Figura 14. Para realizarlo se tomó en consideración el modo en que otros investigadores que estudiaron el mismo fenómeno hicieron sus montajes.



**Figura 14** Materiales y distribución del sistema de recolección de agua de la niebla.

Se utilizó una celda de visualización para poder observar con claridad como se lleva a cabo el proceso de recolección de gotas de agua de la neblina, evitando que factores externos interfieran en el proceso. Se usó un tripié/atril el cual permitió modificar el ángulo al cual se encuentra la superficie bioinspirada de acuerdo con el flujo de aire húmedo, y de este modo apreciar los efectos de la gravedad y el gradiente de presión de Laplace. Para generar el flujo de aire húmedo, se utilizó un humidificador conectado a una tubería/manguera que lo dirige hacia dentro de la celda de visualización.

## **3.2 Selección de equipo y materiales**

### **3.2.1 *Humidificador***

Se utilizó un humidificador con capacidad de 550 ml, el cual produce una neblina de agua extremadamente fina generada debido a la vibración ultrasónica de una superficie sumergida en agua. El equipo cuenta con las siguientes características:

- Dos modos de pulverización, niebla densa y niebla pequeña.
- Voltaje 24V DC
- Potencia 12W

### **3.2.2 *Tripie/atril***

Se seleccionó un tripie el cual tuviera una superficie de apoyo para poder colocar la superficie bioinspirada, además de que esta pudiera desplazarse para colocarla a diferentes ángulos y observar cómo influye en la recolección de agua. Las características del producto son las siguientes:

- Largo estirado: 100cm (1 metro)
- Largo doblado: 19cm
- Peso: 196 gramos
- Material: Acero inoxidable

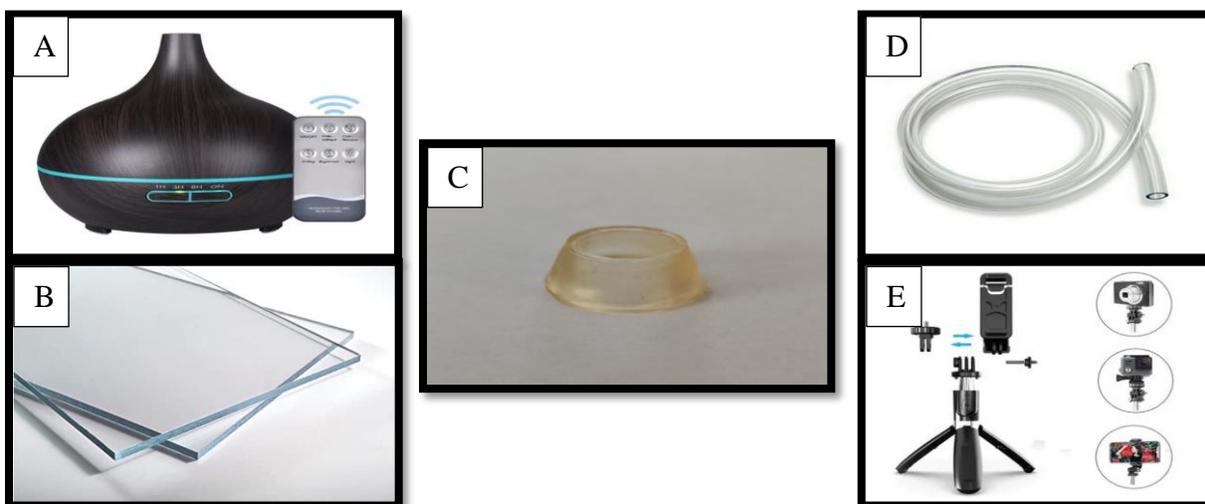
### **3.2.3 *Acrílico***

Para construir la celda de visualización, se seleccionó el acrílico debido a que es fácil de transportar y manejar, por lo que se le hicieron los siguientes cortes:

- 3 piezas de acrílico de 20 cm x 20 cm x 5 mm
- 2 piezas de acrílico de 20 cm x 19 cm x 5 mm
- 1 pieza de acrílico de 10 cm x 8.5 cm x 5 mm

### 3.2.4 Manguera y empaques

Para conectar el humidificador con la celda de visualización, se seleccionó el uso de una manguera transparente para agua de 1 m x 7/16''  $\phi$ . El largo de la manguera fue seleccionado para permitir la manipulación del humidificador y colocarlo de tal manera que se evite formar codos de radio corto en la manguera que propicien que se depositen en su interior las gotitas de agua presente en el flujo de aire. Además, se utilizaron 2 empaques cónicos de 7/16''  $\phi$ , esto con la intención de evitar el movimiento de la manguera y que ocurriera una fuga de aire húmedo.



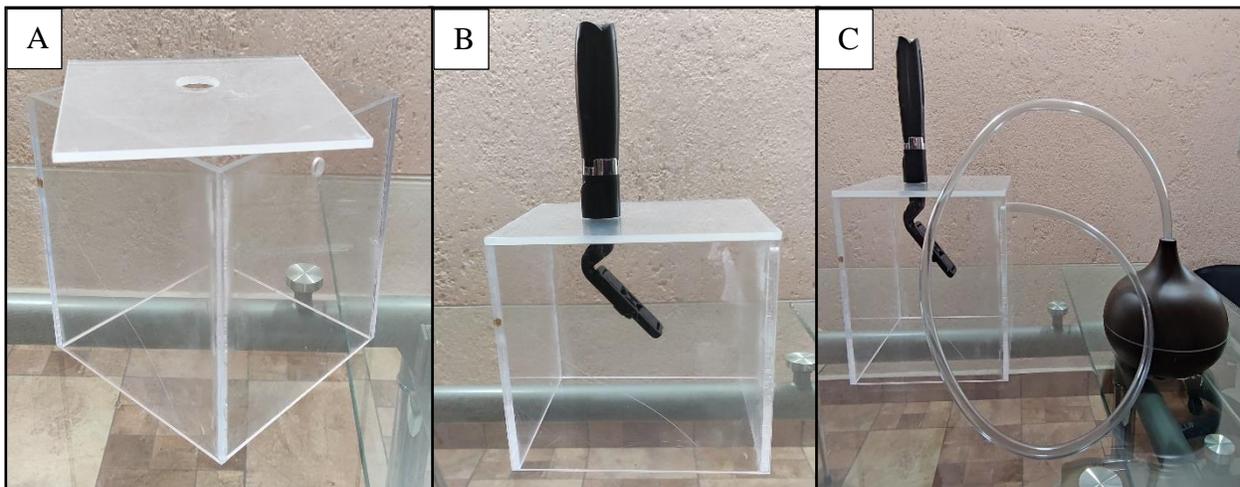
**Figura 15** Materiales seleccionados para conformar el sistema de recolección de agua de la niebla.

Los componentes de la instalación son: A) Humificador, B) Acrílico para la celda de visualización, C) Empaques cónicos, D) Manguera y E) Tripié.

### 3.3 Montaje del sistema de recolección de agua

Sobre una pieza de acrílico de 20 cm x 20 cm x 5 mm se hizo un corte circular de 3 cm de diámetro, ubicada a la mitad y a 7 cm del centro de la circunferencia al borde de uno de sus lados, esto debido a que las dimensiones del tripié son demasiado grandes para la celda de visualización, por lo que dicho objeto se colocó invertido, permitiendo tener la base móvil donde se coloca la superficie bioinspirada dentro de la celda. En una pieza de acrílico de 20 cm x 19 cm x 5 mm, se realizó un corte de 7/16''  $\phi$  para poder conectar el humidificador con la celda de visualización

mediante la manguera. Se procedió a unir 2 piezas de 20 cm x 20 cm x 5 mm y 2 de 20 cm x 19 cm x 5 mm para formar un cubo de 20 cm x 20 cm x 20 cm, dejando la parte inferior y superior al descubierto, la primero con la intención de poder manipular la tapa y el tripié con mayor facilidad, al momento de montar este y seleccionar el ángulo al que se encontrará la base. Mientras que, la parte inferior se dejó descubierta para evitar que dentro del acrílico la humedad en exceso se empiece a condensar sobre las superficies del acrílico y los demás componentes dentro de la celda de visualización, lo que podría alterar los resultados sobre el coeficiente de captación de agua de la superficie bioinspirada. En la Figura 16 se muestra el proceso descrito anteriormente.



**Figura 16** Montaje del sistema de recolección de agua de la niebla.

A) Montaje de la celda de visualización, B) Montaje del tripié sobre la celda y C) Conexión del humidificador a la celda de visualización.

### 3.4 Materiales Hidrofóbicos

Se decidió investigar qué efecto tiene al agregar a la superficie de las espigas y de la base sustancias hidrofóbicas, en vista de que en una de las investigaciones previas se estudió el efecto de usar sustancias hidrofílicas e hidrofóbicas sobre la superficie de las espigas, lo cual arrojó resultados positivos; para cuestiones de esta investigación se utilizara únicamente materiales

hidrofóbicos, ya que por cuestiones de tiempo el desarrollar una sustancia hidrofílica tomaría demasiado tiempo.

Se seleccionaron tres productos de la marca Muc – Off, basándose en que se trata de una marca líder a nivel internacional en el mercado del ciclismo, además de que los productos están enfocados a trabajar bajo diversas condiciones climatológicas, por lo que los materiales hidrofóbicos seleccionados, que se ilustran en la Figura 17, fueron los siguientes:



**Figura 17** Productos seleccionados que cumplan con la función de actuar como sustancias hidrofóbicas. Los productos que se muestran son aquellos que presentan propiedades hidrofóbicas de interés para este trabajo. Elaboración propia.

### 3.4.1 *Silicon Shine (Muc – Off)*

Abrillantador que deja la superficie con un aspecto de fábrica, además de actuar como un reductor de fricción para piezas de suspensiones y reducir la adherencia de la suciedad.

- Protege y deja un acabado brillante en las piezas de metal, plástico y goma.
- Reduce la fricción en los soportes de las horquillas y en los amortiguadores.
- La fórmula de silicona evita la acumulación de suciedad en las superficies tratadas.

### **3.4.2 *Miracle Shine (Muc – Off)***

Cubre las zonas tratadas con una capa protectora microscópica contra los contaminantes atmosféricos, gracias a su tecnología de polímeros fluorados, además de proporcionar un acabado brillante.

- La tecnología de polímeros de Flouro crea una capa microscópica de protección.
- Repele el agua y los contaminantes atmosféricos.
- Los aceites de silicona permiten una fácil aplicación.
- Es seguro para la pintura, la fibra de carbono, el cromo, el metal y los plásticos.

### **3.4.3 *Fabric Protect***

Fabric Protect protege la tela contra manchas de líquidos cotidianos (agua, salsa de tomate, miel, jarabe de helado, huevo y aceite), esto se debe al recubrimiento hidrofóbico que genera, el cual es seguro de usar en todas las telas.

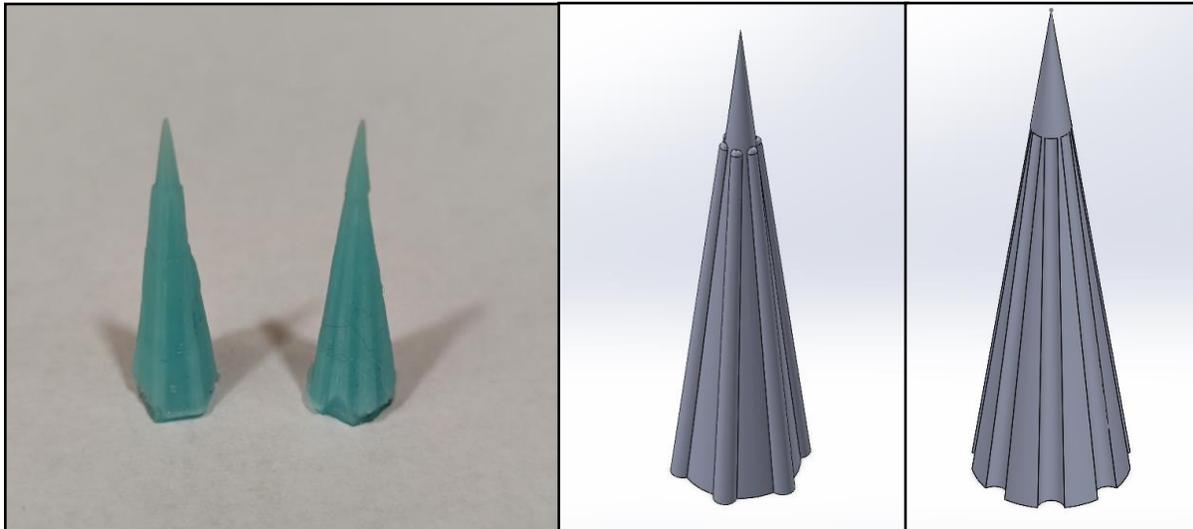
- Impermeabiliza y protege tu ropa y calzado gracias a sus propiedades hidrorrepelentes
- Incoloro
- No afecta a la transpirabilidad de las prendas ni a su flexibilidad
- Apto para cualquier tipo de tejido (cuero, gamuza, algodón, poliéster y telas transpirables).

## **3.5 *Manufactura aditiva de las espinas***

Para fabricar las espinas se eligió la manufactura aditiva (impresión 3D), usando como material de aporte un compuesto de resina sensitiva a la radiación ultravioleta, los diseños seleccionados para su impresión son los que se muestran en la Figura. 18.

Se seleccionaron los diseños de espinas con canales y bordes de diámetro variable ya que fueron los que presentaron menos dificultades durante la manufactura. En la Figura 21 es posible apreciar los detalles de los canales y bordes sobre la superficie de la espina, con algunas

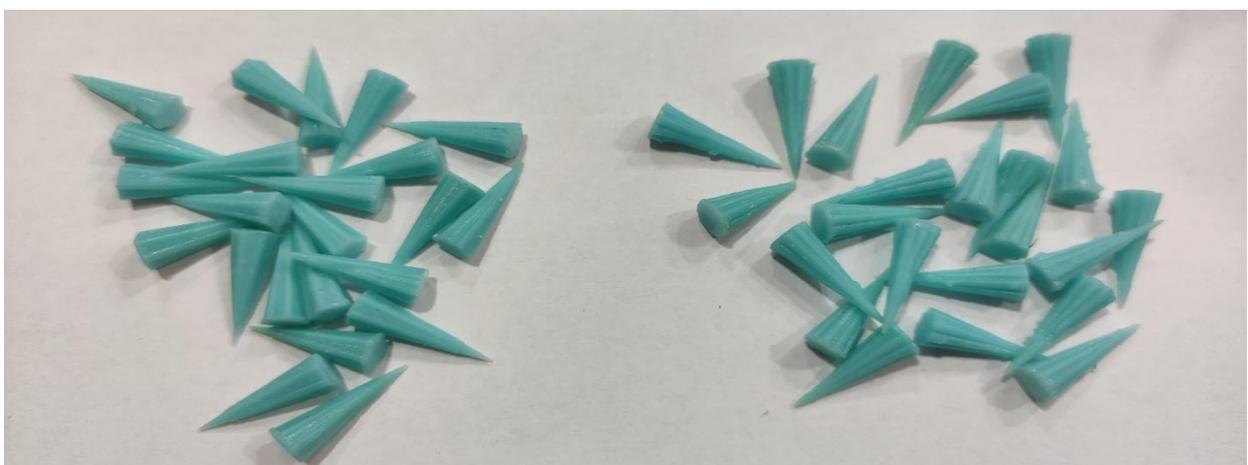
imperfecciones, las cuales entran dentro de lo aceptable considerando las dimensiones reducidas de las espinas.



**Figura 18** Selección e impresión de los modelos de espinas.

En la imagen podemos observar la impresión de 2 de los diseños de la superficie de la espina, siendo el de surcos y bordes de diámetro variable. Elaboración propia.

Debido a las características que presentan ambas espinas se decidió imprimir 27 ejemplares de cada diseño, esto para poder variar la distribución de ellas sobre la superficie, de tal modo que fuera posible observar las diferencias de usar un solo tipo de espina en cada lado de la base y combinarlas en la parte media. En la Figura 19 se muestra la cantidad espinas impresas.



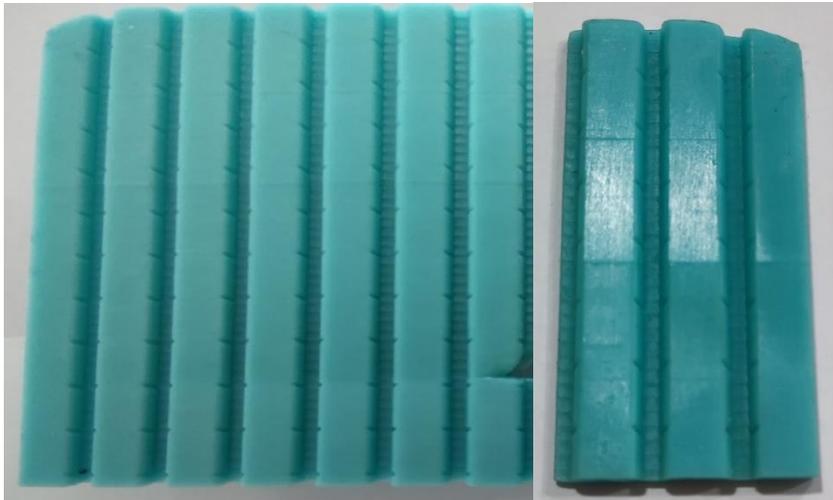
**Figura 19** Impresión de todas las espinas a utilizar en los experimentos.

Se puede apreciar en la imagen las espinas a utilizar para los arreglos sobre la superficie. Elaboración propia.

### 3.6 Impresión de la base

Para la manufactura de la base se procedió a su impresión en 3D, sin embargo, surgieron problemas durante la impresión y se procedió a reproducirla una vez más, sin embargo, los problemas persistieron, debido principalmente al material de aporte utilizado en la manufactura.

Por lo tanto, se procedió a recortar y lijar la segunda base para utilizar el área útil como se puede observar en la Figura 20. Las bases para utilizar en los experimentos tienen las dimensiones de 10.1 cm de alto x 8 cm de ancho y de 6.9 cm de alto x 3.5 cm de ancho.



**Figura 20** *Tamaño de las superficies de las bases a utilizar en los experimentos.*

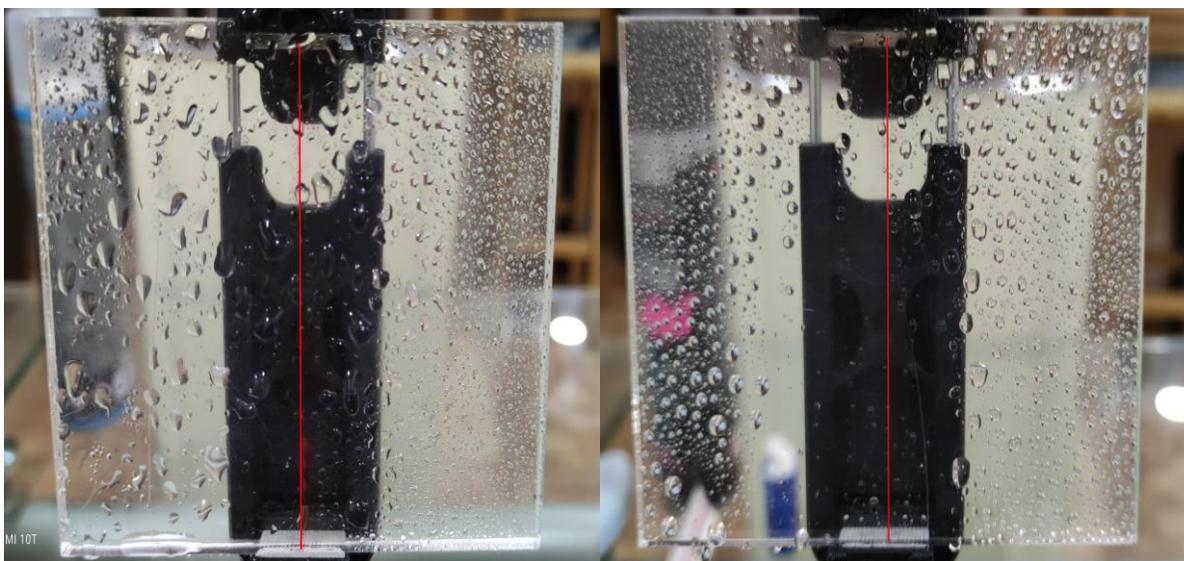
Se puede apreciar cómo se recortó la base original para utilizar la superficie útil y obtener el tamaño final de las bases a utilizar en los experimentos. Elaboración propia.

### 3.7 Pruebas de los materiales hidrofóbicos

Para seleccionar el material hidrofóbico más adecuado a ser utilizado sobre la superficie de la punta de las espinas, se procedió a realizar una prueba de dichos materiales.

Para esta prueba se utilizó la pieza de acrílico de 10 cm x 8.5 cm x 5 mm, la cual se dividió a la mitad en ambas caras de 10 cm x 8.5 cm, mediante una línea, la cual permitió comparar el comportamiento de los materiales hidrofóbicos al ser sometidos a un rocío de agua generado por un atomizador.

Para aplicar los materiales sobre la superficie, se utilizó una hoja de papel colocada a la mitad de la línea para evitar que los materiales se mezclaran entre sí a la hora de aplicarlos. Se aplicó una primera capa de cada material en cada lado de la superficie, y se esperó entre 5 y 10 segundos como indican las instrucciones de los productos, después se les paso una microfibra para regar y pulir el material sobre toda la superficie, este proceso se repitió 3 veces más con cada material. Se aplicaron tres rocíos de agua sobre la base de acrílico a una distancia de 10 cm de la superficie.



**Figura 21** Resultados obtenidos tras la prueba para seleccionar la sustancia hidrofóbica adecuada. En la imagen podemos observar una comparación entre una superficie limpia contra el Fabric Protect (izquierda) y del Miracle Shine contra el Silicon Shine (derecha). Elaboración propia.

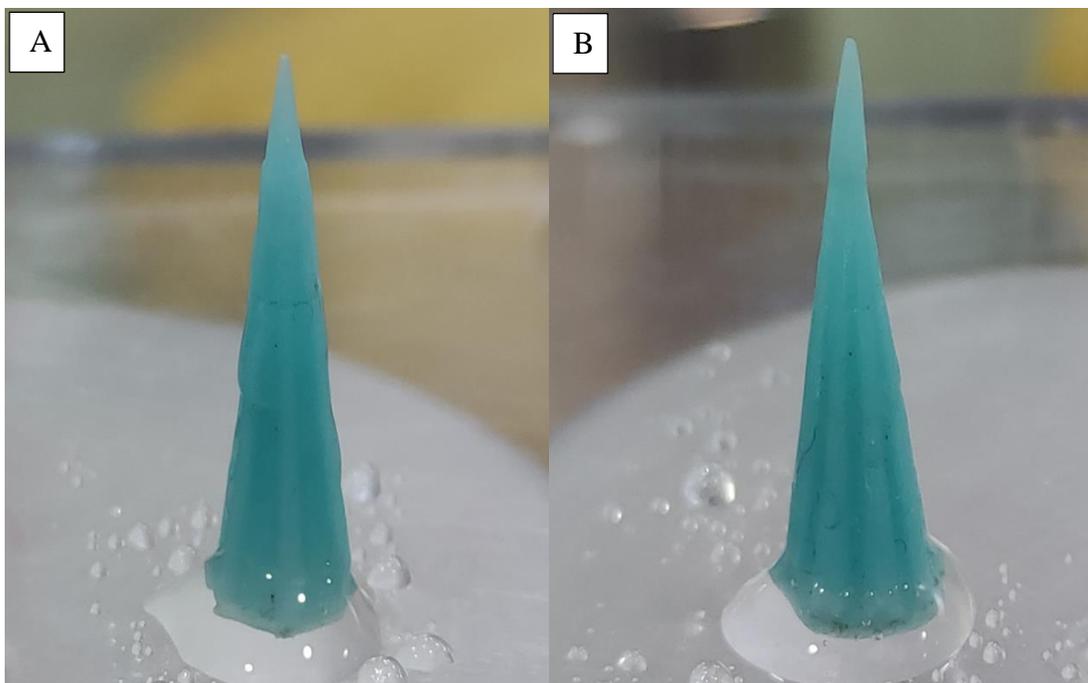
En la Figura 21 se puede apreciar los resultados obtenidos tras la aplicación del agua con el rociador sobre una superficie limpia contra el Fabric Protect (izquierda) y del Miracle Shine contra el Silicon Shine (derecha). En la superficie limpia podemos observar los efectos de una superficie hidrofílica, ya que la gota de agua se esparce casi por completo sobre la superficie; en el caso de la superficie con Fabric Protect se puede empezar a apreciar los efectos de una superficie hidrofóbica. Sin embargo, en el caso del Miracle Shine contra el Silicon Shine ya es posible observar los efectos adecuados de una superficie hidrofóbica, siendo el Silicon Shine la sustancia

predilecta para su aplicación sobre las puntas de las espinas. Esta decisión se basa en que cuando una gota alcanza un tamaño relativamente grande sobre la superficie con Miracle Shine, la tensión superficial de dicha sustancia es superada y la gota se esparce sobre la superficie, mientras que en el caso del Silicon Shine, la gota de agua alcanzó un tamaño aún más grande y seguían presentes los efectos de una superficie hidrofóbica.

### ***3.7.1 Prueba del comportamiento de las gotas de agua sobre la superficie de las espinas***

Se procedió a realizar una prueba para observar el comportamiento de las gotas de agua sobre la superficie de las espinas, por lo que a cada espina en su punta se le aplicó una capa de Silicon Shine y se pulieron con microfibra. La prueba se realizó con el uso de un atomizador a una distancia de 10 cm del borde de la base donde se encontraban colocadas las espinas, y se repitió 5 veces obteniendo los siguientes resultados:

- La espina con surcos de diámetro variable permite el traslado más rápido de las gotas de agua captadas sobre la superficie de la espina hacia la base de esta, Figura 22a. Sin embargo, no permite la nucleación de una gota de agua relativamente grande y las gotas de agua depositadas sobre los costados tienen una nucleación lenta, por lo que no se tiene un traslado rápido de ellas hacia la base.
- La espina con bordes de diámetro variable permite la nucleación de las gotas debido a la curvatura de los bordes, por lo que se logra obtener un tamaño de gota más grande, Figura 22b. Además, debido al efecto de la nucleación, se permite la captación de mayor cantidad de gotas de agua sobre la superficie. Sin embargo, las gotas tardan mucho más tiempo en ser transportadas hacia la base de la espina.



**Figura 22** Resultados obtenidos del comportamiento de las espinas al transportar gotas de agua.

A) Espina con bordes de diámetro variable y B) Espina con canales de diámetro variable.

### 3.8 Pruebas experimentales a la superficie propuesta

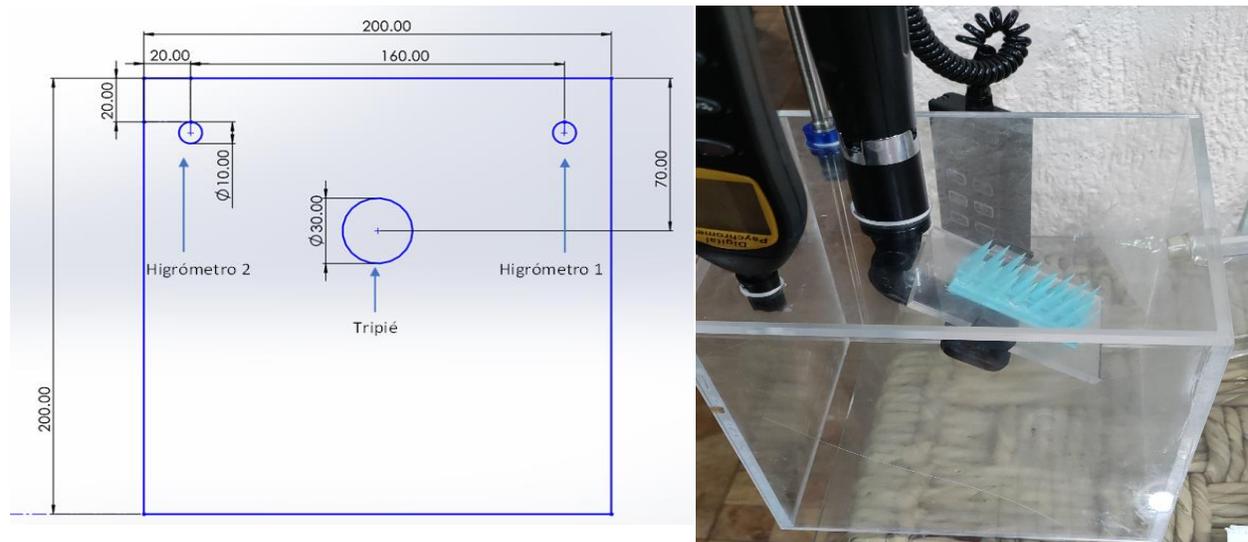
Se procedió a utilizar la base de 6.9 cm x 3.5 cm y 24 espinas (12 de cada tipo) para realizar pruebas de ensayo y determinar las condiciones a las que debe estar el sistema de recolección de agua para mantener una humedad relativa entre el 60 % y 80 % como valores máximos permitidos para este proyecto. A cada una de las espinas y a la base se les procedió a aplicar 3 capas del material hidrofóbico, posteriormente se unieron todas las piezas mediante una pasta térmica, después se montó la superficie propuesta sobre una base de acrílico. Finalmente, se montó esta última sobre el tripié y con ayuda de un transportador se colocó en un ángulo de 45° respecto a la horizontal.

Para poder medir la humedad relativa y la temperatura en el interior de la celda de visualización se utilizaron dos higrómetros, Figura 23. Uno de ellos de la marca OMEGA, modelo RH92, al que nos referiremos a partir de ahora como higrómetro 1; y al de la marca DWYER, modelo 485-2, al que nos referiremos como higrómetro 2. Para su colocación se realizaron dos orificios en la tapa superior de la celda de visualización.



**Figura 23** Higrómetros. Podemos apreciar el higrómetro OMEGA del lado izquierdo y el higrómetro DWYER del lado derecho.

En la figura 24 se puede apreciar como en la parte superior de la celda de visualización están distribuidos el higrómetro 2 del lado izquierdo y el higrómetro 1 del lado derecho, además de cómo se montaron para llevar a cabo los ensayos.



**Figura 24** Ubicación de los higrómetros en la parte superior de la celda de visualización.

Se realizaron 10 pruebas preliminares para poder definir las condiciones necesarias para poder llevar a cabo los experimentos bajo el rango de humedad relativa previamente citado.

Una vez realizados los ensayos preliminares, se determinó que para que dentro de la celda de visualización exista una condición de humedad relativa del 60 % al 80 % es necesario que tanto la parte baja del cubo, como la tapa queden parcialmente descubiertas. Esto debido a que si se mantenía completamente cerrada la celda se alcanzaba una humedad relativa del 100 % en los primeros 2 a 3 minutos. Por el contrario, si se mantenía solo un lado parcialmente abierto, se lograba alcanzar esta condición entre los primeros 3 a 6 minutos. Finalmente, si se mantenía la parte baja completamente separada de la superficie de trabajo, permitiendo que la humedad escapara por la parte baja de la celda de visualización, las condiciones de humedad que se alcanzaban eran del 20 % al 40 % de humedad relativa, además de producirse rápidamente el fenómeno de condensación sobre la superficie en la que se encontraba el sistema, por lo que afectaba la recolección de gotas de agua nucleadas sobre la superficie híbrida.

Por otra parte, se observó que, para una correcta lectura de las condiciones de temperatura y humedad relativa, era necesario que los higrómetros se encontraran dirigidos en dirección hacia la entrada de la neblina en la celda, ya que si se colocaban en la parte trasera como se observa en la Figura 27, registraban valores prácticamente constantes.

En la Figura 25 se puede apreciar como quedó la distribución final de los componentes del sistema con las consideraciones realizadas.

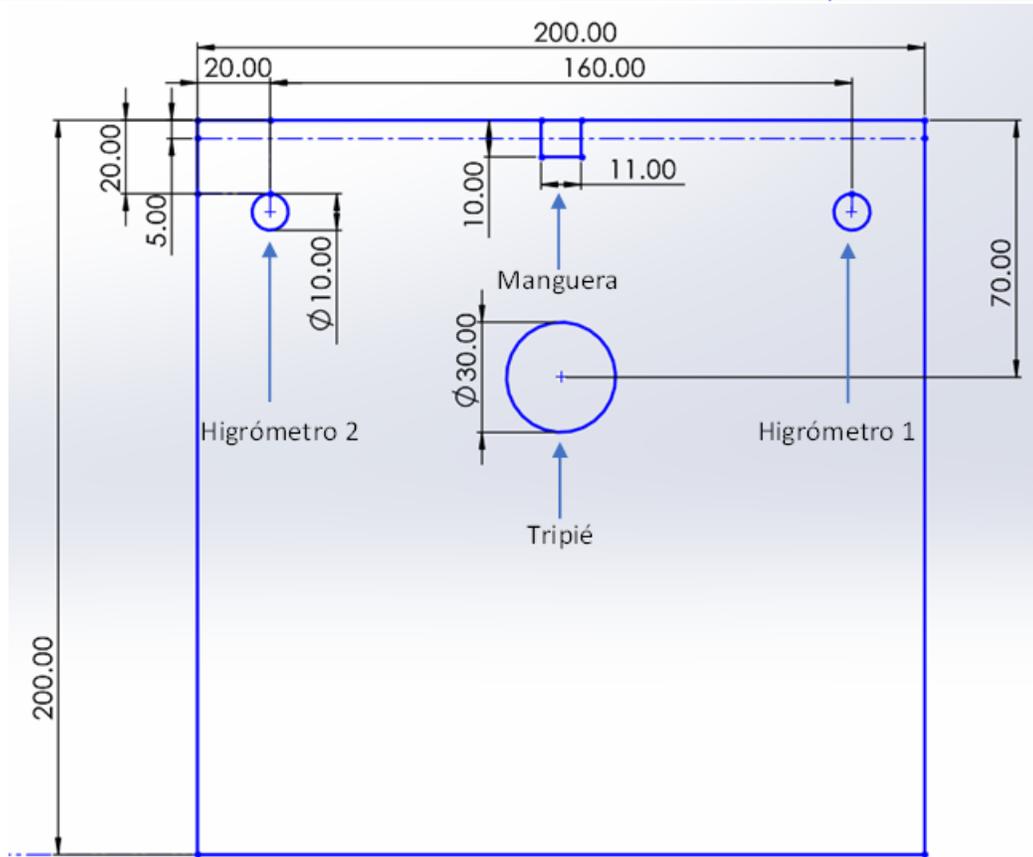
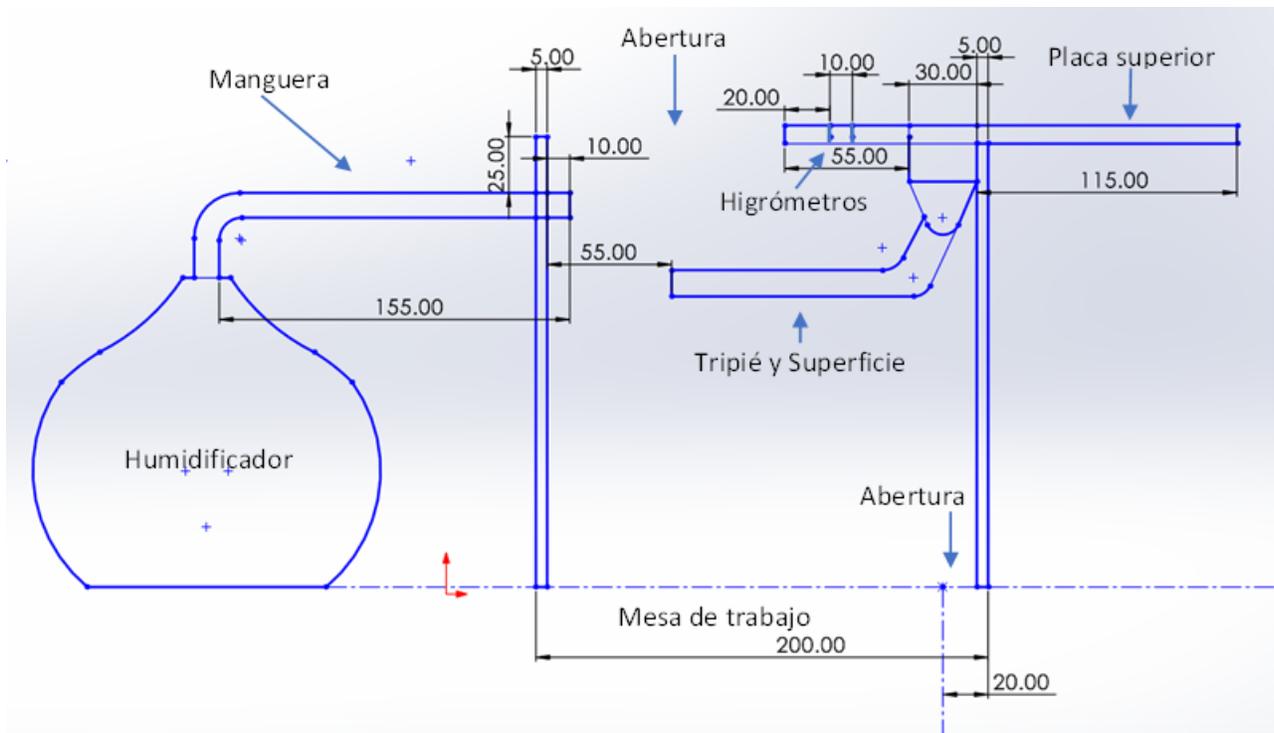
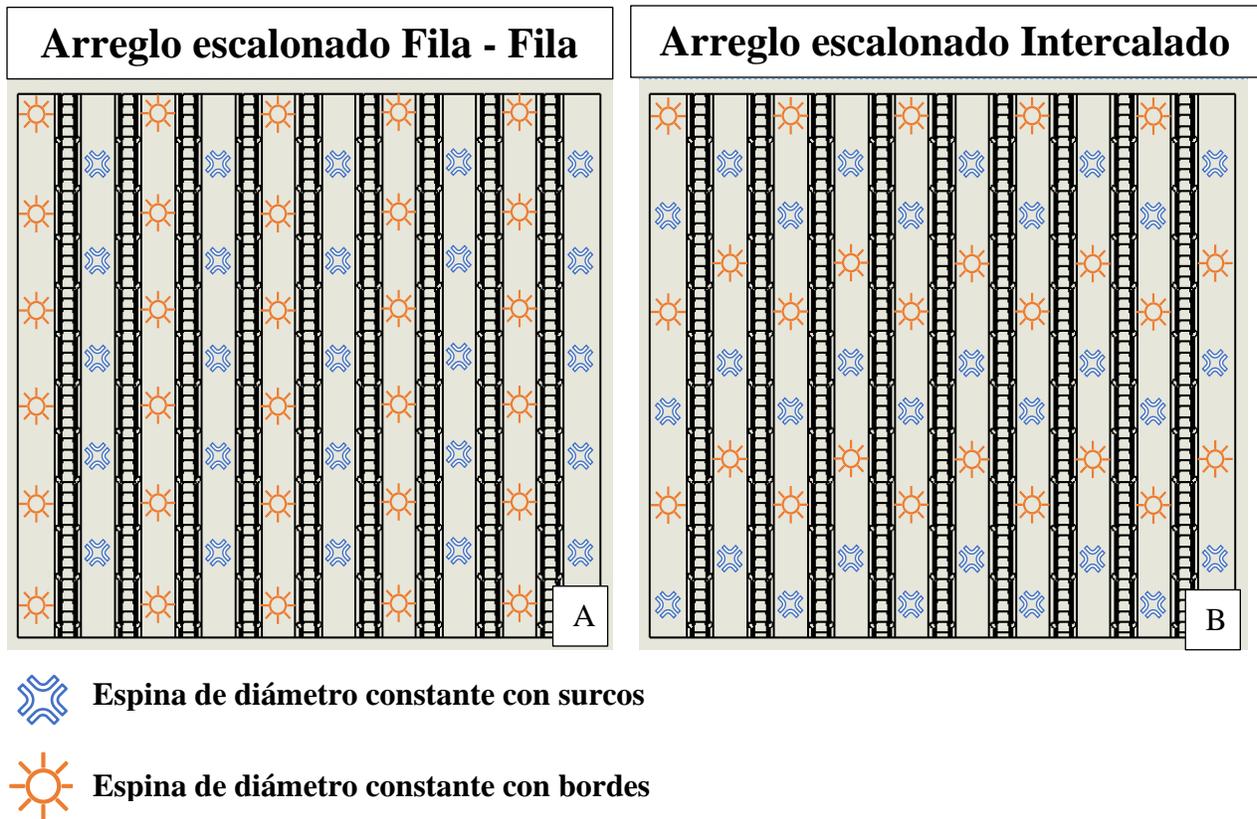


Figura 25 Distribución final del sistema de recolección de agua de neblina.

Ya establecidas las características necesarias para llevar a cabo las pruebas y debido a que las espinas de un solo tipo son insuficientes para cubrir toda la superficie de la base, se decidió que se utilizarían dos arreglos en el que se combinarían ambos tipos de espinas. En el arreglo escalonado A1 cada hilera tiene un tipo de espina distinto, Fig. 26a, mientras que en el arreglo escalonado A2 los tipos de espinas se alternan en cada hilera, Fig. 26b.



**Figura 26** Distribución de las espinas en los arreglos A) Arreglo escalonado A1 y B) Arreglo escalonado A2.

Además, se estableció que para cada arreglo se harían las pruebas variando el ángulo de inclinación de la base, siendo los ángulos de  $5^\circ$ ,  $35^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $55^\circ$  y  $90^\circ$  respecto a la horizontal, ilustrados en la Figura 27. Así mismo, para cada prueba tanto a la superficie de la base como a la

punta de las espinas, previamente lavadas para evitar variaciones en el comportamiento de la superficie debido al material hidrofóbico, se les aplicaron 3 capas del material hidrofóbico.

Finalmente, la base se secó al final de cada prueba con una secadora para observar las propiedades de la superficie de retener las gotas de agua ante una fuerza o factor externo.

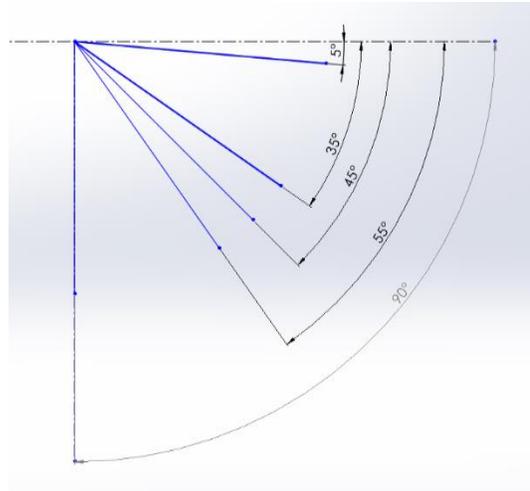


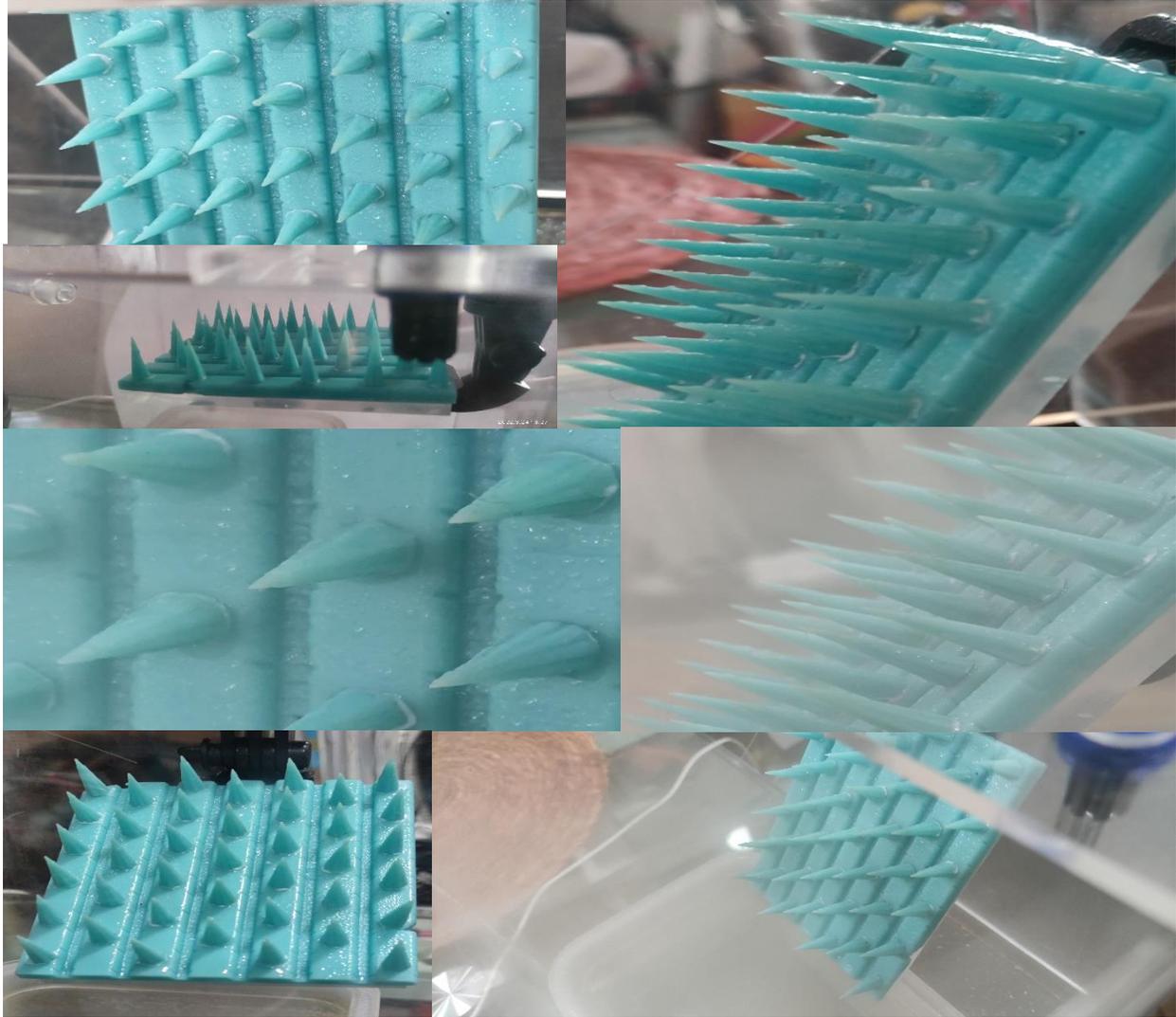
Figura 27 Ángulos de las pruebas.

### 3.9 Observaciones a partir de los experimentos preliminares

1. Durante las pruebas realizadas se pudo observar que, para la correcta nucleación de gotas de agua sobre las puntas de las espinas, es necesario que la punta este correctamente definida, tratando de que las irregularidades en ella sean mínimas. Así mismo, es necesario que la salida de la neblina este mejor distribuida, para que el área abarcada por esta sea mayor, ya que, al salir directamente de la manguera, pese a la forma cónica que toma el flujo, el área que abarca es mínima.
2. Por otro lado, se observó que el material del que está hecho la base y las espinas no es el adecuado para trabajar únicamente con un material hidrofóbico, ya que el material presenta porosidades las cuales sumadas a las irregularidades presentadas debido al proceso de elaboración no permitían un comportamiento adecuado del diseño de la superficie. Sin embargo, el diseño fue el adecuado para soportar el desprendimiento de gotas de la superficie al momento de aplicarse una corriente de aire generada por el secador a una distancia de 10 cm.

3. Como otro punto a resaltar, para que el fenómeno de la recolección de agua de neblina funcione es necesario que haya una corriente de aire que mantenga el flujo de la neblina constante, ya que en un ambiente estático no se genera ninguna nucleación de gotas de agua sobre la superficie. En caso de que se deseara trabajar en un ambiente estático, sería necesario que la superficie se encontrara a una temperatura menor constante de a la que se encuentra el interior de la zona experimental.
4. El tamaño de la celda de visualización limitaba el poder operar correctamente el tripié y la superficie, además de que es necesario realizar más orificios en las paredes para permitir que las condiciones de humedad sean las adecuadas para llevar a cabo la experimentación.
5. Pese a que se tomaron acciones para evitar que en la superficie sobre la cual se encontraba la celda de visualización se condensaran las gotas de agua, a partir del minuto 90 era notorio ver que dicho efecto ocurría, por lo que se lograban depositar algunas gotas en el contenedor de agua.
6. Finalmente, la pasta térmica no es del todo adecuada para llevar a cabo los experimentos, ya que, debido a la humedad y aumento de temperatura, se ve afectada y no puede mantener correctamente las espigas en su lugar, provocando que se deslicen y se caiga una o más de ellas.

Teniendo ya acondicionado el sistema de recolección de agua de acuerdo con las características deseadas, se procedió a realizar las pruebas con cada uno de los arreglos tomando previamente las lecturas de temperatura y humedad relativa del ambiente. En la figura 28 se ilustran dichos experimentos.



**Figura 28** Pruebas realizadas con los arreglos de la superficie.

Para la realización de las pruebas, se tomaron lecturas de la humedad relativa y temperatura en tiempos de 5, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105 y 120 minutos; con lo que se logró comparar los datos obtenidos en cada uno de los higrómetros con los datos de las condiciones ambientales. Los datos se tabularon como se muestra en la Tabla 4, en la que además se presentan los valores superior e inferior aceptados en base al cálculo de la incertidumbre absoluta.

**Tabla 4** Datos recopilados de las pruebas.

Ángulo con respecto al eje horizontal 5°						
Condiciones ambientales iniciales			T (°C)	22	% HR	12
Tiempo (min)	Higrómetro 1		Higrómetro 2		Ambiente	
	T (°C)	% HR	T (°C)	% HR	T (°C)	% HR
5	16.5	51.5	24.2	57.4	22	12
15	15.6	48.8	24.1	58.2	22	12
30	17.7	63.8	23.8	67.1	23	15
45	16.4	55.6	23.3	51.6	23	15
60	16	54.6	23.1	55.1	22	15
75	16.6	60.7	22.8	62.8	21	15
90	17.7	69.2	23.3	64.7	20	23
105	17.5	67.7	23.1	63.1	20	23
120	17.5	68.6	22.2	57.2	20	23
Promedio	16.83	60.06	23.32	59.69	21.44	17.00
Sum. E. Absoluto	6.1	59.4	4.3	37.9	9.6	36.0
Incertidumbre absoluta	0.79	7.74	0.64	5.02	1.24	4.66
Desviación media	0.68	6.60	0.47	4.21	1.06	4.00
UCV	17.62	67.79	23.96	64.71	22.68	21.66
LCV	16.05	52.32	22.69	54.67	20.21	12.34

En la Tabla 4 podemos apreciar los valores obtenidos en cada intervalo de tiempo, además de ello se observan valores en color azul, que indican el momento en que se presentó la nucleación de gotas de agua en la punta de una sola espina. Los valores en color rojo indican el momento en que se presentó la nucleación de gotas de agua en la punta de varias espinas. Finalmente, los datos con un fondo verde representan el momento en que se empezaron a nuclear las gotas de agua sobre toda la superficie.

### 3.10 Análisis de incertidumbre

Para el cálculo de los valores aceptados superior e inferior se utilizaron las siguientes ecuaciones:

Para calcular el error absoluto se utilizó la Ec. 1

$$E_{absoluto} = x_i - \bar{x} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde

$x_i$  es el valor de cada dato medido

$\bar{x}$  es el promedio de las mediciones

Ahora con el valor del error absoluto de todas las mediciones, se calculó la incertidumbre absoluta de la siguiente manera

$$S = \sqrt{\frac{\sum_1^n x_i - \bar{x}}{n - 1}}^2 \quad \text{Ec. 2}$$

Donde

$S$  es el valor de la incertidumbre absoluta

$n$  es el número de datos que se tiene

Finalmente, con el valor de la incertidumbre se obtiene el valor aceptado, a través de la Ec.

3:

$$\text{Valor}_{\text{aceptado}} = \bar{x} \pm S \quad \text{Ec. 3}$$

El valor superior aceptado,  $UCV$ , se calculó usando la Ec. 4:

$$UCV = \bar{x} + S \quad \text{Ec. 4}$$

El valor inferior aceptado,  $LCV$ , se calculó usando la Ec. 5:

$$LCV = \bar{x} - S \quad \text{Ec. 5}$$

Para el cálculo de la desviación media se usó la Ec. 6:

$$D_{\bar{x}} = \frac{\sum_1^n x_i - \bar{x}}{n} \quad \text{Ec. 6}$$

Donde

$D_{\bar{x}}$  es la desviación media

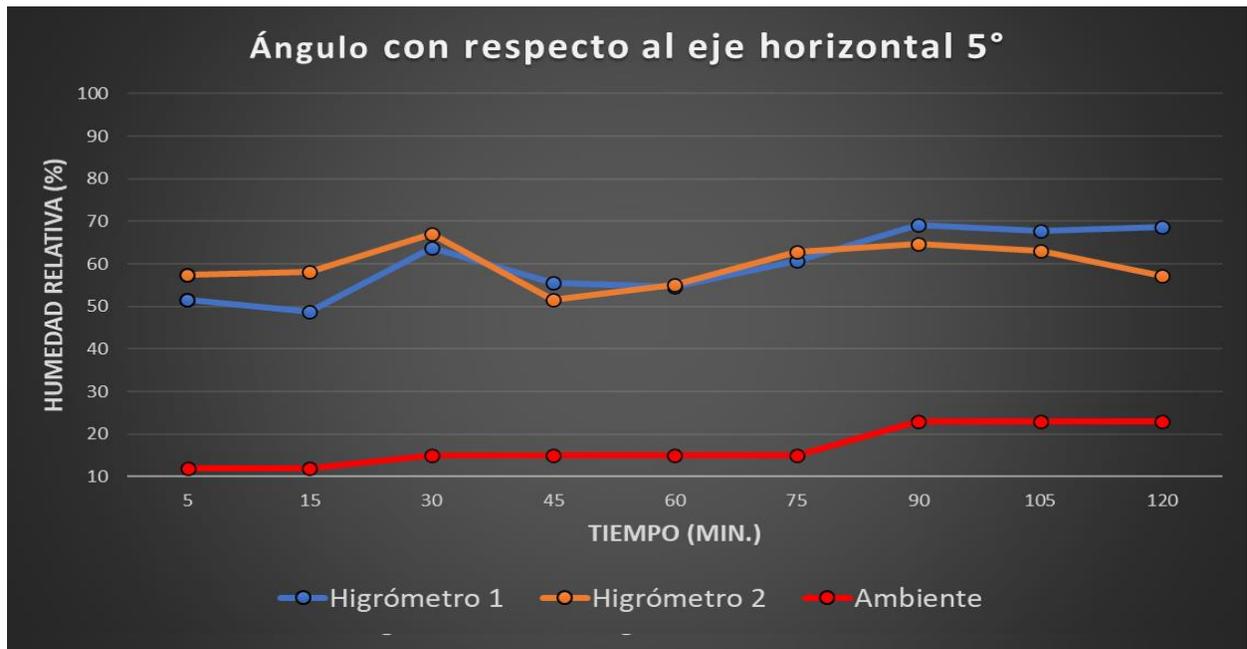
Este procedimiento se realizó para todas las pruebas de ambos arreglos, las tablas de todos los datos obtenidos se pueden ver en el Anexo 1.1.

# Capítulo 4

## Análisis de resultados

#### 4.1 Comportamiento de la humedad relativa

En la Figura 29 se muestra el comportamiento típico de la humedad relativa del aire medida con los higrómetros 1 y 2 en el interior de la celda de visualización. Estos valores se comparan con el mismo parámetro medido en el medio ambiente. Se puede observar que el comportamiento de la humedad relativa medida por ambos higrómetros no es constante, esto debido a la dificultad que representa el mantenerla dentro de la celda de visualización, sumado al hecho de que la humedad relativa del ambiente variaba respecto al tiempo. Por otro lado, se aprecia que pese a que ambos higrómetros estén prácticamente bajo las mismas condiciones dentro de la celda de visualización, estos presentan variaciones en las mediciones de la humedad relativa, aunque es posible notar que dichas variaciones van casi de acuerdo con los cambios de humedad en el ambiente.



**Figura 29** Comportamiento de la humedad relativa en la celda de visualización y en el ambiente.

Las Figuras en las que se grafican todos los datos obtenidos se pueden ver en el Anexo 1.2.

Por otro lado, se hizo una comparativa del desempeño de la superficie en la nucleación de gotas de agua en base al ángulo en que se encontraba. Para ello se estableció un coeficiente de

captación de humedad,  $\zeta$ , cuyo valor se obtuvo en base a los porcentajes mostrados en la Tabla 5, los cuales se propusieron a partir de lo observado en las pruebas.

**Tabla 5** *Distribución de porcentajes para calcular el coeficiente de captación de humedad,  $\zeta$ .*

<b>Nucleación de las gotas de agua en</b>	<b>Porcentaje %</b>
<b>Una espina</b>	40
<b>Más de una espina</b>	50
<b>Superficie</b>	10

Se decidió darle estos valores porcentuales a la nucleación de gotas que se observaron por las siguientes razones. Se consideró la de mayor importancia cuando ocurre la nucleación de gotas en la punta de más de una espina porque es el principal mecanismo de captación de humedad por parte de la superficie. Por el contrario, la de menor importancia se consideró cuando ocurre la nucleación de gotas sobre toda la superficie ya que es lo mínimo esperado. Además, estos porcentajes dependerán del tiempo en que hayan ocurrido, obteniendo el porcentaje máximo de cada nucleación si esta ocurre en un tiempo de 0 a 5 minutos, mientras que será un valor nulo cuando ocurre a los 120 minutos. Además, se consideró la distancia que había de la entrada de la neblina hasta las espinas, y tomando en cuenta que si la nucleación de gotas ocurre a una mayor distancia responde mejor la superficie, se multiplicó el coeficiente de captación de humedad por un porcentaje, siendo del 50 % a una distancia de 5 cm y del 150 % a una distancia de 15 cm. Los resultados se presentan en la Tabla 6.

**Tabla 6** Cálculo del coeficiente de captación de humedad.

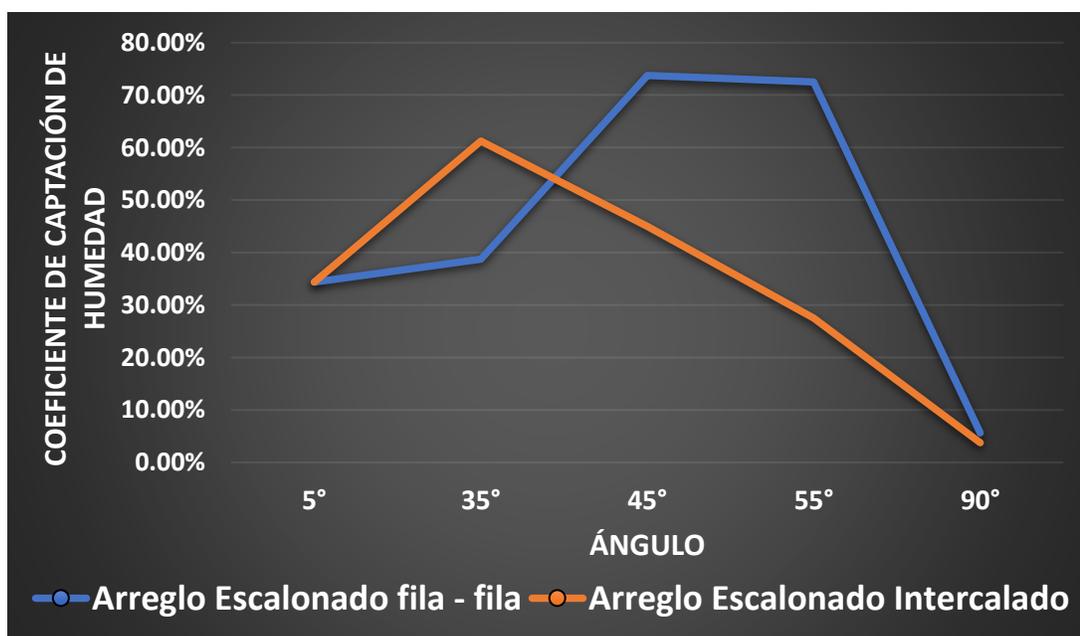
<b>Arreglo escalonado fila - fila</b>						
Angulo	Una espina	Más de una espina	Superficie	Coeficiente	Distancia	Coeficiente
5°	5 min	60 min	75 min	68.75%	5 cm	34.38%
35°	75 min	75 min	60 min	38.75%	10 cm	38.75%
45°	15 min	45 min	30 min	73.75%	10 cm	73.75%
55°	5 min	60 min	30 min	72.50%	10 cm	72.50%
90°	N/A	N/A	75 min	3.75%	15 cm	5.63%

La tabla representa el cálculo del coeficiente para el arreglo intercalado fila – fila. Elaboración propia.

#### 4.2 Efecto del ángulo de inclinación de la superficie

Para poder apreciar mejor el efecto que tiene el ángulo de inclinación sobre el coeficiente de captación de humedad de la superficie se presenta la Figura 30 donde se pueden ver ambos arreglos. En esta figura se ven representados gráficamente el comportamiento del arreglo escalonado fila – fila en color azul, donde podemos observar que pareciera que mientras aumenta el ángulo de inclinación, al mismo tiempo aumenta el coeficiente de captación de humedad hasta llegar a un punto crítico en el que el aumento del ángulo de inclinación genera el efecto contrario; y en el caso del arreglo escalonado intercalado, de color naranja, sucede de manera contraria.

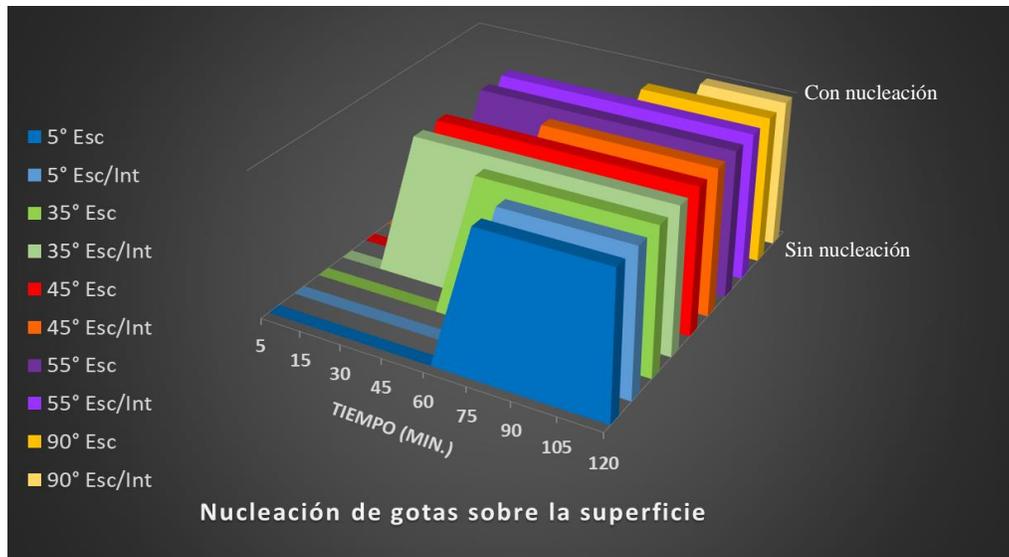
**Figura 30**  
Comparación entre los coeficientes de efectividad de nucleación obtenidos de ambos arreglos.



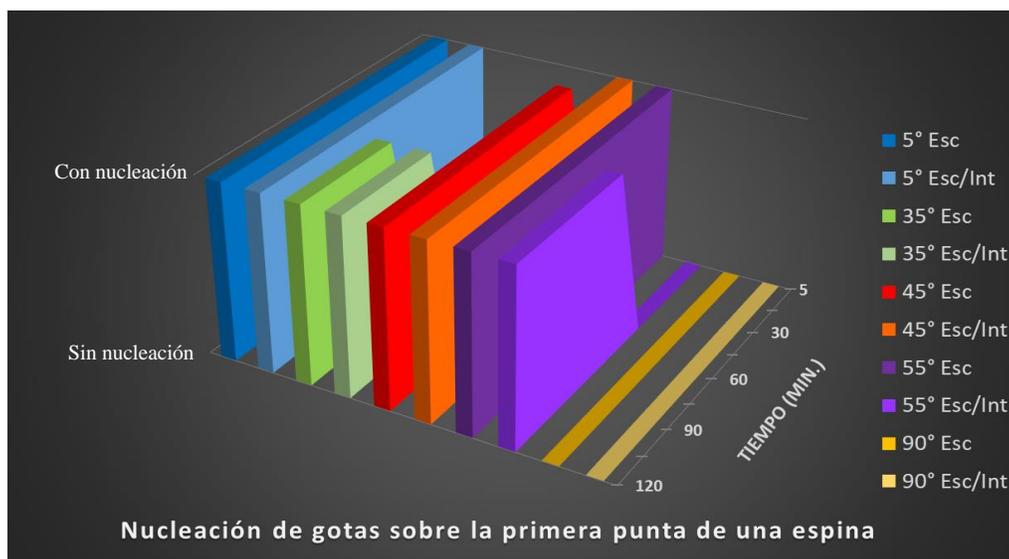
Observando la Figura 30 se puede decir que en ambos arreglos los ángulos de  $35^\circ$  y de  $45^\circ$  grados representan la contraparte del otro arreglo, respectivamente. Es posible decir que esto sucede debido a las variaciones que hay en cuanto a los arreglos, siendo que en el caso del arreglo escalonado fila – fila, se tienen filas con un solo tipo de espina, lo que genera que, en la parte media, donde el contacto con el flujo de vapor saturado es mayor, las espinas con bordes de diámetro variable sean capaces de generar una nucleación en cascada, lo que permite generar gotas de agua más grandes. Mientras que, en el arreglo escalonado intercalado, donde en la zona media presenta diferentes tipos de espinas, el efecto se ve reducido. Sin embargo, si vemos el desempeño de ambas superficies respecto al ángulo de  $55^\circ$ , podemos observar que el hecho de tener filas con espinas intercaladas representa una gran ventaja con respecto a su contraparte, y esto se le puede atribuir al efecto de capilaridad, que como fue posible de observar en la prueba realizada a ambos tipos de espinas (Figura 18), aquellas que tiene surcos con diámetro variable presentan mejor este efecto. Por otro lado, es posible también atribuir esto al hecho de que las espinas presentan ciertas irregularidades sobre sus superficies, lo que también afecta el comportamiento de ellas.

### **4.3 Comparación de los arreglos de espinas**

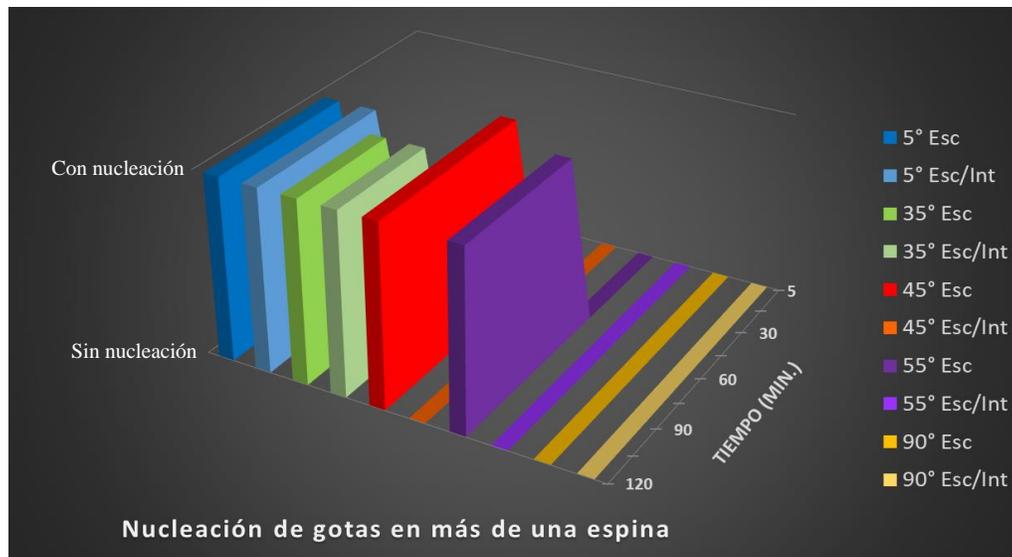
Una vez obtenidas las gráficas correspondientes a cada arreglo se procedió a ser una comparación entre los arreglos de la superficie, por lo que se generaron los siguientes gráficos.



**Figura 31** Comparación de la nucleación de gotas sobre la superficie en ambos arreglos. Se observa la diferencia entre el momento que ocurrió la nucleación de gotas sobre la superficie en ambos arreglos. Elaboración propia.



**Figura 32** Comparación de la nucleación de gotas sobre la primera punta de una espina. Se observa la diferencia entre el momento que ocurrió la nucleación de gotas sobre la primera punta de una espina en ambos arreglos. Elaboración propia.



**Figura 33** Comparación de la nucleación de gotas en más de una espina. Se observa la diferencia entre el momento que ocurrió la nucleación de gotas en más de una espina en ambos arreglos. Elaboración propia.

En las Figura 31, 32 y 33, se tienen gráficos de área 3D donde se ve representado el comportamiento del tipo de nucleaciones ocurridas sobre la superficie híbrida bioinspirada, siendo la nucleación sobre la primera espina, la nucleación en más de una espina y la nucleación sobre toda la superficie respectivamente, cada una de ellas respecto al tiempo. Cuando se hace una comparación de ambos arreglos, podemos decir que ambos se comportan de manera bastante similar. El mejor desempeño lo tiene el arreglo escalonado fila – fila, ya que el coeficiente de captación de humedad con un ángulo de 55° es la determinante para posicionarlo por delante del otro arreglo.

Para hacer esta comparación, no se tomó en cuenta la cantidad de agua recolectada durante las pruebas, ya que en todos los casos la cantidad de agua que se pudo recolectar, correspondiente únicamente a la que se encontraba en el depósito de agua, fue menor a 2.5 ml durante el periodo de 2 horas, por lo que al no tenerse un instrumento para medir con mayor precisión la cantidad de agua recolectada, se despreció el dato al momento de calcular las eficiencias. Este hecho puede

deberse a que la salida de vapor saturado no era la adecuada para abarcar por completo el área de la superficie híbrida bioinspirada, siendo que el vapor si bien insidía sobre las puntas de las primeras espinas en un determinado radio, aquellas fuera de este solo se veían rodeadas por el vapor, pero las puntas no se veían en contacto directo con este. Por otro lado, no todas las gotas de agua generadas sobre la superficie de las espinas eran transportadas por completo hacia el recipiente, siendo que varias de ellas, de un tamaño relativamente pequeño, se quedaban adheridas sobre las irregularidades de la superficie, y finalmente el hecho de no contar con una sustancia hidrofílica, generaba que la sustancia hidrofóbica permitiera una nucleación adecuada, pero no permitía por completo el desprendimiento

Con respecto al efecto que tuvo la variación de la humedad relativa sobre el coeficiente de captación de humedad, se puede decir que con base a las tablas obtenidas de cada experimento (Anexo 1.1.1, Tabla 1 – 10), este coeficiente tiende a ser mayor conforme el porcentaje de humedad relativa aumenta, siendo que a un porcentaje del 70 %, las nucleaciones sobre la punta de las espinas y la superficie de la base ocurren de manera más rápida.

# Conclusiones

Después de haber realizado las pruebas necesarias para este proyecto y haber analizado los datos obtenidos se pudo llegar a las siguientes conclusiones:

- 1) La superficie presenta una mejor captación de humedad en los ángulos de  $45^\circ$  a  $55^\circ$ , además de que el efecto de la gravedad predomina sobre el de la capilaridad, lo que permitió que las gotas de agua se transporten más rápido de la punta hacia la base de la espina.
- 2) La aplicación del material hidrofóbico facilitó la captación de humedad y por ende la nucleación de las gotas de agua sobre las puntas de las espinas. Sin embargo, esto se ve comprometido cuando la punta de la espina no está bien definida, lo que se debe a defectos en la fabricación y no a su diseño.
- 3) La aplicación del material hidrofóbico sobre la superficie de la base no contribuye al transporte de las gotas de agua, a menos que la superficie capte tal cantidad de humedad como para permitir que las gotas de agua adquieran un tamaño lo suficientemente grande para que la presión atmosférica sea superior a la presión interna de la gota y los efectos de las fuerzas de cohesión y adhesión se vean reducidos.
- 4) El diseño de la superficie híbrida actuó de acuerdo con lo que se esperaba cuando se le aplicó una fuerza externa, en este caso un flujo de aire. El diseño de la superficie evitó el desprendimiento de las gotas cuando presentaban un tamaño relativamente pequeño. Esto facilitará que cuando se tenga una gran captación de humedad, ocurra una nucleación en cadena sobre toda el área de la superficie.
- 5) El valor de la humedad relativa representa un factor decisivo para que ocurra una pronta nucleación sobre la punta de las espinas, mientras mayor sea la humedad relativa más rápida será la nucleación de gotas de agua.

En una conclusión general, podemos decir que cada una de las características del diseño de la superficie bioinspirada, las de la celda de visualización y las condiciones sobre las que se lleva a cabo el experimento, juegan un papel importante en cuanto a la captación de humedad, de modo que al variar una de ellas afecta a las demás. Las de mayor importancia son la humedad relativa, el efecto de la gravedad, la capilaridad respecto al ángulo al que se encuentre la superficie y la aplicación de un material hidrofóbico. Cuanto mayor sea la humedad relativa, el ángulo de la superficie y la cantidad de material hidrofóbico, antes de llegar a un punto crítico en el que los efectos sean contrarios o generen una constante, mayor será la capacitación de humedad y por ende la nucleación de gotas de agua.

#### Recomendaciones para trabajo futuro:

1. Se recomienda que el material hidrofóbico sea combinado con un material hidrofílico sobre la superficie de la espina para permitir un traslado más rápido de las gotas de agua de la punta de la espina hacia su base, y utilizar un material super hidrofílico sobre la base para permitir una transportación de las gotas hacia el contenedor lo más rápido posible.
2. En caso de explorar la posibilidad de utilizar otro material, se sugiere la utilización de alguno que sea fácil de moldear, de tal forma que permita una mejor definición de las características de la superficie tanto de las espinas como de la base, ya que mientras mejor se encuentran definidas las superficies, presentaran un mejor comportamiento al momento de llevar a cabo los experimentos.
3. Se necesita hacer un rediseño de la celda de visualización donde se llevarían a cabo las pruebas, esto a modo de que se explore la posibilidad de que las paredes cuenten con orificios para facilitar las condiciones propicias de humedad relativa para llevar a cabo la experimentación y evitar que ocurra una condensación no deseada en las superficies de las paredes internas; además de permitir un mejor manejo de los elementos que conforman el sistema de recolección de agua.

## Bibliografía

- Agua, C. C. (12 de Agosto de 2019). *Agua.org*. Obtenido de Agua.org.mx:  
<https://www.aguas.org.mx/sitio/blog/noticias/item/1721-mexico-en-la-ruta-de-la-escasez-de-agua.html>
- Aquaer Generator. (2016). *Aquaer Generator*. Obtenido de aquaer.com: <http://aquaer.com/es/>
- Bharat Bhushan, D. G. (18 de Octubre de 2019). *Designing bioinspired conical surfaces for water collection from*. Obtenido de ScienceDirect:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0021979719312378>
- Bhushan, B. (24 de 12 de 2018). *Bioinspired materials and surfaces for green science and technology*. Obtenido de The Royal Society Publishing:  
<https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2018.0336>
- Bitacoras.com. (12 de Febrero de 2017). *Queremos Verde*. Obtenido de  
<http://queremosverde.com/5-maneras-convertir-aire-agua/>
- Carvajal, G. (16 de Agosto de 2016). *LBV*. Obtenido de labrujulaverde.com:  
<https://www.labrujulaverde.com/2016/08/el-error-arqueologico-que-condujo-al-desarrollo-de-los-pozos-de-aire-condensadores-de-rocio>
- Chandler, D. L. (16 de Julio de 2013). *MIT News*. Obtenido de news.mit.edu:  
<https://news.mit.edu/2013/hydrophobic-and-hydrophilic-explained-0716>
- CONAGUA. (2019). *Reporte del clima en México, Reporte anual 2019*. Ciudad de México: conagua.gob.mx. Obtenido de  
<https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/Anual2019.pdf>

Consejo Consultivo del agua. (12 de Agosto de 2019). *Consejo Consultivo del Agua, A.C.*  
Obtenido de Aguas.org.mx: <https://www.aguas.org.mx/sitio/blog/noticias/item/1721-mexico-en-la-ruta-de-la-escasez-de-agua.html>

Corrosionpedia. (24 de 09 de 2019). *Saturated Steam*. Obtenido de Corrosionpedia.com:  
<https://www.corrosionpedia.com/definition/1005/saturated-steam>

Dev Gurera, B. B. (4 de Mayo de 2019). *Optimization of bioinspired conical surfaces for water collection from*. Obtenido de ScienceDirect:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0021979719305545>

Dong Song, B. B. (19 de Septiembre de 2019). *Enhancement of water collection and transport in bioinspired triangular*. Obtenido de ScienceDirect:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0021979719311117>

Dongliang Chen, J. L. (27 de Junio de 2018). *Bioinspired superhydrophilic-hydrophobic integrated surface with*. Obtenido de ScienceDirect:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S002197971830729X>

EXPANSIÓN. (04 de Mayo de 2012). *EXPANSIÓN*. Obtenido de expansion.mx:  
<https://expansion.mx/planetacnn/2012/05/04/una-turbina-de-aire-captura-agua-del-medio-ambiente-y-genera-energia>

Festo. (s.f.). *Webecoist by momtastic*. Obtenido de  
<https://webecoist.momtastic.com/2011/01/14/brilliant-bio-design-14-animal-inspired-inventions/>

Franco, J. T. (10 de Abril de 2014). *Archdaily*. Obtenido de archdaily.mx:  
<https://www.archdaily.mx/mx/02-351457/proyecto-warka-torres-de-bambu-que-recogen-agua-potable-desde-el->



OMPI. (16 de Septiembre de 2015). *Organizacion Mundial de la Propiedad Intelectual*. Obtenido de wipo.int: <https://www.wipo.int/ipadvantage/es/details.jsp?id=3108>

Queremos Verde. (s.f.). *Queremos Verde*. Obtenido de [queremosverde.com](https://queremosverde.com/5-maneras-convertir-aire-agua/): <https://queremosverde.com/5-maneras-convertir-aire-agua/>

Raimon, M. (7 de Octubre de 2017). *Infobae*. Obtenido de La máquina israelí que convierte el aire en agua potable: ¿puede solucionar un drama mundial?: <https://www.infobae.com/america/mundo/2017/10/07/la-maquina-israeli-que-convierte-el-aire-en-agua-potable-puede-solucionar-un-drama-mundial/>

Raimon, M. (7 de Octubre de 2017). *Infobae*. Obtenido de La máquina israelí que convierte el aire en agua potable: ¿puede solucionar un drama mundial?: <https://www.infobae.com/america/mundo/2017/10/07/la-maquina-israeli-que-convierte-el-aire-en-agua-potable-puede-solucionar-un-drama-mundial/>

Renom, M. (s.f.). *NUBES Y PROCESOS DE PRECIPITACION*. Obtenido de [http://meteo.fisica.edu.uy/Materias/El\\_Sistema\\_Climatico/Teorico\\_El\\_Sistema\\_Climatico/Nubes.pdf](http://meteo.fisica.edu.uy/Materias/El_Sistema_Climatico/Teorico_El_Sistema_Climatico/Nubes.pdf)

Rutger Willem Hofste, P. R. (06 de Agosto de 2019). *Word Resources Institute*. Obtenido de [wri.org](https://www.wri.org/blog/2019/08/17-countries-home-one-quarter-world-population-face-extremely-high-water-stress): <https://www.wri.org/blog/2019/08/17-countries-home-one-quarter-world-population-face-extremely-high-water-stress>

Simbiotia. (s.f.). *Simbiotia*. Obtenido de [Simbiotia.com](https://www.simbiotia.com/biomimesis/): <https://www.simbiotia.com/biomimesis/>

Society, N. G. (21 de Enero de 2011). *National Geographic*. Obtenido de [nationalgeographic.com](https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/humidity/): <https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/humidity/>

Sun Woo Kima, J. K. (17 de Enero de 2020). *Enhanced water collection of bio-inspired functional surfaces in high-speed*. Obtenido de ScienceDirect:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916419318247>

Yanling Wan, P. C. (22 de Agosto de 2019). *Directional water-collecting behavior of pine needle surface*. Obtenido de ScienceDirect:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167577X19311760#:~:text=Results%20show%20that%20water%20droplets,gradient%20present%20on%20the%20surface.>

youthinkgreen. (s.f.). *youthinkgreen*. Obtenido de youthinkgreen.org:

<http://www.youthinkgreen.org/en/projekte/the-fog-catcher-project/>

Zoe L., M. G. (s.f.). *GTAC*. Obtenido de The dew bank bottle and namib beetle – In the news:

<https://www.gtac.edu.au/the-dew-bank-bottle-and-namib-beetle-in-the-news/>

## Anexo

### 1.1 Tablas de recopilación de datos de ambos arreglos

En las tabla podemos apreciar los valores obtenidos en cada intervalo de tiempo, además de ello se observan valores en color azul, que indican el momento en que se presentó la nucleación de gotas de agua en la punta de una sola espina; otros valores en color rojo, que indican el momento en que se presentó la nucleación de gotas de agua en la punta varias espinas; y finalmente los datos con un fondo verde representan el momento en que se empezaron a nuclear gotas de agua sobre toda la superficie; en algunos casos estos 3 valores pueden coincidir. Además, se agregan los valores aceptados superior e inferiores calculados por medio de la incertidumbre absoluta.

#### 1.1.1 Tablas de datos del arreglo escalonado fila – fila

**Tabla 1** Arreglo escalonado fila – fila a un ángulo de 5°

<b>Arreglo escalonado fila - fila</b>						
<b>Ángulo con respecto al eje horizontal 5°</b>						
Condiciones ambientales iniciales			T (°C)	22	% HR	12
Tiempo (min)	Higrómetro 1		Higrómetro 2		Ambiente	
	T (°C)	% HR	T (°C)	% HR	T (°C)	% HR
5	16.5	51.5	24.2	57.4	22	12
15	15.6	48.8	24.1	58.2	22	12
30	17.7	63.8	23.8	67.1	23	15
45	16.4	55.6	23.3	51.6	23	15
60	16	54.6	23.1	55.1	22	15
75	16.6	60.7	22.8	62.8	21	15
90	17.7	69.2	23.3	64.7	20	23
105	17.5	67.7	23.1	63.1	20	23
120	17.5	68.6	22.2	57.2	20	23
<b>Promedio</b>	16.83	60.06	23.32	59.69	21.44	17.00
<b>Sum. E. Absoluto</b>	6.1	59.4	4.3	37.9	9.6	36.0
<b>Incertidumbre absoluta</b>	0.79	7.74	0.64	5.02	1.24	4.66
<b>Desviación media</b>	0.68	6.60	0.47	4.21	1.06	4.00
<b>UCV</b>	17.62	67.79	23.96	64.71	22.68	21.66
<b>LCV</b>	16.05	52.32	22.69	54.67	20.21	12.34

**Tabla 2 Arreglo escalonado fila – fila a un ángulo de 35°**

Ángulo con respecto al eje horizontal 35°						
Condiciones ambientales iniciales			T (°C)	25	% HR	6
	Higrómetro 1		Higrómetro 2		Ambiente	
Tiempo (min)	T (°C)	% HR	T (°C)	% HR	T (°C)	% HR
5	18.4	66.3	24.1	65.2	25	6
15	15.7	51.3	23.3	55.5	25	6
30	18.8	81.1	21.8	78.4	25	6
45	19.1	85.4	21.2	68.4	25	6
60	19.1	87.3	20.9	72.5	24	6
75	19.2	88.1	21.1	71.8	24	6
90	19.1	88.1	21	74.6	24	6
105	19.4	89.7	21.2	83.4	24	6
120	19.4	89.6	21.3	78.5	20	14
Promedio	18.69	80.77	21.77	72.03	24.00	6.89
Sum. E. Absoluto	6.6	87.9	7.8	54.5	8.0	14.2
Incertidumbre absoluta	1.16	13.26	1.14	8.30	1.58	2.67
Desviación media	0.73	9.76	0.87	6.05	0.89	1.58
UCV	19.85	94.03	22.91	80.34	25.58	9.56
LCV	17.53	67.50	20.62	63.73	22.42	4.22

**Tabla 3 Arreglo escalonado fila – fila a un ángulo de 45°**

Ángulo con respecto al eje horizontal 45°						
Condiciones ambientales iniciales			T (°C)	24	% HR	21
	Higrómetro 1		Higrómetro 2		Ambiente	
Tiempo (min)	T (°C)	% HR	T (°C)	% HR	T (°C)	% HR
5	19.5	74.3	23.4	80.2	24	21
15	18.3	66.5	22.2	62.2	24	21
30	16.5	63.1	21.4	51.7	24	21
45	15.9	57.5	21.6	59.7	22	26
60	18.1	74.6	21.9	85.5	22	26
75	18.4	78.1	21.5	84	22	26
90	17.7	73.4	21.1	77.5	21	30
105	18.7	81.1	21	76.9	21	30
120	18.8	82.9	22.2	93.4	21	30
Promedio	17.99	72.39	21.81	74.57	22.33	25.67
Sum. E. Absoluto	7.7	60.1	4.9	100.2	10.0	28.0
Incertidumbre absoluta	1.14	8.45	0.73	13.72	1.32	3.91
Desviación media	0.86	6.68	0.55	11.13	1.11	3.11
UCV	19.13	80.84	22.55	88.29	23.66	29.57
LCV	16.85	63.94	21.08	60.85	21.01	21.76

**Tabla 4 Arreglo escalonado fila – fila a un ángulo de 55°**

Ángulo con respecto al eje horizontal 55°						
Condiciones ambientales iniciales			T (°C)	24	% HR	23
	Higrómetro 1		Higrómetro 2		Ambiente	
Tiempo (min)	T (°C)	% HR	T (°C)	% HR	T (°C)	% HR
5	15.9	54.6	23.9	56.7	24	23
15	15.6	54.4	23.3	68.4	24	23
30	14.4	46.8	22.7	58.7	24	20
45	15.1	50.2	22.9	67.1	25	16
60	15.1	50.7	22.7	72.8	25	16
75	15.6	54.2	22.7	73.1	25	16
90	15.4	52.9	22.6	70.4	25	16
105	17.2	65.5	22.8	72.3	25	16
120	18	79.4	21.5	77.6	26	13
Promedio	15.81	56.52	22.79	68.57	24.78	17.67
Sum. E. Absoluto	7.3	63.7	3.5	46.7	4.7	26.0
Incertidumbre absoluta	1.12	9.99	0.64	6.87	0.67	3.50
Desviación media	0.81	7.08	0.39	5.19	0.52	2.89
UCV	16.93	66.52	23.42	75.44	25.44	21.17
LCV	14.69	46.53	22.15	61.70	24.11	14.17

**Tabla 5** Arreglo escalonado fila – fila a un ángulo de 90°

Ángulo con respecto al eje horizontal 90°						
Condiciones ambientales iniciales			T (°C)		% HR	
	Higrómetro 1		Higrómetro 2		Ambiente	
Tiempo (min)	T (°C)	% HR	T (°C)	% HR	T (°C)	% HR
5	17.8	65.8	23.2	74.6	25	10
15	17.1	61.6	23.1	74.6	25	10
30	17.5	67.1	22.5	67.2	25	9
45	14.8	47.3	21.9	69.6	25	9
60	14.4	44.9	22.2	80.6	26	9
75	16.9	66.1	21.9	65.4	26	9
90	18.1	70	22.3	69.2	26	9
105	16.8	59.1	22.5	67.5	26	8
120	18.1	68.4	22.6	73.8	26	8
<b>Promedio</b>	16.83	61.14	22.47	71.39	25.56	9.00
<b>Sum. E. Absoluto</b>	9.0	64.3	3.1	36.1	4.4	4.0
<b>Incertidumbre absoluta</b>	1.36	9.17	0.46	4.85	0.53	0.71
<b>Desviación media</b>	1.00	7.14	0.35	4.01	0.49	0.44
<b>UCV</b>	<b>18.19</b>	<b>70.31</b>	<b>22.93</b>	<b>76.23</b>	<b>26.08</b>	<b>9.71</b>
<b>LCV</b>	<b>15.48</b>	<b>51.97</b>	<b>22.01</b>	<b>66.54</b>	<b>25.03</b>	<b>8.29</b>

### 1.1.2 Tablas de datos del arreglo escalonado intercalado

**Tabla 6** Arreglo escalonado intercalado a un ángulo de 5°

Ángulo con respecto al eje horizontal 5°						
Condiciones ambientales iniciales			T (°C)		% HR	
	Higrómetro 1		Higrómetro 2		Ambiente	
Tiempo (min)	T (°C)	% HR	T (°C)	% HR	T (°C)	% HR
5	9.5	59.4	13.5	69.3	11	21
15	9.8	61.1	13.6	70.2	11	21
30	9.9	61.3	13.6	71.1	11	21
45	9.6	60.4	12.7	68.9	11	21
60	9.1	58.6	12.8	70.5	11	21
75	8.4	59.2	11.1	68.4	10	23
90	8.7	63.9	11.5	73.2	10	23
105	9.1	65.4	12.0	76.5	9	23
120	8.8	60.9	11.4	72.3	9	26
<b>Promedio</b>	9.21	61.13	12.47	71.16	10.33	22.22
<b>Sum. E. Absoluto</b>	3.9	14.4	7.7	17.1	6.7	12.2
<b>Incertidumbre absoluta</b>	0.52	2.23	1.00	2.54	0.87	1.72
<b>Desviación media</b>	0.43	1.60	0.86	1.90	0.74	1.36
<b>UCV</b>	<b>9.73</b>	<b>63.36</b>	<b>13.46</b>	<b>73.69</b>	<b>11.20</b>	<b>23.94</b>
<b>LCV</b>	<b>8.69</b>	<b>58.91</b>	<b>11.47</b>	<b>68.62</b>	<b>9.47</b>	<b>20.51</b>

**Tabla 7** Arreglo escalonado intercalado a un ángulo de 35°

Ángulo con respecto al eje horizontal 35°						
Condiciones ambientales iniciales			T (°C)	21	% HR	25
	Higrómetro 1		Higrómetro 2		Ambiente	
Tiempo (min)	T (°C)	% HR	T (°C)	% HR	T (°C)	% HR
5	18.9	66.5	24	87.2	21	25
<b>15</b>	<b>16.8</b>	<b>59.1</b>	<b>22.9</b>	<b>79.8</b>	<b>21</b>	<b>25</b>
30	16.9	64.8	22.2	85.2	21	23
45	17	68.3	21.7	83.2	21	23
60	17.2	70.6	22.2	92.2	20	23
<b>75</b>	<b>17.1</b>	<b>70.7</b>	<b>20.7</b>	<b>67.1</b>	<b>20</b>	<b>25</b>
90	16.5	65.8	21	70.1	20	25
105	16.2	64.9	20.8	72.6	20	25
120	16.6	72.1	21.1	82.9	20	25
<b>Promedio</b>	17.02	66.98	21.84	80.03	20.44	24.33
<b>Sum. E. Absoluto</b>	4.3	27.6	7.8	61.1	4.4	8.0
<b>Incertidumbre absoluta</b>	0.77	4.00	1.10	8.41	0.53	1.00
<b>Desviación media</b>	0.47	3.06	0.87	6.79	0.49	0.89
<b>UCV</b>	<b>17.79</b>	<b>70.97</b>	<b>22.95</b>	<b>88.44</b>	<b>20.97</b>	<b>25.33</b>
<b>LCV</b>	<b>16.25</b>	<b>62.98</b>	<b>20.74</b>	<b>71.63</b>	<b>19.92</b>	<b>23.33</b>

**Tabla 8** Arreglo escalonado intercalado a un ángulo de 45°

Ángulo con respecto al eje horizontal 45°						
Condiciones ambientales iniciales			T (°C)	22	% HR	21
	Higrómetro 1		Higrómetro 2		Ambiente	
Tiempo (min)	T (°C)	% HR	T (°C)	% HR	T (°C)	% HR
<b>5</b>	<b>20.8</b>	<b>85.9</b>	<b>25</b>	<b>95.8</b>	<b>22</b>	<b>21</b>
15	19.6	37.6	24.5	53.1	21	21
30	14.6	41.8	25.2	68.2	21	21
45	14.8	43.2	25.9	73.9	21	21
60	14.6	42.3	26	75	21	21
75	20.2	88.3	25.8	98.6	20	21
90	16.1	53.1	26.1	58.3	20	23
105	17.3	59.4	26.3	76.2	19	23
120	18.4	58.6	25.4	74.5	19	23
<b>Promedio</b>	17.38	56.69	25.58	74.84	20.44	21.67
<b>Sum. E. Absoluto</b>	19.0	130.9	4.4	92.4	7.6	8.0
<b>Incertidumbre absoluta</b>	2.48	18.88	0.59	14.99	1.01	1.00
<b>Desviación media</b>	2.11	14.54	0.49	10.27	0.84	0.89
<b>UCV</b>	<b>19.86</b>	<b>75.57</b>	<b>26.17</b>	<b>89.83</b>	<b>21.46</b>	<b>22.67</b>
<b>LCV</b>	<b>14.89</b>	<b>37.81</b>	<b>24.99</b>	<b>59.86</b>	<b>19.43</b>	<b>20.67</b>

**Tabla 9** Arreglo escalonado intercalado a un ángulo de 55°

Ángulo con respecto al eje horizontal 55°						
Condiciones ambientales iniciales			T (°C)	24	% HR	14
	Higrómetro 1		Higrómetro 2		Ambiente	
Tiempo (min)	T (°C)	% HR	T (°C)	% HR	T (°C)	% HR
5	18.1	69.4	22.4	58.4	24	14
15	16.2	59.9	22.2	71.8	24	14
30	16.3	66.5	21.1	79.7	24	14
45	16.5	64.7	20.8	70.2	24	14
<b>60</b>	<b>16.1</b>	<b>58.5</b>	<b>21.3</b>	<b>70.5</b>	<b>24</b>	<b>14</b>
75	17.4	70.7	21.1	80.3	23	14
90	18	74.9	21.3	84.1	23	14
105	17.9	72.9	21.1	78.6	23	14
120	16.6	64.1	21	78.8	23	14
<b>Promedio</b>	17.01	66.84	21.37	74.71	23.56	14.00
<b>Sum. E. Absoluto</b>	6.7	41.0	3.7	55.9	4.4	0.0
<b>Incertidumbre absoluta</b>	0.83	5.62	0.55	7.82	0.53	0.00
<b>Desviación media</b>	0.75	4.56	0.41	6.21	0.49	0.00
<b>UCV</b>	<b>17.84</b>	<b>72.47</b>	<b>21.92</b>	<b>82.53</b>	<b>24.08</b>	<b>14.00</b>
<b>LCV</b>	<b>16.18</b>	<b>61.22</b>	<b>20.81</b>	<b>66.90</b>	<b>23.03</b>	<b>14.00</b>

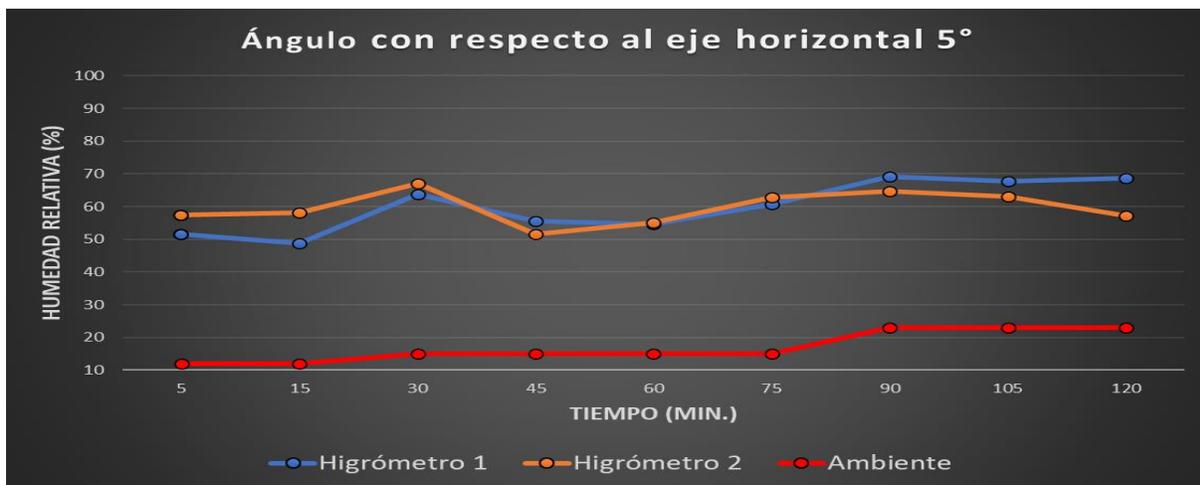
**Tabla 10** Arreglo escalonado intercalado a un ángulo de 90°

Ángulo con respecto al eje horizontal 90°						
Condiciones ambientales iniciales			T (°C)	21	% HR	13
	Higrómetro 1		Higrómetro 2		Ambiente	
Tiempo (min)	T (°C)	% HR	T (°C)	% HR	T (°C)	% HR
5	16.1	51.8	23.3	68.4	21	13
15	15.6	50.3	23.3	71.9	21	13
30	16.1	67.2	22.5	83.4	21	13
45	15	48.4	22.4	72.3	19	13
60	15.5	53.4	21.6	68.5	19	13
75	16	55.6	21.5	82.7	18	16
90	16.2	59.7	21.7	88.7	18	16
105	16.9	65.5	21.9	69.5	16	16
120	16.1	58.3	22.2	79.5	16	16
<b>Promedio</b>	15.94	56.69	22.27	76.10	18.78	14.33
<b>Sum. E. Absoluto</b>	3.5	47.9	4.9	59.8	14.2	13.3
<b>Incertidumbre absoluta</b>	0.53	6.57	0.68	7.58	1.99	1.58
<b>Desviación media</b>	0.39	5.32	0.54	6.64	1.58	1.48
<b>UCV</b>	<b>16.48</b>	<b>63.26</b>	<b>22.95</b>	<b>83.68</b>	<b>20.76</b>	<b>15.91</b>
<b>LCV</b>	<b>15.41</b>	<b>50.12</b>	<b>21.59</b>	<b>68.52</b>	<b>16.79</b>	<b>12.75</b>

## 1.2 Graficas de comparación de humedad relativa de ambos arreglos

Se puede apreciar las tomas de datos de humedad relativa correspondientes con ambos higrómetros y de las condiciones ambientales, respecto a su cambio en el tiempo, las barras con contorno azul representan el momento en que se núcleo la primera gota sobre una espina.

### 1.2.1 Graficas del arreglo escalonado fila – fila



**Figura 1** Arreglo escalonado fila -fila a un ángulo de 5°

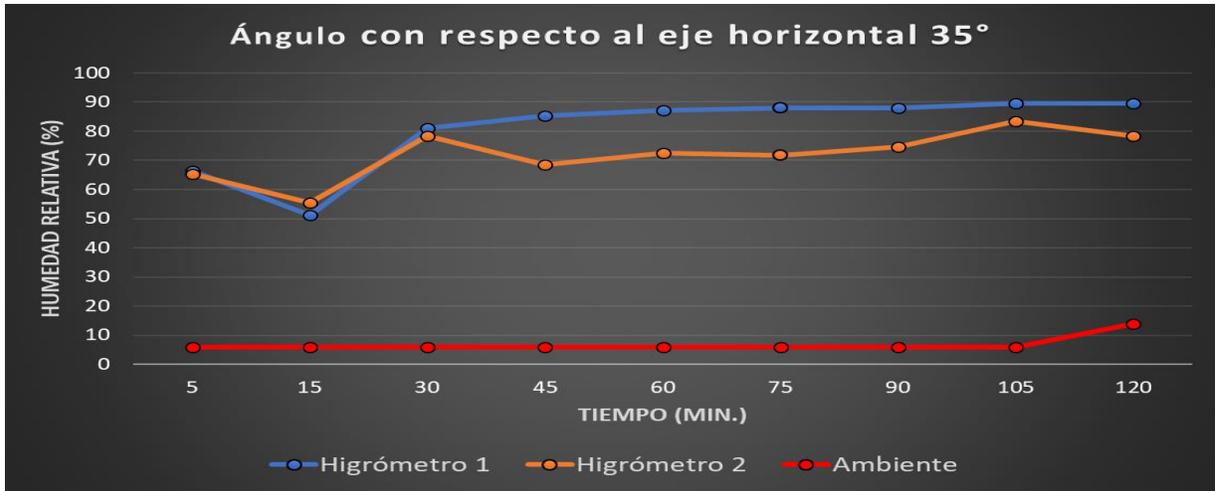


Figura 2 Arreglo escalonado fila -fila a un ángulo de 35°

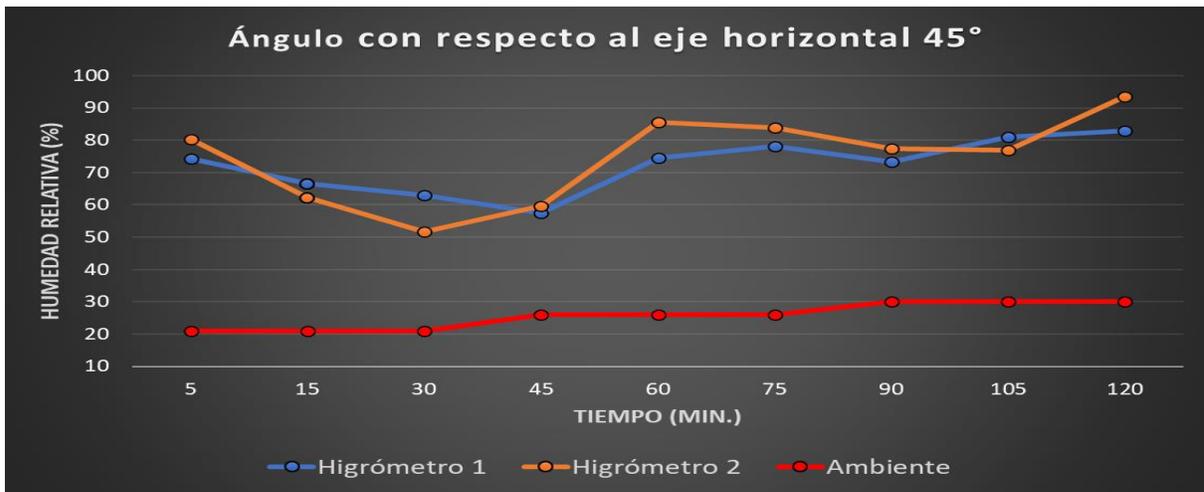


Figura 3 Arreglo escalonado fila -fila a un ángulo de 45°

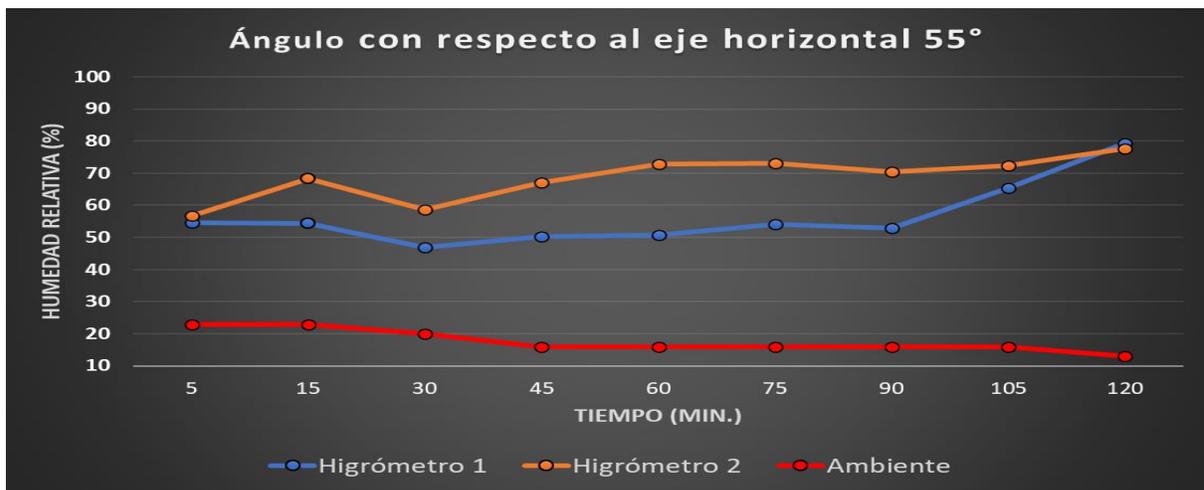


Figura 4 Arreglo escalonado fila -fila a un ángulo de 55°

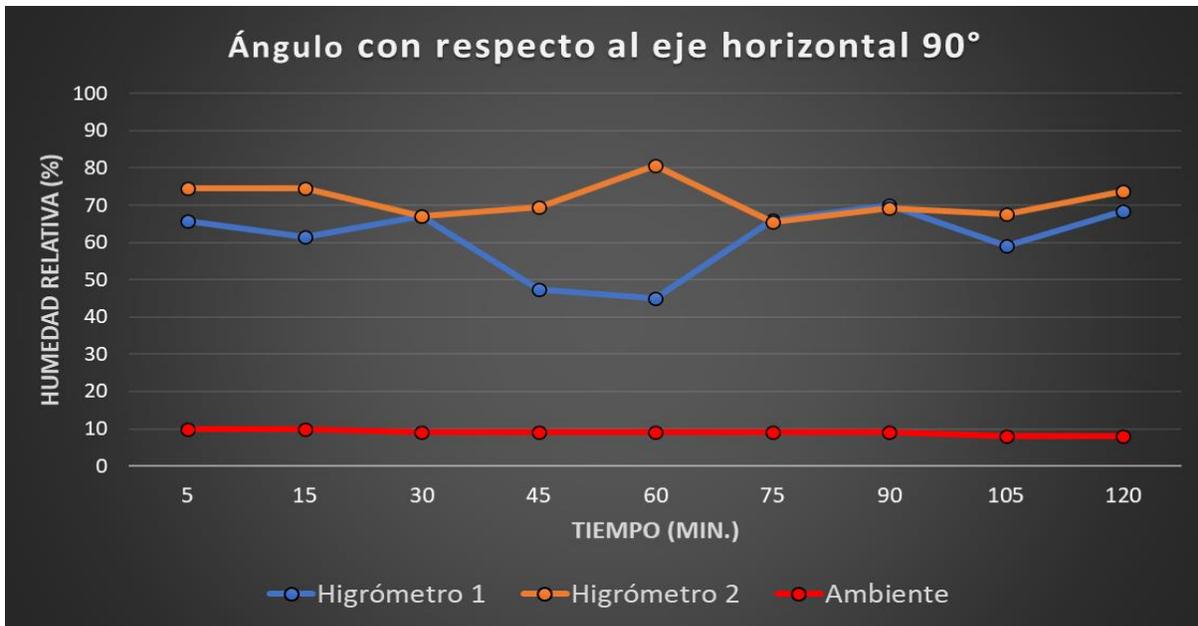


Figura 5 Arreglo escalonado fila -fila a un ángulo de 90°

### 1.2.2 Graficas del arreglo escalonado intercalado

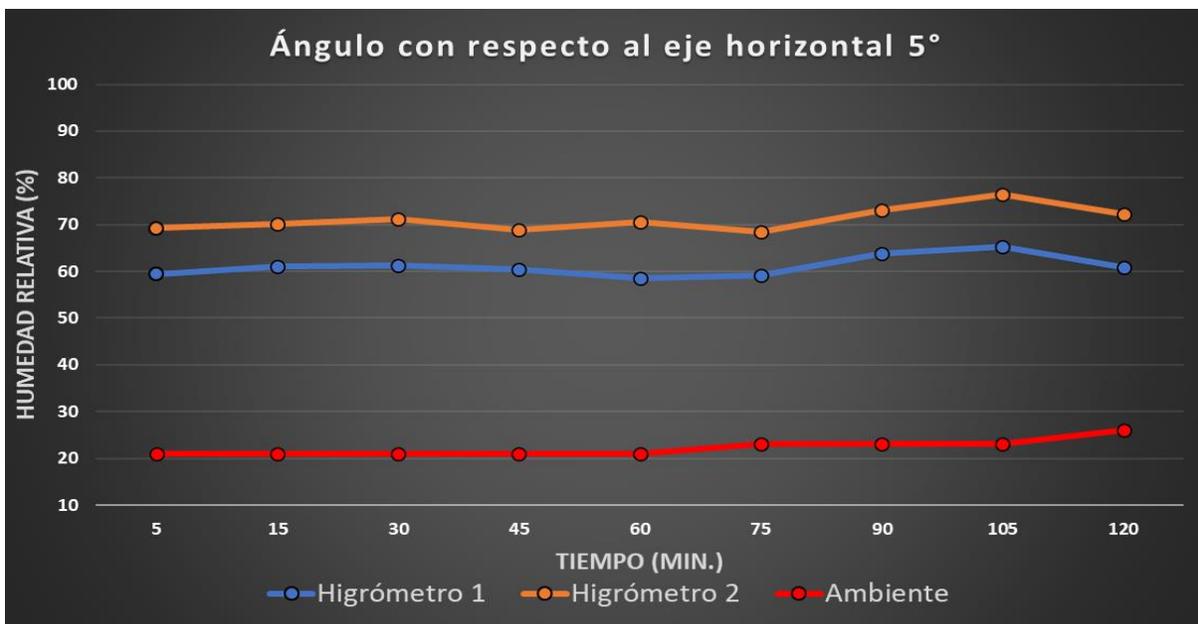


Figura 6 Arreglo escalonado intercalado a un ángulo de 5°

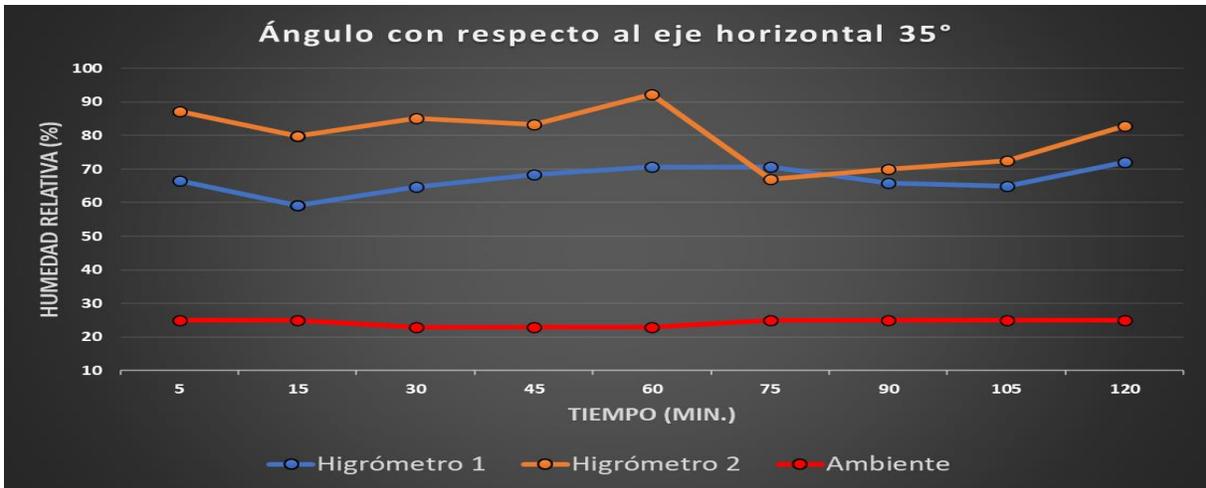


Figura 7 Arreglo escalonado intercalado a un ángulo de 35°

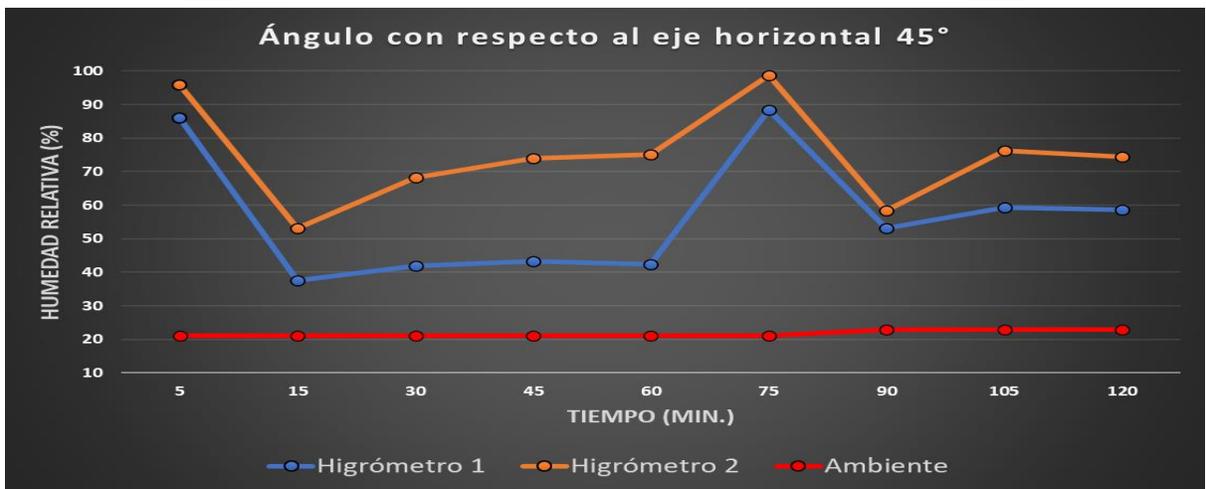


Figura 8 Arreglo escalonado intercalado a un ángulo de 45°

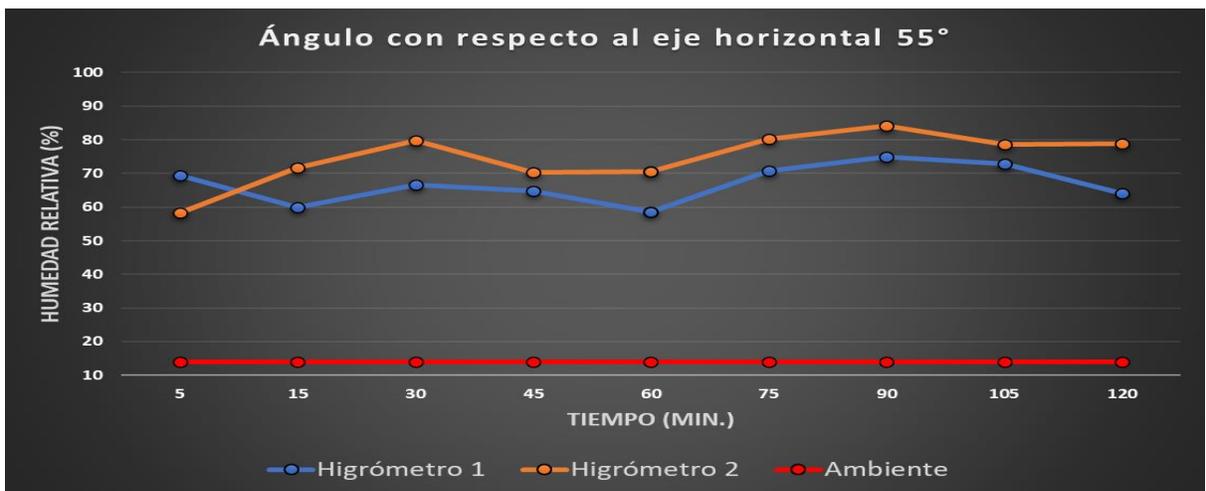


Figura 9 Arreglo escalonado intercalado a un ángulo de 55°

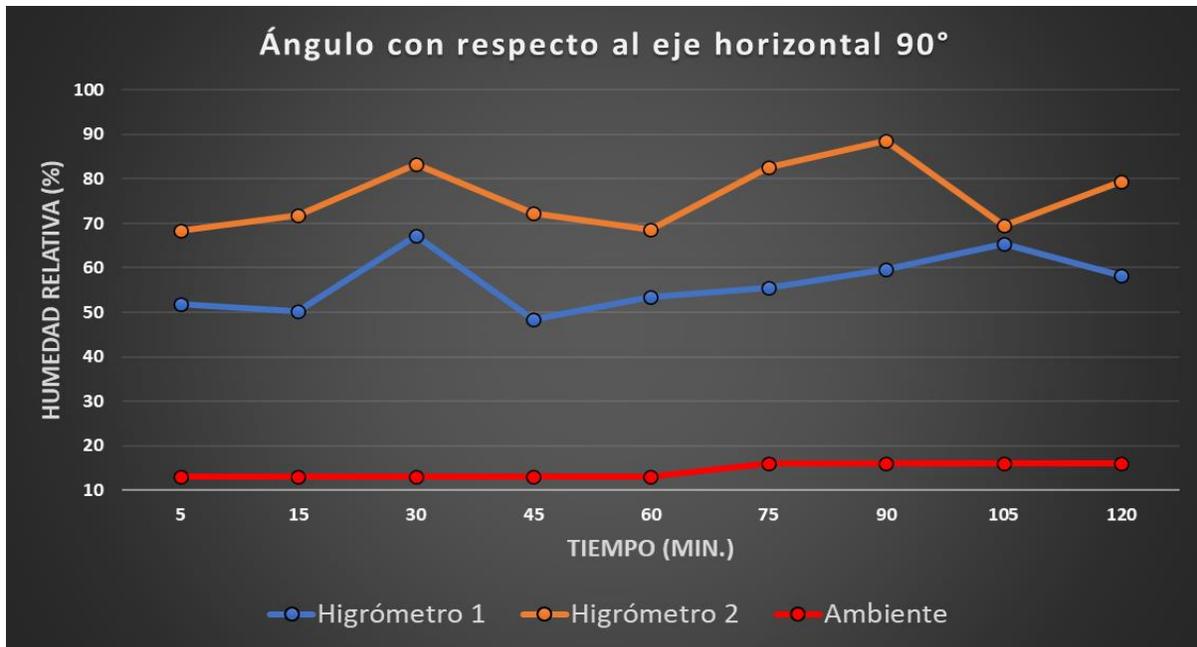


Figura 10 Arreglo escalonado intercalado a un ángulo de 90°

### 1.3 Tablas y graficas de cálculo del coeficiente de efectividad de nucleación de ambos arreglos

#### 1.3.1 Arreglo escalonado fila – fila

Tabla 11 Cálculo del coeficiente de efectividad de nucleación del arreglo escalonado fila -fila

Arreglo escalonado fila - fila						
Angulo	Una espina	Más de una espina	Superficie	Coeficiente	Distancia	Coeficiente
5°	5 min	60 min	75 min	68.75%	5 cm	34.38%
35°	75 min	75 min	60 min	38.75%	10 cm	38.75%
45°	15 min	45 min	30 min	73.75%	10 cm	73.75%
55°	5 min	60 min	30 min	72.50%	10 cm	72.50%
90°	N/A	N/A	75 min	3.75%	15 cm	5.63%

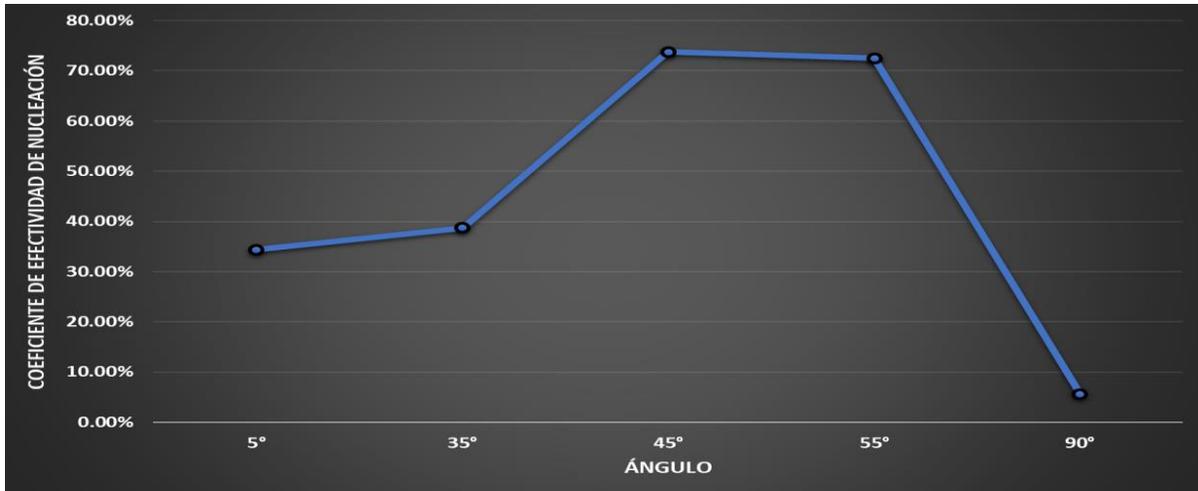


Figura 11 Gráfico del coeficiente de efectividad de nucleación del arreglo escalonado fila – fila.

### 1.3.2 Arreglo escalonado intercalado

Tabla 12 Cálculo del coeficiente de efectividad de nucleación del arreglo escalonado intercalado

Arreglo escalonado intercalado						
Angulo	Una espina	Más de una espina	Superficie	Coeficiente	Distancia	Coeficiente
5°	5 min	60 min	75 min	68.75%	5 cm	34.38%
35°	15 min	75 min	30 min	61.25%	10 cm	61.25%
45°	5 min	N/A	60 min	45.00%	10 cm	45.00%
55°	60 min	N/A	30min	27.50%	10 cm	27.50%
90°	N/A	N/A	90 min	2.5%	15 cm	3.75%

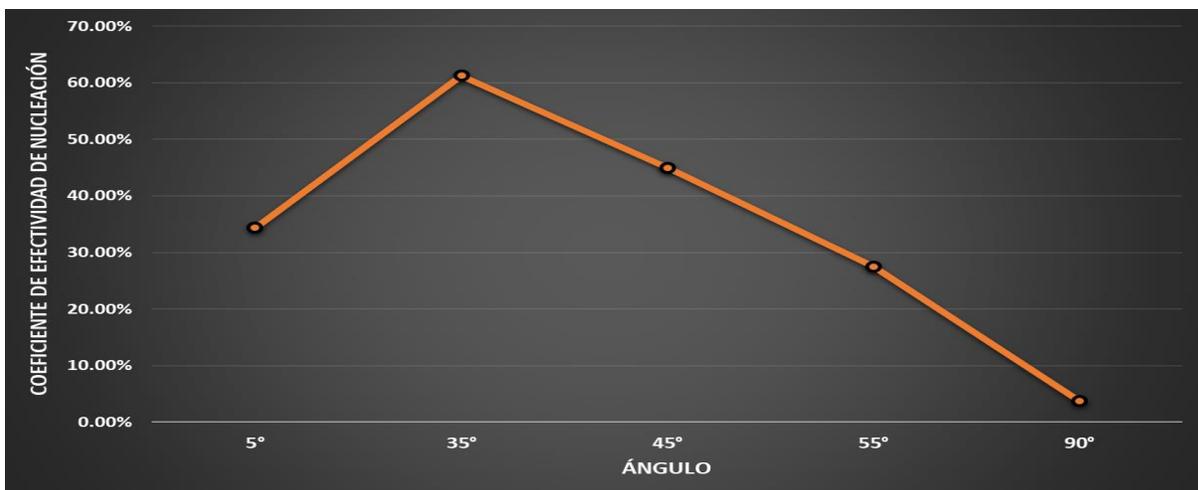


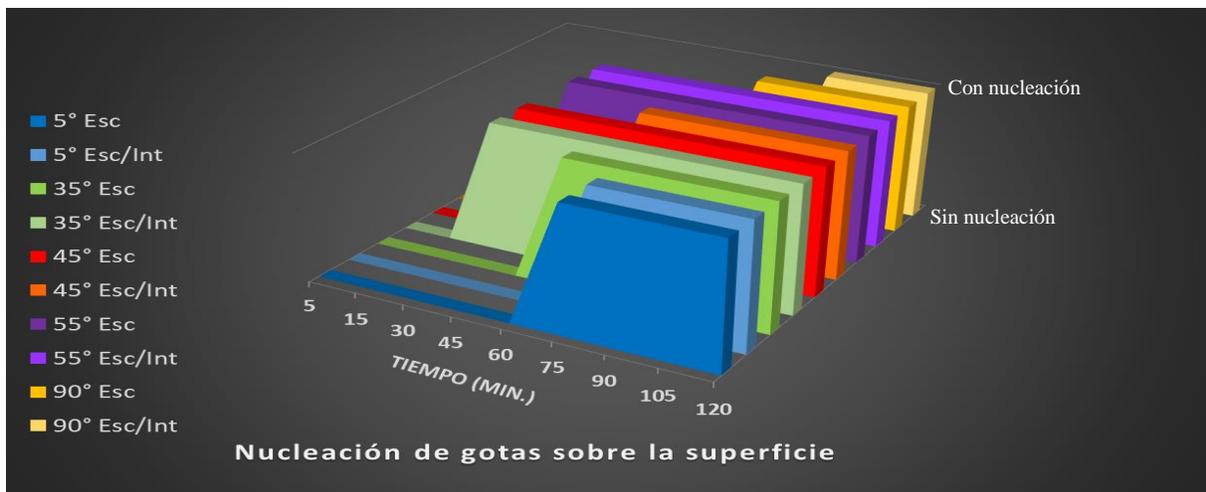
Figura 12 Gráfico del coeficiente de efectividad de nucleación del arreglo escalonado intercalado.

#### 1.4 Tablas y gráficas de comparación de ambos arreglos.

Para poder llevar a cabo la comparación de los tipos de nucleaciones ocurridas en la superficie de ambos arreglos, se decidió usar valores nominales binarios para poder realizar las gráficas de comparación.

**Tabla 13** Comparación de la nucleación de gotas sobre la superficie en ambos arreglos.

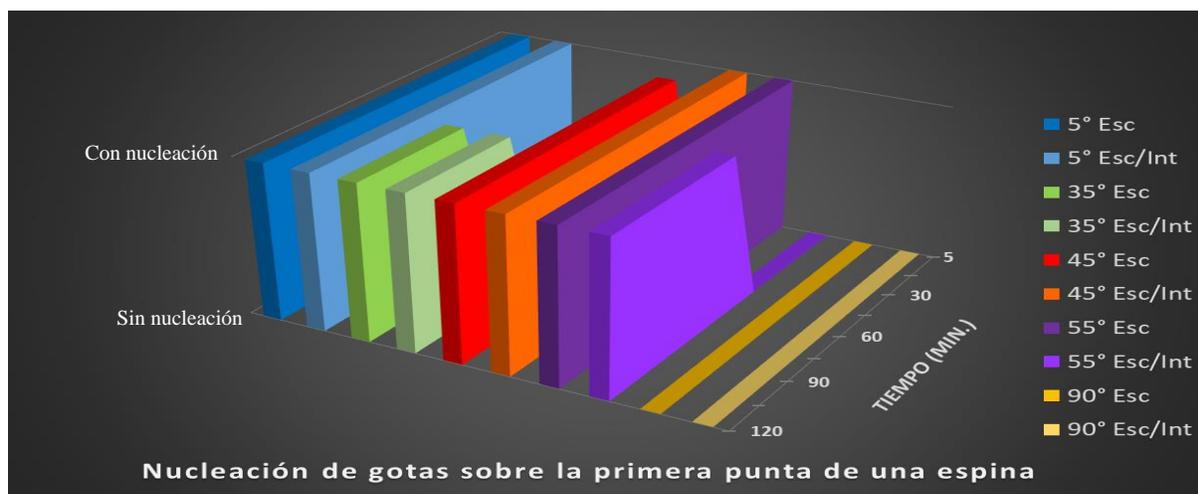
Nucleación de gotas sobre la superficie										
Tiempo (min)	5°		35°		45°		55°		90°	
Arreglo	Esc	Esc/Int								
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0
45	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0
60	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0
75	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
90	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
105	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
120	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1



**Figura 13** Comparación de la nucleación de gotas sobre la superficie en ambos arreglos

**Tabla 14** Comparación de la nucleación de gotas sobre la la primera punta de una espina en ambos arreglos.

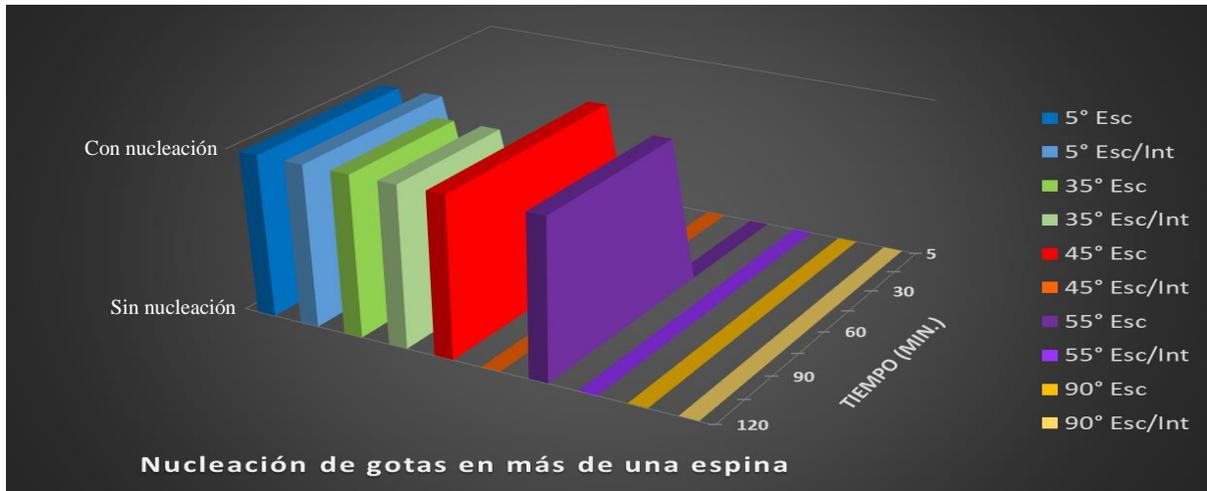
Nucleación de gotas sobre la primera punta de una espina										
Tiempo (min)	5°		35°		45°		55°		90°	
Arreglo	Esc	Esc/Int								
5	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0
15	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0
30	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0
45	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0
60	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0
75	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
90	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
105	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
120	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0



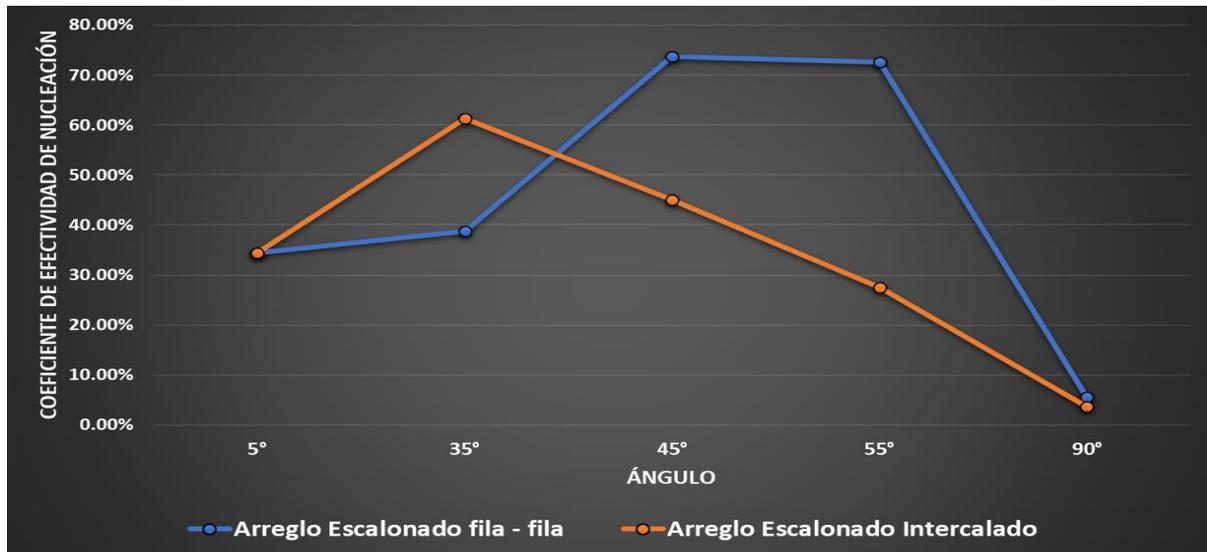
**Figura 14** Comparación de la nucleación de gotas sobre la la primera punta de una espina en ambos arreglos

**Tabla 15** Comparación de la nucleación de gotas en más de una espina en ambos arreglos.

Nucleación de gotas sobre la primera punta de una espina										
Tiempo (min)	5°		35°		45°		55°		90°	
Arreglo	Esc	Esc/Int								
5	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0
15	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0
30	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0
45	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0
60	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0
75	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
90	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
105	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
120	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0



**Figura 15** Comparación de la nucleación de gotas en más de una espina en ambos arreglos



**Figura 16** Comparación de entre los coeficientes de efectividad de nucleación obtenidos en ambos arreglos.

## 1.5 Regresión lineal múltiple y correlaciones.

Para la utilización de estas herramientas nos basaremos en la metodología de Lean Six Sigma, el cual nos indica que para el cálculo de las correlaciones necesitamos que los valores independientes tengan una correlación débil entre ellos (menos de 0.8) y que la correlación entre la variable dependiente con las variables independientes sea fuerte (igual o mayor a 0.8). Para la regresión lineal múltiple se le da a los valores una confiabilidad del 95 % por lo que si el valor obtenido en la probabilidad es superior o igual al 5 %, se considera que la ecuación obtenida no tiene un valor estadístico.

**Tabla 16** Datos para la primera correlación y regresión lineal múltiple.

Angulo	Gota sobre punta	Temperatura	Humedad relativa	Tiempo
5°	1	24.2	57.4	75
5°	1	13.5	69.3	75
35°	1	21.1	71.8	60
35°	1	22.9	79.8	30
45°	1	22.2	62.2	30
45°	1	25	95.8	60
55°	1	23.9	56.7	30
55°	1	21.3	70.5	30
90°	0	22.6	73.8	120
90°	0	22.2	79.5	120

Para la primera regresión lineal múltiple se utilizarán como variables independientes la humedad relativa, la temperatura y la nucleación de gotas de agua sobre la punta de la espina (como valor nominal binario); y como variable dependiente el tiempo en que se generó dicha nucleación. Los valores arrojados por el análisis de correlación y regresión lineal múltiple fueron los siguientes:

**Tabla 17**

Datos obtenidos de la primera correlación y regresión lineal múltiple.

	Gota sobre punta	Temperatura	Humedad relativa	Tiempo				
Gota sobre punta	1							
Temperatura	-0.084012131	1						
Humedad relativa	-0.22328423	0.123378745	1					
Tiempo	-0.853125185	-0.110652844	0.234566424	1				
Resumen								
<i>Estadísticas de la regresión</i>								
Coefficiente de correlación m	0.874966572							
Coefficiente de determinación	0.765566502							
R <sup>2</sup> ajustado	0.648349753							
Error típico	20.88172181							
Observaciones	10							
<b>ANÁLISIS DE VARIANZA</b>								
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F			
Regresión	3	8543.722165	2847.907388	6.531204028	0.025577345			
Residuos	6	2616.277835	436.0463058					
Total	9	11160						
	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	151.52	65.90075688	2.299139436	0.061172589	-9.738313981	312.7683721	-9.738313981	312.7683721
Gota sobre punta	-71.33	16.964955	-4.204638095	0.00565665	-112.8432455	-29.8197466	-112.8432455	-29.81974663
Temperatura	-2.10	2.19603964	-0.955861588	0.376052397	-7.47262536	3.274405483	-7.47262536	3.274405483
Humedad relativa	0.20	0.612261841	0.330387311	0.752338873	-1.295867212	1.700434298	-1.295867212	1.700434298

La ecuación que se obtuvo fue la siguiente

Nucleación una gota sobre la punta (Minuto) = 151.52 -71.33 \* Se núcleo la gota

(Binario) - 2.1 \* Temperatura + 0.20\*Humedad Relativa

(1)

Con la ecuación obtenida se procedió a hacer una comprobación del tiempo obtenido con ella, con el tiempo de los datos recopilados.

**Tabla 18***Datos obtenidos de la primera correlación y regresión lineal múltiple.*

Ángulo	Gota sobre punta	Temperatura	Humedad relativa	Tiempo	Comprobación de tiempo
5°	1	24.2	57.4	75	41.18
5°	1	13.5	69.3	75	66.03
35°	1	21.1	71.8	60	50.57
35°	1	22.9	79.8	30	48.39
45°	1	22.2	62.2	30	46.34
45°	1	25	95.8	60	47.18
55°	1	23.9	56.7	30	41.67
55°	1	21.3	70.5	30	49.89
90°	0	22.6	73.8	120	119.15
90°	0	22.2	79.5	120	121.13

Como se puede observar en la tabla 18, los tiempos obtenidos por la ecuación distan bastante de los que se tenían, esto debido a que las correlaciones y el apartado de probabilidad no cumplen con los requisitos establecidos previamente.

Para el cálculo de la segunda correlación se siguió el mismo procedimiento, siendo ahora las variables independientes el ángulo, temperatura y humedad relativa promedio respecto a cada ángulo; y la variable independiente es la eficiencia.

**Tabla 19** *Datos para la segunda correlación y regresión lineal múltiple.*

Ángulo	Tremp. Promedio	HR promedio	Coficiente %
5	23.32	59.69	34.38
5	12.47	71.16	34.38
35	21.77	72.03	38.75
35	21.84	80.03	61.25
45	21.81	74.57	73.75
45	25.58	74.84	45
55	22.79	68.57	72.5
55	21.37	74.71	27.5
90	22.47	71.39	5.63
90	21.49	71.89	3.75

**Tabla 20** Datos obtenidos de la segunda correlación y regresión lineal múltiple.

	Angulo	Temp. Promedio	HR promedio	Eficiencia %				
Angulo	1							
Temp. Promedio	0.377299963	1						
HR promedio	0.293901597	-0.031006775	1					
Eficiencia %	-0.424782487	0.118726298	0.193279066	1				
Resumen								
<i>Estadísticas de la regresión</i>								
Coefficiente de correlación m	0.648288807							
Coefficiente de determinación	0.420278378							
R^2 ajustado	0.130417566							
Error típico	22.81485055							
Observaciones	10							
ANÁLISIS DE VARIANZA								
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F			
Regresión	3	2264.144055	754.714685	1.449931696	0.318919932			
Residuos	6	3123.104435	520.5174058					
Total	9	5387.24849						
	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95.0%	Superior 95.0%
Intercepción	-130.51	123.7253925	-1.054840109	0.33211067	-433.2556358	172.2346227	-433.2556358	172.2346227
Angulo	-0.58	0.298591803	-1.949875638	0.099076046	-1.312844706	0.148410939	-1.312844706	0.148410939
Temp. Promedio	2.82	2.442106109	1.155778236	0.291712312	-3.153085288	8.79815147	-3.153085288	8.79815147
HR promedio	1.90	1.526675596	1.242150181	0.260528868	-1.83928024	5.632000976	-1.83928024	5.632000976

Coeficiente = -130.51 -0.58 \* Ángulo + 2.82 \* Temp. promedio + 1.9\*HR (2)

promedio

**Tabla 21** Datos obtenidos de la primera correlación y regresión lineal múltiple.

Ángulo	Tremp. Promedio	HR promedio	Coefficiente %	Comprobación del coeficiente
5	23.32	59.69	34.38	45.77
5	12.47	71.16	34.38	36.94
35	21.77	72.03	38.75	47.44
35	21.84	80.03	61.25	62.85
45	21.81	74.57	73.75	46.57
45	25.58	74.84	45	57.72
55	22.79	68.57	72.5	32.13
55	21.37	74.71	27.5	39.80
90	22.47	71.39	5.63	16.28
90	21.49	71.89	3.75	14.48