

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN MATERIALES AVANZADOS, S.C.



**“Impresión en 3D de sistemas pasivos de captación
de agua de neblina a partir de diseños bio-
inspirados en espinas de cactus”**

**Tesis que como requisito para obtener el grado de Maestro en
Ciencias de Materiales**

presenta:

Ing. Julián Felipe Herrera Sanabria

Asesor:

Dr. José Bonilla Cruz

Co-Asesor:

Dra. Tania Ernestina Lara Ceniceros

Monterrey, Nuevo León

2024

Agradecimientos

Agradezco al CONACYT y al gobierno de México por el apoyo económico y la oportunidad de venir a su país a realizar este proyecto.

Agradezco al CIMAVER sede Monterrey, institución de enorme calidad con profesionales de alto nivel, para la realización de cada una de las etapas de este proyecto y mi formación académica.

Agradezco a mi asesor de tesis, el Dr. José Bonilla y a mi co-asesora Dra. Tania Lara, por sus conocimientos invalables que me brindaron para llevar a cabo esta investigación, y por su paciencia para esperar a que este trabajo pudiera llegar a su fin.

Agradezco a cada uno de los investigadores, técnicos, administrativos y demás funcionarios del CIMAVER sede Monterrey con los cuales tuve interacción, por el apoyo en cada una de las etapas personales y académicas durante mi estancia en este centro de investigación, ya que de ellos recibí enseñanzas que serán valiosas en diferentes aspectos a lo largo de mi vida.

Agradezco de manera especial mi madre Mariela Sanabria Rodríguez y a mi padre Saul Herrera Molano, ya que gracias a su apoyo, comprensión, consejos y paciencia logre venir a este hermoso país México a realizar este Posgrado.

Agradezco a mis hermanos, familiares, amigos y a cada una de esas personas especiales en Colombia que a la distancia me brindaron su apoyo fundamental durante mi tiempo de maestría.

Agradezco de manera especial a aquellas personas que me acogieron a mi llegada a México, y a aquellos amigos y estudiantes de estancia que fui conociendo en el transcurso de mi estancia en México y en el CIMAVER, ya que gracias a ellos ha sido muy placentera mi paso por Monterrey.

Agradradezco al grupo de trabajo de 3D-lab, por los conocimientos y buenos momentos pasados junto a ellos

Resumen

La ciencia se ha interesado cada vez más en suplir las necesidades básicas del ser humano utilizando todos los recursos posibles, principalmente el uso de materiales bioinspirados haciendo uso de las condiciones climáticas actuales. Uno de los principales problemas es la obtención de recursos naturales vitales para la supervivencia de la humanidad, y claramente el más importante de ellos es el agua. En varios países del mundo, obtener agua potable para satisfacer las necesidades básicas de todos los habitantes ha sido un desafío, por esta razón la ciencia ha estado desarrollando diferentes dispositivos para obtener agua. Una oportunidad para innovar son las mismas condiciones climáticas presentes, específicamente la humedad y niebla. Esta investigación se centra en lograr un sistema pasivo de impresión 3D bio-inspirado para recolectar el agua presente en el aire. Este dispositivo se bio-inspiró en las estructuras naturales de algunas plantas, que han aprovechado estas condiciones climáticas para sobrevivir durante años. Pero existen diferentes factores que propician la captación de agua de estos organismos vivos, como la morfología de la superficie y sus correspondientes propiedades fisicoquímicas.

En este trabajo de Tesis se diseñaron e imprimieron en 3D varios diseños huecos y sólidos de espinas de cactus, tomando como base estructuras aerodinámicas de las alas de aviones (geometría propia de un perfil alar usado en aeronaves de carga), su morfología estructural, inclinación de la punta, la rugosidad y el número de capas de recubrimiento no fluorado de trietoxi(octil)silano, para encontrar un balance hidrofóbico-hidrofílico sobre su superficie y modular la mojabilidad. A partir de la impresión 3D en vertical de los modelos, se generan micro canales (característica propia de algunas espinas de cactus con mayor índice de recolección de agua), los cuales aumentan la fluidez de las gotas, hacia un reservorio previamente diseñado. La recolección en el reservorio mostró índices de 0.5 g/2h lo cual es dos veces mayor a lo reportado en literatura para el mejor sistema pasivo publicado hasta el momento.

Índice general

Capítulo 1	11
Antecedentes.....	11
1.1 Sistemas biológicos presentes en la naturaleza capaces de cosechar agua de neblina.	12
1.2 Mojabilidad de superficies capaces de captar agua presente en la neblina	15
1.3 Fenómenos de formación de gotas en superficies	18
1.3.1 Fundamento físico teórico de la formación y transporte de gotas.	22
1.4 Sistemas bioinspirados para la captación de agua presente en la neblina.....	25
1.5 Sistemas bioinspirados impresos en 3D para la captación de agua de neblina.	
.....	33
1.5.1 Micro-estereolitografía (μ SLA)	38
1.5.2 Estructuras biomiméticas o bioinspiradas impresas por SLA.....	39
1.6 Recubrimientos Hidrofóbicos – Hidrofílicos base alcoxisilanos	43
Capítulo 2	49
Fundamento teórico	49
2.1 Motivación.....	49
2.2 Justificación.	49
2.3 Hipótesis	50
2.4 Objetivos.....	51
2.4.1 Objetivo General.	51
2.4.2 Objetivos específicos	51
Capítulo 3	52
Procedimiento experimental	52
3.1Materiales	52
3.2Instrumentación	52
3.3Diseño asistido por computadora (CAD) de geometrías tipo espina.	54
3.3.1 CAD de espinas con pendiente constante y cortes transversales en su punta	57
3.3.2 Diseños Basados en Perfiles Alares	58

3.3.3 Diseño Espina por Revolución	59
3.3.4 Diseño espinas con alavés USA 49	61
3.3.5 Diseño de Soporte de los arreglos matriciales de espinas.....	62
3.4 Impresión en 3D por estereolitografía (SLA) del sistema de captación	63
3.5 Recubrimiento por “spray coating” con trietoxi (octil)silano.....	65
3.6 Captación de agua en sistemas pasivos impresos en 3D usando una cámara de simulación de neblina.	67
Capítulo 4	71
Resultados y discusión	71
4.1 Diseños asistidos por computadora (CAD)	71
4.1.1 Diseño de la base del arreglo adicionando conductos de desagüe.	71
4.1.2 Diseño optimizado de espinas para captación de agua de neblina.....	73
4.2 Impresión en 3D por SLA (estereolitografía) de los modelos optimizados.....	74
4.3 Caracterización de la mojabilidad en la superficie de los sistemas pasivos de captación de agua de neblina	77
4.3.1 Angulo de contacto estático θ_s	78
4.3.2 Ángulo de contacto dinámico (ángulo de contacto en plano inclinado θ_i)	82
4.3.3 Análisis hidrodinámico de las puntas de las espinas por revolución recubiertas con distinto número de capas.....	86
4.4 Análisis morfológico y composición química de las espinas diseñadas.....	90
4.4.1 Análisis morfológico y composición química de arreglos con 4 álabes de sección tipo perfil alar.....	90
4.4.2 Análisis morfológico y composición química de los arreglos de espinas con conductos internos, cónicas con pendiente constante y punta truncada a 30°y 45°.....	94
4.4.3 Análisis morfológico y composición química del arreglo por revolución del perfil alar USA 49	97
4.5 Capacidad de captación de agua de neblina de cada uno de los sistemas impresos en 3D.....	101
Capítulo 5	106
Conclusión	¡Error! Marcador no definido.
Capítulo 6	110
Trabajo futuro	110
Capítulo 7	111

Índice de figuras

Índice de figuras

FIGURA 1. ESTRUCTURAS PRESENTES EN LA NATURALEZA CAPACES DE CAPTAR AGUA DEL AMBIENTE A) ESPINAS DE CACTUS, B) HOJAS DE HIERBA DEL DESIERTO ⁷ C) PLANTA DE JARRA TROPICAL ENDÉMICA DE FILIPINAS <i>NEPENTHES ALATA</i> , D) TELARAÑAS PRESENTE EN REGIONES DESÉRTICAS, E) ESCARABAJO <i>CALLIGRAPHA</i> , F) ESCARABAJO DEL DESIERTO <i>STENOCARA</i> . ⁸	13
FIGURA 2. COPIAPOA CINÉREA BRITTON & ROSE ES UNA ESPECIE DE PLANTA FANERÓGAMA DE LA FAMILIA CACTACEAE A) PLANTA COMPLETA Y PRIMER PLANO DE LOS TALLOS QUE EMANAN DE LAS AREOLAS ¹³ , B) PROCESO DE RECOLECCIÓN DE NIEBLA EN LA SUPERFICIE DE LAS ESPINAS, CAPTURA DE NIEBLA, TRANSPORTE DE GOTAS DE AGUA Y SU ALMACENAMIENTO. ¹⁴	15
FIGURA 3. MEDICIÓN DEL θ_c FORMADO ENTRE UN LIQUIDO Y UNA SUPERFICIE	16
FIGURA 4. GONIÓMETRO PARA MEDICIÓN DE ÁNGULO DE CONTACTO- MÉTODO AGUJA. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS INFLUENCIAS EN LAS MEDICIONES DE ÁNGULOS DE CONTACTO ESTÁTICOS ²⁴	17
FIGURA 5. A) NUCLEACIÓN DE GOTAS EN SUPERFICIES SUPERHIDROFOBICAS, B) NUCLEACIÓN DE GOTAS EN SUPERFICIES BIFÍLICAS, C) EFECTO DEL BORDE EN LA CONDENSACIÓN ²⁹	18
FIGURA 6. VELOCIDAD MEDIDA DE TRANSPORTE DE LAS GOTAS DE ROCÍO EN SEIS DIFERENTES ORIENTACIONES DE LAS ESPINAS DEL <i>C. CINEREA</i> . ³²	19
FIGURA 7. IMAGEN DEL PERFIL DE RUGOSIDAD DE LA SUPERFICIE WLI TOMADA EN LA BASE DE UNA COLUMNA DE <i>C. CINEREA</i> . ³²	20
FIGURA 8. PARÁMETROS DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL MEDIA ARITMÉTICA EN LA PUNTA Y BASE DE LAS ESPINAS DE <i>C. CINÉREA</i> PARA A) PARÁMETRO R_a Y B) PARÁMETRO R_z ³²	21
FIGURA 9 . ESQUEMA DE LA GOTAS DE AGUA EN LA SUPERFICIE DE LA ESPINA . ⁷	24
FIGURA 10. SISTEMA COLECTOR DE AGUA PRESENTE EN LA NEBLINA BIOINSPIRADO DE TIPO MALLA ⁴²	25
FIGURA 11. MALLA RASCHEL A) MODELO CON NANO FIBRAS DEPOSITADAS EN LA PARTE SUPERIOR ⁴³ B) ILUSTRACIÓN ESQUEMÁTICA DEL PROBLEMA DE DESVIACIÓN AERODINÁMICA ENCONTRADA POR LAS ESTRUCTURAS DE MALLAS COLECTORAS DE NIEBLA CONVENCIONALES LO CUAL AFECTA LA INTERCEPCIÓN DE LAS GOTAS. ⁴⁴	26

FIGURA 12. ESTRUCTURA TIPO MALLA MODIFICADA (A) ESTRUCTURA 2D KIRIGAMI. ¹⁴	14
(B)VORTICES TUBULARES QUE SE FORMAN EN ABERTURAS-TRAYECTORIA DE LAS GOTAS AL ENTRAR A EL VORTICE. ⁴⁴	27
FIGURA 13. IMPRESIÓN POR INYECCIÓN DE TINTA CON MICRO PATRONES PARA OBTENER SUPERFICIE SUPERHIDRÓFOBA ²⁶	28
FIGURA 14. TEJIDO BIOMIMETICO COLECTRO DE AGUA DE NEBLINA ⁴⁸	29
FIGURA 15. FABRICACIÓN DEL MARCO CON ESTRUCTURAS SUPER HIDRÓFILAS A PARTIR DEL GRABADO DE LA ESPUMA DE COBRE ORIGINAL ⁴⁹	30
FIGURA 16. ILUSTRACIÓN ESQUEMÁTICA QUE MUESTRA LA ESTRUCTURA DE UN DISPOSITIVO BASADO EN NBHA Y EL PROCESO AWH EXTERIOR QUE UTILIZA EL DISPOSITIVO ⁵⁰	31
FIGURA 17. AGUJAS DISTRIBUIDAS SOBRE UNA MEMBRANA PERMEABLE ⁵²	32
FIGURA 18. SUPERFICIES JERÁRQUICAS BIOINSPIRADAS (A) ILUSTRACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS ÉLITROS DEL ESCARABAJO DEL DESIERTO DE NAMIB Y DE LAS ESPINAS DE LOS CACTUS; B) ESQUEMA DE LAS SUPERFICIES BIOMIMÉTICAS ESTRUCTURADAS JERÁRQUICAMENTE INSPIRADAS EN LOS ÉLITROS DEL ESCARABAJO DEL DESIERTO ⁵⁵	34
FIGURA 19. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA FABRICACIÓN DE CONJUNTOS DE CONOS CON CARÁCTER SUPERHIDRÓFOBO-SUPERHIDRÓFILO. LOS PANELES B) Y C) MUESTRAN LAS FOTOGRAFÍAS DE LAS MUESTRAS ANTES Y DESPUÉS DEL PROCESO DE FABRICACIÓN COMO SE MUESTRA EN EL PANEL A, RESPECT ⁵⁶	35
FIGURA 20. MODELO DE MATRIZ DE ESPINAS; IMÁGENES SEM DE LAS MATRICES MIMÉTICAS DE CACTUS IMPRESAS EN 3D CON DIFERENTE NÚMERO DE ESPINAS: N = 1 - 4.....	36
FIGURA 21. ESPINAS ACANALADAS COLECTORAS DE NIEBLA IMPRESAS EN 3D ⁷	37
FIGURA 22. IMAGEN ORIGINAL DE LA PATENTE ESTADOUNIDENSE 4575330 QUE PRESENTA EL TÉRMINO Y EL CONCEPTO DE ESTEREOLITOGRAFÍA. DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES UTILIZANDO EL ESQUEMA DE NUMERACIÓN DE LA PATENTE: (21) CONTENEDOR, (22) LÍQUIDO CURABLE POR UV, (23) SUPERFICIE DE TRAB ⁵⁹	39
FIGURA 23. PLATAFORMA MULTIREACCION IMPRESA EN 3D POR MICROESTEROLITOGRAFIA	40
FIGURA 24. FE-SEM DE LAS SUPERFICIES IMPRESAS 3D SLA (VISTA PERPENDICULAR, PLANO ZY): (A) SUPERFICIE PLANA QUE MUESTRA CAPAS DE IMPRESIÓN, (B) MICROCANALES IMPRESOS (ALTURA DISEÑADA DE 100 µm) CON CAPAS DE IMPRESIÓN EN LA PARTE SUPERIOR, (C) BIOMIMÉTICO MICROCANALES (D) NANOPARTÍCULAS DE TiO 2 - HTMS DEPOSITADAS EN LOS MICROCANALES, Y (E) VISTA SUPERIOR DE LAS NANOPARTÍCULAS DE TiO 2 -HTMS COLOCADAS SOBRE LOS FILAMENTOS DE IMPRESIÓN. ⁶¹	42
FIGURA 25. (A) SUPERFICIE JERÁRQUICA DE DOS NIVELES DISEÑADA PARA EL MATERIAL BIOMIMÉTICO: MICROCANAL DISEÑADO Y NANOPARTÍCULAS. (B) SUPERFICIE JERÁRQUICA REAL DE TRES NIVELES PARA EL MATERIAL BIOMIMÉTICO: MICROCANAL IMPRESO, FILAMENTO DE IMPRESIÓN Y NANOPARTÍCULAS. ⁶¹	43
FIGURA 26. FABRICACIÓN DE UNA SUPERFICIE SUPEROMNIFÓBICA FLEXIBLE Y NO FLUORADA. (A) FOTOGRAFÍA DE UN COLÉMBOLO (B) IMÁGENES SEM DE LA TEXTURA REGULAR DE LA PIEL.(C) IMAGEN SEM DE LA ESRUCTURA FABRICADA (D) UNA IMAGEN DE PERFIL DE UNA SUSPENSIÓN LÍQUIDA EN LA PIEL DEL COLÉMBOL.....	45

FIGURA 27. IMÁGENES SEM DE SUPERFICIE SIN Y CON RECURBIMIENTO DE POLIURETANO, SILICE Y POLIFLUOROACRILATO ⁷⁰	46
FIGURA 28. SPRAY COATING DE TiO ₂ SOBRE IMPRESOS 3D ⁵⁶	47
FIGURA 29. PARÁMETROS ESTÁNDAR DE DISEÑO PARA CADA ARREGLO (A) VISTA DE PLANTA. (B) VISTA LATERAL.	55
FIGURA 30. BASE DEL ARREGLO CON MAYOR EFICIENCIA FLUJO DE AGUA ⁷	56
FIGURA 31. OPTIMIZACIONES HIDRODINÁMICAS A LA BASE DEL ARREGLO	57
FIGURA 32. ESPINAS CON PENDIENTE CONSTANTE Y CORTE EN SUS PUNTAS (A) ARREGLO Y VISTA LATERAL ACOTADA DE ESPINAS A 30° B) ARREGLO Y VISTA LATERAL ACOTADA DE ESPINAS A 45°	57
FIGURA 33. PERFIL ALAR USA 49/FICHA TÉCNICA ⁶³	59
FIGURA 34. ESPINA POR REVOLUCIÓN CON PERFIL ALAR USA49 (A) SECCIÓN TRANSVERSAL-VISTA ESTRUCTURAL LATERAL. (B) VISTA LATERAL SÓLIDA. (C) ARREGLO MATRICIAL ..	60
FIGURA 35. ESPINAS CON 4 ALAVÉS DE SECCIÓN DE SUPERIOR BASADA EN EL PERFIL ALAR USA 49 A) SECCIÓN TRANSVERSAL- VISTA ESTRUCTURAL DE PLANTA. B) VISTA ISOMÉTRICA SÓLIDA. C) ARREGLO MATRICIAL.....	61
FIGURA 36. DISEÑOS CAD(A) DISEÑO DEL SOPORTE DEL ARREGLO DE ESPINAS. (B) DISEÑO DE LA TAPA DEL DEPOSITO	62
FIGURA 37. UBICACIÓN DE MODELOS EN PLATAFORMA DE IMPRESIÓN/CARACTERÍSTICAS DE LOS POSTES DE IMPRESIÓN.....	64
FIGURA 38 . IMPRESIÓN POR INDIVIDUAL DE LAS GEOMETRÍAS DISEÑADAS	65
FIGURA 39. RECURBIMIENTO DE MODELOS IMPRESOS (A) PROCESO REAL “SPRAY COATING”, (B) UBICACIÓN INICIAL DE LOS SISTEMAS PASIVOS DE CAPTACIÓN EN LA CÁMARA (C) ROTACIÓN DE LOS MODELOS.....	65
FIGURA 40. MONTAJE DE DOS CÁMARAS DE EMULACIÓN DE NEBLINA DEL AMBIENTE.....	68
FIGURA 41. METODOLOGÍA DEL DESARROLLO DE SISTEMAS PASIVOS DE CAPTACIÓN.....	70
FIGURA 42. BASE PARA ARREGLOS DE ESPINAS A) BASE PARA DISEÑOS SOLIDOS VISTA ISOMÉTRICA B) BASE PARA DISEÑOS SOLIDOS VISTA SUPERIOR. C) BASE PARA DISEÑOS CON CONDUCTOS INTERNOS VISTA TIPO ESBOZO D) BASE PARA DISEÑOS CON CONDUCTOS INTERNOS VISTA SUPERIOR	72
FIGURA 43. DISEÑOS TIPO ESPINA OPTIMIZADOS. A) ESPINA CÓNICA CON PENDIENTE CONSTANTE Y PUNTA TRUNCADA A 30°. B) ESPINA CÓNICA CON PENDIENTE CONSTANTE Y PUNTA TRUNCADA A 45°. C) ESPINA CILÍNDRICA POR REVOLUCIÓN CON SECCIÓN TRANSVERSAL TIPO PERFIL ALAR. D) ESPINA CÓNICA CON CUATRO ALABES DE SECCIÓN TIPO PERFIL ALAR USA49.....	73
FIGURA 44. CONDUCTOS INTERNOS Y EXTERNOS A LAS ESPINAS DE LAS BASES DE LOS ARREGLOS MATRICIALES.....	75
FIGURA 45. ARREGLOS MATRICIALES TIPO ESPINA IMPRESOS EN 3D	75
FIGURA 46. SOPORTE PARA ARREGLO MATRICIAL DE ESPINAS.....	76
FIGURA 47. ESPINAS IMPRESAS EN 3D PARA CARACTERIZACIÓN	77
FIGURA 48. ÁNGULO DE CONTACTO ESTÁTICO COMO UNA FUNCIÓN DE SU GEOMETRÍA Y NÚMERO DE CAPAS DE RECURBIMIENTO	79

FIGURA 49. CARACTERIZACIÓN ÁNGULO DE CONTACTO ESTÁTICO (θ_s) A) ÁNGULO DE CONTACTO EN GEOMETRÍA POR REVOLUCIÓN B) ÁNGULO DE CONTACTO EN ESPINA CÓNICA CON PENDIENTE CONSTANTE Y PUNTA TRUNCADA A 30° C) ÁNGULO DE CONTACTO EN GEOMETRÍA CON 4 ALABES. D) ÁNGULO DE CONTACTO EN ESPINA CÓNICA CON PENDIENTE CONSTANTE Y PUNTA TRUNCADA A 45°	81
FIGURA 50. ÁNGULO DE CONTACTO DINÁMICO EN GEOMETRÍA POR REVOLUCIÓN	83
FIGURA 51. ÁNGULO DE CONTACTO DINÁMICO A) ÁNGULO DE CONTACTO DINÁMICO EN ESPINA CÓNICA CON PENDIENTE CONSTANTE Y PUNTA TRUNCADA A 30° B) ÁNGULO DE CONTACTO DINÁMICO EN ESPINA CÓNICA CON PENDIENTE CONSTANTE Y PUNTA TRUNCADA A 45°	84
FIGURA 52. ÁNGULO DE CONTACTO DINÁMICO EN GEOMETRÍA TIPO ESPINA CÓNICA CON CUATRO ALABES DE SECCIÓN TIPO PERFIL ALAR USA49.....	85
FIGURA 53. ESTUDIO DEL COMPORTAMIEENTO HIDRODINAMICO DE UNA GOTÁ DE AGUA AL POSARSE SOBRE LA PUNTA DE LAS ESPINAS POR REVOLUCION. A) PUNTA DE ESPINA SIN RECUBRIR (BLANCO, MUESTRA CONTROL), B) PUNTA DE ESPINAS CON 1 CAPA DE RECUBRIMIENTO, C) PUNTA DE ESPINAS CON 3 CAPAS DE RECUBRIMIENTO, D) PUNTA DE ESPINAS CON 5 CAPAS DE RECUBRIMIENTO.	87
FIGURA 54. PRESIÓN INVERSA DE LAPLACE EN EL CUERPO DE LA ESPINAS CILÍNDRICA POR REVOLUCIÓN EN PLANO INCLINADO CON SECCIÓN TRANSVERSAL TIPO PERFIL ALAR.....	89
FIGURA 55. ARREGLO DE ESPINAS CÓNICAS CON CUATRO ALABES DE SECCIÓN TIPO PERFIL ALAR USA49.....	91
FIGURA 56. EDS (ENERGY-DISPERSIVE X-RAY SPECTROSCOPY) DE GEOMETRÍA TIPO ESPINA CÓNICA CON CUATRO ÁLABES DE SECCIÓN TIPO PERFIL ALAR USA49 VARIANDO EL NÚMERO DE CAPAS	92
FIGURA 57. SEM ESPINAS CON ALABES TIPOUSA49. COLUMNAS: NÚMERO DE CAPAS; FILA1: MICROGRAFÍA SEM; FILA 2: MICROGRAFIA EDX (CARBONO)	93
FIGURA 58. ARREGLOS ESPINA HUECAS Y CÓNICAS CON PENDIENTE CONSTANTE Y PUNTA TRUNCADA A 30° Y 45°	94
FIGURA 59. AFM (ATOMIC FORCE MICROSCOPY)Y EDS(ENERGY-DISPERSIVE X-RAY SPECTROSCOPY) DE GEOMETRÍAS TIPO ESPINA CÓNICAS CON PENDIENTE CONSTANTE Y PUNTA TRUNCADA A 30° Y 45° CON 0,1,3 Y 5 CAPAS.	95
FIGURA 60. SEM ESPINAS CON PENDIENTE CONSTANTE Y PUNTA TRUNCADA .COLUMNAS:NUMERO DE CAPAS; FILA1: MICROGRAFIA SEM; FILA 2: MICROGRAFIA EDX(CARBONO)	97
FIGURA 61. ARREGLO POR REVOLUCIÓN DEL PERFIL ALAR USA 49.....	98
FIGURA 62. AFM (ATOMIC FORCE MICROSCOPY) Y EDS (ENERGY-DISPERSIVE X-RAY SPECTROSCOPY) DE GEOMETRÍAS POR REVOLUCIÓN.....	99
FIGURA 63. SEM ESPINAS CON ALABES TIPOUSA49. COLUMNAS: NUMERO DE CAPAS; FILA1:MICROGRAFIA SEM; FILA 2:MICROGRAFIA EDX(CARBONO).....	100
FIGURA 64. FORMACIÓN DE GOTAS EN LA PUNTA Y CUERPO DE ESPINA POR REVOLUCIÓN	101
FIGURA 65. FORMACIÓN DE GOTAS EN LA PUNTA Y CUERPO DE ESPINA CON PENDIENTE CONSTANTE.....	102

FIGURA 66. CAPACIDAD DE CAPTACIÓN DE CADA ARREGLO CON SU CORRESPONDIENTE RECUBRIMIENTO POR NÚMERO DE CAPAS, PSC (TRIMETOXI(PROPIL)SILANO), LUYAN LIU (MEJOR SISTEMA DE CAPTACIÓN REPORTADO EN LITERATURA) ⁷	104
FIGURA 67 SUPERFICIE IMPRESA EN 3D -PATRONES ACANALADOS	106
FIGURA 68 ANCLAMIENTO DE PRIMERA CAPA DE RECUBRIMIENTO A LA SUPERFICIE	106
FIGURA 69 RUGOSIDAD DE SUPERFICIE CON 3 CAPAS DE RECUBRIMIENTO.....	107
FIGURA 70 ANCLAMIENTO DE EL COMPUESTO A LA SUPERFICIE CON TRES CAPAS DE RECUBRIMIENTO	108
FIGURA 71 RUGOSIDAD DE SUPERFICIE CON 5 CAPAS DE RECUBRIMIENTO.	109
FIGURA 72 ANCLAMIENTO DE EL COMPUESTO A LA SUPERFICIE CON CINCO CAPAS DE RECUBRIMIENTO	109
FIGURA 73. DESARROLLO DE UN SISTEMA PASIVO DE CAPTACIÓN DE AGUA DE NEBLINA EFICIENTE	112

Índice de tablas

TABLA 1.PARÁMETROS DE DISEÑO BÁSICOS ⁷	55
TABLA 2. TABLA USADA EN CADA UNO DE LOS ENSAYOS PARA CARACTERIZAR LA CAPACIDAD DE CAPTACIÓN DE CADA UNO DE LOS ARREGLOS DEPENDIENDO GEOMETRÍA Y NUMERO DE CAPAS DE RECUBRIMIENTO.....	69
TABLA 3 . ANGULO DE CONTACTO ESTÁTICO (θ_s) COMO UNA FUNCIÓN DE SU GEOMETRÍA Y NÚMERO DE CAPAS DE RECUBRIMIENTO	78
TABLA 4. MEDICIÓN DE LA CAPACIDAD DE CAPTACIÓN DE CADA UNO DE LOS ARREGLOS DEPENDIENDO GEOMETRÍA Y NÚMERO DE CAPAS DE RECUBRIMIENTO	102
TABLA 5. RESULTADOS DE CAPTACIÓN DE CADA UNO DE LOS ARREGLOS CON SU CORRESPONDIENTE RECUBRIMIENTO POR NÚMERO DE CAPAS.....	103

Capítulo 1

Antecedentes

La incorporación de materiales bio inspirados en sistemas vegetales, destinados a la obtención de recursos naturales esenciales para el ser humano, se han venido desarrollando en mayor magnitud debido a los daños ocasionados por la exploración y explotación de combustibles fósiles, los cuales se han convertido en la fuente principal para la obtención de energía eléctrica, causando la disminución de fuentes hídricas a lo largo del mundo¹. En la presente década se ha trabajado en la generación de energías limpias a partir de fuentes con bajo impacto ambiental, disminuyendo pero no reversando los daños ambientales causados en el pasado². Según un informe reciente de la Organización Mundial de la Salud (OMS, por sus siglas en inglés), más de 400 millones de personas todavía utilizan fuentes de agua no sanitizadas³, además 144 millones de personas beben agua directamente de la superficie terrestre, por lo que en el año 2000, la OMS declaró que el acceso al suministro de agua potable y al saneamiento era un derecho humano fundamental.⁴

La recolección de agua a partir de la humedad del aire ambiental es una idea interesante, especialmente de gran impacto en regiones áridas. En particular, la captación de agua presente en la niebla y neblina es un tópico frecuente de estudio por parte de la comunidad científica. Aunque, la mayoría de los trabajos o prototipos utilizados deben de ser implementables en sitios geográficos caracterizados por su altura, alto porcentaje de presencia de neblina a lo largo del día, y/o altos niveles de humedad. Dichas características no son propias de regiones áridas y semiáridas donde la escasez de agua es uno de los mayores problemas que se presenta. Según informes presentados sobre pronósticos de cambios climáticos, en los siguientes años, regiones como el norte de África y el mediterráneo se verán afectadas por la disminución de precipitaciones y el aumento de la presencia de fenómenos meteorológicos como la presencia de neblina.⁵ Por lo que la implementación de

dispositivos para captación de agua a partir de neblina y su optimización, serán una solución potencialmente prometedora en dichas regiones.

1.1 Sistemas biológicos presentes en la naturaleza capaces de cosechar agua de neblina.

Los sistemas biológicos colectores de agua, han intrigado y causado curiosidad en la comunidad científica debido a la forma en que las plantas (v.g. cactus) y algunos insectos (v.g. escarabajos) han sobrevivido en ambientes áridos y semiáridos. La estructura, composición química y geometría de sus superficies pueden recolectar agua de manera pasiva a partir de neblina. Es así que algunas plantas e insectos captan el agua presente en el ambiente, sobreviviendo así a los climas extremos en donde habitan. Este tipo de organismos biológicos son una fuente de inspiración para innovar y crear nuevos materiales bioinspirados los cuales emulan las funciones que desempeñan estas estructuras biológicas. Específicamente las espinas de los cactus y el caparazón de los escarabajos que habitan en regiones áridas o semi áridas han desarrollado distintos mecanismos para atraer y condensar las gotas de agua presente en la neblina, llevándolas a su interior para así almacenarla.⁶ En la **Figura 1** se muestran algunas estructuras biológicas presentes en la naturaleza las cuales captan agua presente en la niebla³.

La **Figura 1** muestra distintos sistemas biológicos los cuales sobreviven en sus hábitats a partir de la captación de agua de niebla. En la **Figura 1a** se observa la espina de un cactus de especie *Acharagma aguirreana*, la cuales pueden recolectar agua de niebla de manera eficiente mediante sus espinas. La niebla se captura en las puntas de las espinas donde las gotas de agua crecen progresivamente conforme la captación aumenta, y se desplazan hasta el fondo para su almacenamiento. El desplazamiento de las gotas a lo largo de la espina de estos sistemas pasivos de recolección se debe principalmente a los gradientes de presión de Laplace y la energía libre en la superficie.

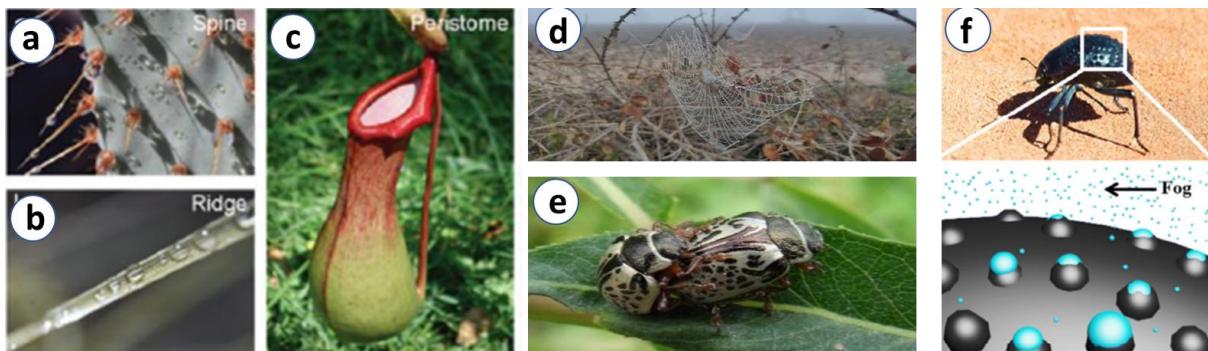


Figura 1. Estructuras presentes en la naturaleza capaces de captar agua del ambiente
a) espinas de cactus, b) hojas de hierba del desierto⁷ c) planta de jarra tropical endémica de Filipinas *Nepenthes alata*, d) telarañas presente en regiones desérticas,
e) escarabajo *Calligrapha*, f) escarabajo del desierto *Stenocara*.⁸

Algunas otras especies de plantas, como la hierba del desierto posee hojas con crestas y surcos longitudinales, propicios para recolectar agua de la niebla y proporcionar el agua necesaria para sobrevivir en el desierto. Por ejemplo, las hojas de *Stipagrostis sabulicola* (**Figura 1b**), pueden extraer una cantidad sustancial de agua de la niebla con una tasa de recolección de 5 L/m² durante noche en presencia de niebla.⁷ Esto se debe a que las crestas pueden facilitar la captura de niebla. Este fenómeno físico se explica a través de la expresión empírica de Langmuir-Blodgett y la ecuación de Kelvin las cuales relacionan la rugosidad de las superficies con el desplazamiento y velocidad de las gotas de agua al canalizarse hacia el tallo. Algunas plantas naturales poseen características únicas para transportar el agua recogida a otros órganos. Por ejemplo, los microsurcos que involucran orificios con bordes afilados en forma de arco en la superficie del peristoma de *Nepenthes alata* (**Figura 1c**). El ancho de cada micro ranura es de ~50 µm y cada orificio tiene un borde afilado con un ángulo de ~2 a ~8°. Esta estructura única genera un efecto de ascenso capilar y fijación del líquido, lo que conduce a una dispersión direccional del líquido en la superficie a gran velocidad. En base a esto, las gotas de agua de lluvia o rocío se pueden mover direccionalmente desde el margen interior al margen exterior, lo que proporciona inspiración para diseñar estructuras de drenaje para transportar las gotas de agua recolectadas a los depósitos de manera eficiente.

Adicionalmente, la **Figura 1d** muestra la imagen de una telaraña de una región desértica, en la cual a partir de un flujo de neblina logra condensar gotas de agua, recolectando una cantidad suficiente para que la araña sobreviva en estos ambientes. Las telarañas son una inspiración para el diseño de estructuras tipo malla para la captación de neblina⁷. La composición físico-química de la superficie del caparazón de los escarabajos especialmente del género *Calligrapha* (de la subfamilia *Chrysomelinae*) es la responsable de la captación de agua de neblina. La distribución de manchas hidrófilas rodeadas de regiones hidrófobas mostrada en la **Figura 1e**, permite que el agua fluya más fácilmente hacia la boca del insecto.⁸⁹ La **Figura 1f** muestra una amplificación del caparazón del escarabajo *Stenocara* del género de coleópteros de la familia *Tenebrionidae* adaptado al desierto del Namib. La amplificación muestra los micro lóbulos hidrofílicos en la espalda y las alas de este insecto, están rodeadas de áreas hidrofóbicas; características que proporcionan una recolección de agua altamente eficiente¹⁰. Cuando el insecto se encuentra en contra del viento en un ángulo de 45°, con la cabeza hacia abajo, el dorso y el ala hacia arriba, recoge pequeñas moléculas de agua en la humedad del aire a través de las bolas hidrofílicas. Cuando la gota de agua alcanza un tamaño suficiente, las necesidades de agua del insecto se satisfacen haciéndola rodar desde los picos hidrófilos, pasando por la zona hidrófoba para desembocar hasta la boca del insecto¹¹.

En la mayoría de las estructuras vegetales, los patrones regulares tanto en las superficies como en su estructura son características propias y favorables para la captación de agua y su posterior almacenamiento. Esta disposición se debe a la filotaxis, que es el patrón de crecimiento de hojas alrededor de un tallo, y por ende gobierna la distribución de las hojas de los cactus y en ellas el crecimiento de las espinas encargadas de captar la humedad presente en el ambiente. A partir del estudio de la eficiencia de captación de distintas variedades de cactus, la especie *Copiapoa cinerea* mostrada en la **Figura 2**, logra altos niveles de captación de agua de niebla debido a su alta densidad de espinas, tipo de geometría y su correspondiente morfología superficial.¹²

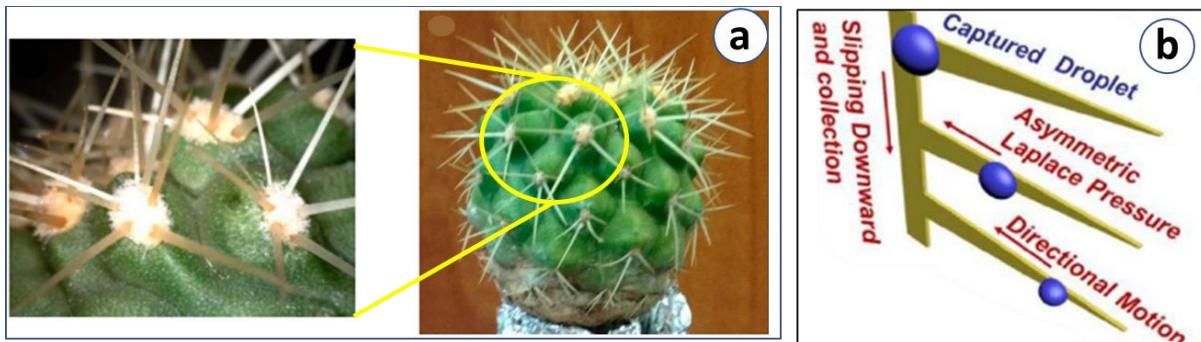


Figura 2. *Copiapoa cinerea* Britton & Rose es una especie de planta fanerógama de la familia Cactaceae a) planta completa y primer plano de los tallos que emanan de las areolas¹³, b) proceso de recolección de niebla en la superficie de las espinas, captura de niebla, transporte de gotas de agua y su almacenamiento.¹⁴

En las puntas de espinas de los cactus (**Figura 2a**), es donde se condensan las gotas de agua presente en la niebla¹⁵. Posterior a una nucleación, las gotas aumentan su tamaño y se deslizan hacia el fondo a lo largo de las espinas¹⁶, lo que es impulsado principalmente por los gradientes de presión de Laplace y la baja energía libre en la superficie como se esquematiza en la **Figura 2b**.¹⁷

1.2 Mojabilidad de superficies capaces de captar agua presente en la neblina

Una de las características que se estudia a detalle en los sistemas de captación de agua es la mojabilidad de la superficie, ya que es de interés la interacción de las moléculas de agua al momento de su nucleación con la superficie y cómo se comportan al momento de desplazarse. Por lo tanto, la caracterización del ángulo de contacto en dichas superficies es fundamental. Trabajos científicos cuyo objetivo es captar agua del ambiente empleando estructuras bioinspiradas, atribuyen la captación y transporte de las gotas de agua al ángulo de contacto propio de las superficies¹⁸. El ángulo de contacto (θ_c) es el ángulo formado en la interfaz líquido-sólido, cuando una gota entra en contacto con la superficie sólida (**Figura 3**).¹⁹ Así, θ_c sirve para cuantificar la mojabilidad de una superficie, que a su vez es un reflejo de la energía

superficial del material. Es decir, una superficie con menor energía superficial se caracteriza por tener un mayor θ_c , y un menor θ_c significa mayor mojabilidad²⁰.

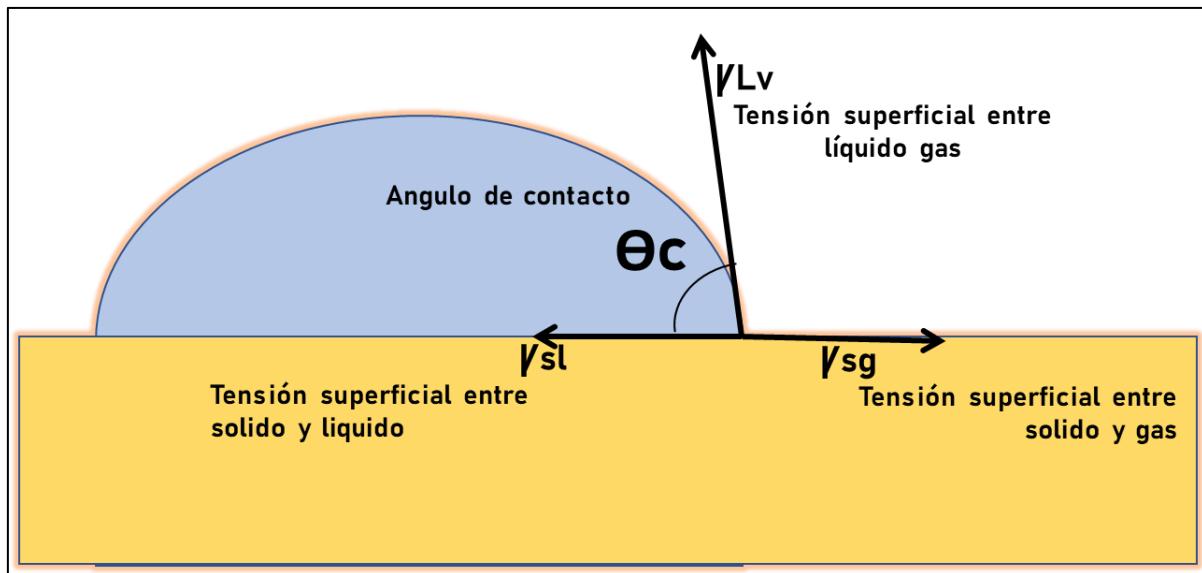


Figura 3. Medición del θ_c formado entre un líquido y una superficie

El θ_c en superficies funcionales se ha estudiado desde el siglo pasado, enfocándose a características de mojabilidad y de repelencia del agua en superficies de organismos de la naturaleza. En particular, el estudio de las propiedades de repelencia de agua y autolimpieza de la flor de loto, derivaron en encontrar que la rugosidad a escala micro y nano en la superficie minimiza la energía superficial, así como el recubrimiento de cera natural presente en su superficie aumenta el carácter hidrofóbico de la misma²¹. Las superficies se clasifican según su mojabilidad como hidrofílica, si una superficie presenta un $\theta_c < 90^\circ$, mientras que, una superficie es considerada hidrofóbica si su $\theta_c > 90^\circ$ ²². Cuando el $\theta_c > 150^\circ$ se denominan superficies súper hidrofóbicas. No obstante, otro factor clave para considerar una superficie super hidrofóbica es el ángulo de histéresis, el cual es la diferencia aritmética entre los ángulos dinámicos de avance y retroceso. Dicha diferencia debe ser menor a 10° ²³. En la **Figura 4** se representa la técnica usada para la caracterización del ángulo de contacto de las superficies.

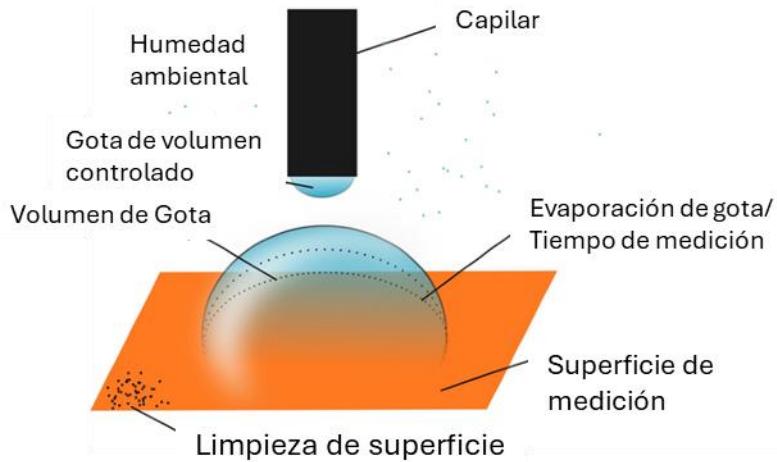


Figura 4. Goniómetro para medición de ángulo de contacto- método aguja.
Descripción general de las influencias en las mediciones de ángulos de contacto
estáticos²⁴

Cabe destacar que en cuanto a la técnica de medición del θ_c esquematizada en la **Figura 4**, se debe enfatizar los factores de medición como el volumen de la gota usada. Las gotas con un volumen pequeño tienden a encontrar puntos más hidrofílicos en la superficie, mientras que, gotas con volumen muy grande, afectarán la medición del θ_c debido a la gravedad. Por tanto, el depósito de una gota con un volumen controlado sobre la superficie es esencial para una buena medición²⁵. En este proyecto es necesario conocer el ángulo de contacto estático, pero también es de interés observar el comportamiento de las gotas a cierta inclinación, debido a la pendiente que las espinas presentan en su geometría, así como la dinámica de la gota a lo largo de dicha superficie. Por ello se optó por realizar la medición del θ_c por el método de deposición a través de una aguja. Dicho método deposita una gota con un volumen controlado sobre la superficie permitiendo la medición tanto de su θ_c estático como θ_c dinámico²⁶.

1.3 Fenómenos de formación de gotas en superficies

El rocío presente en la neblina se condensa a través del proceso de transición de fase de vapor a líquido sobre las superficies. El primer paso de la condensación es la formación del núcleo de la gota más pequeña (nucleación). La densidad de nucleación relativamente alta es esencial para tener una condensación eficiente²⁷. La densidad de nucleación en superficies hidrófilas es mayor que en superficies hidrófobas como se muestra en la **Figura 5**, por lo que superficies hidrófilas son las adecuadas en sitios de nucleación al diseñar sistemas de condensación²⁸.

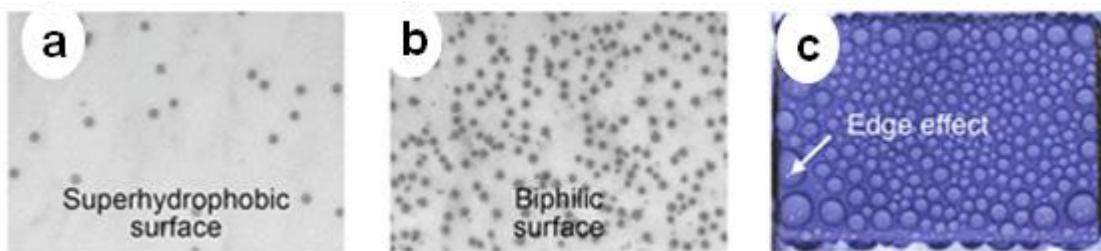


Figura 5. a) Nucleación de gotas en superficies superhidrofobicas, b) Nucleación de gotas en superficies bifílicas, c) Efecto del borde en la condensación ²⁹

La **Figura 5a y 5b**; respectivamente, muestran las imágenes de la nucleación inicial en una superficie superhidrofóbica. Una superficie bifílica la cual consiste en un sustrato superhidrófobo y nano sitios hidrófilos ³⁰.

En la superficie bifílica se puede controlar la densidad de nucleación, ajustando la densidad del sitio hidrófilo, que aunque es un reto tal ajuste, de hacerlo permite una tasa de recolección de agua de aproximadamente 349% mayor que una superficie superhidrofóbica. Además de la nucleación, el crecimiento de las gotas también se puede controlar artificialmente³¹. En la **Figura 5c**, observamos los efectos de borde en la condensación. En este efecto lo que sucede es que las gotas en las esquinas o bordes pueden crecer más rápido que otras, ya que pueden acumular más vapor en el proceso de condensación. En ciertos casos, puede incluso aumentar el crecimiento de las gotas hasta un 500%. Dicho efecto se ha aprovechado en distintos dispositivos captadores de agua mediante manufactura aditiva ²⁹.

Los mecanismos de formación de gotas, así como su transporte sobre la superficie de las espinas son temas de gran interés científico y tecnológico. F.T. Malik y colaboradores (2016) realizaron un estudio sobre estructuras jerárquicas de espinas de cactus que ayudan en el movimiento direccional de las gotas de rocío, el cual se enfoca principalmente en realizar un comparativo entre varios tipos de espinas de cactus, en donde se destaca la cactácea *C. cinerea*, la cual habita en regiones desérticas. Al analizar las imágenes de las gotas de rocío durante un tiempo, se encontró un claro movimiento a lo largo de las espinas del *C. cinerea*, hacia sus bases, incluso transportándose en contra de la gravedad, como se muestra en la **Figura 6**. La velocidad de las gotas de rocío a lo largo de las espinas no se vio afectada por la orientación de las mismas¹³.



Figura 6. Velocidad medida de transporte de las gotas de rocío en seis diferentes orientaciones de las espinas del *C. cinerea*.³²

En la **Figura 6** se observa que las gotas condensadas sobre espinas con pendiente positiva exhibieron velocidades de 8.4, 13.2 y 16.2 mm/h durante 10 min, lo que representa una distancia recorrida de 1.4, 2.2 y 2.7 mm, respectivamente. Interesantemente, las gotas condensadas sobre espinas con pendiente negativa también mostraron desplazamientos en contra de la gravedad (hacia la base del cactus). Durante 22 min, se midieron velocidades de 7.1, 7.36 y 5.18 mm/h

desplazándose 2.6, 2.7 y 1.9 mm, respectivamente. Distintos factores fueron considerados, la fuerza impulsora del movimiento, los gradientes de rugosidad y las microestructura de la superficie de las espinas, la forma cónica de cada espina, la coalescencia de las gotas y cualquier gradiente térmico. Estos factores son los causantes de la formación de la gota y el transporte de ella, como se puede ver en la **Figura 6**, las gotas de rocío se mueven a lo largo de las espinas y desaparecen a través de las areolas hacia el tallo de la planta³². La caracterización de las superficies naturales para su estudio ha sido fundamental en el desarrollo de proyectos de investigación. La rugosidad mostrada por espinas de cactus se muestra en la **Figura 7** a través de un perfil de profundidad.

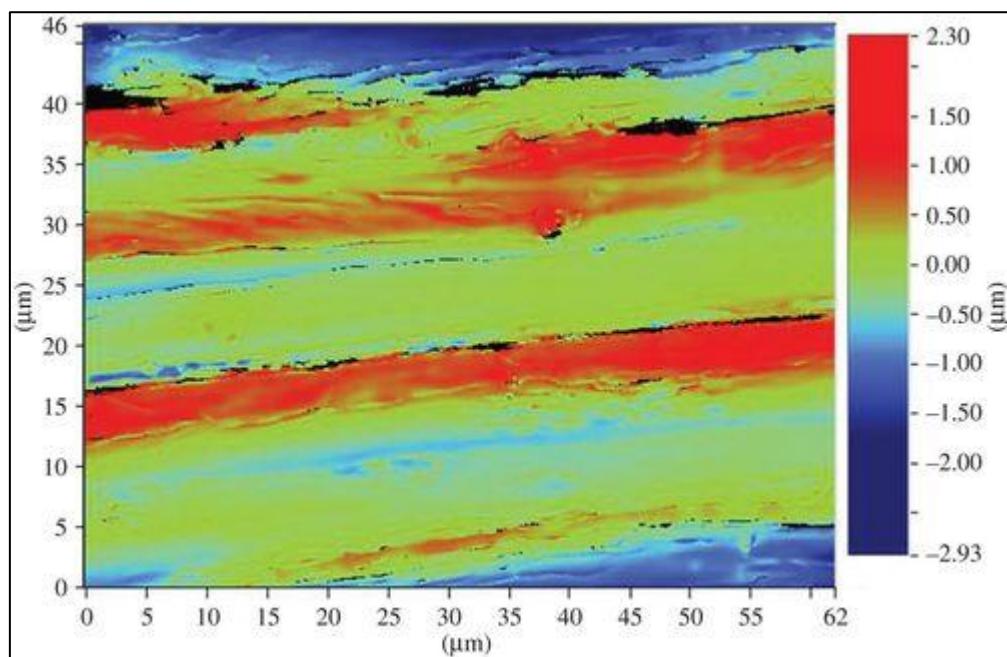


Figura 7. Imagen del perfil de rugosidad de la superficie WLI tomada en la base de una columna de *C. cinerea*.³²

En la **Figura 7** los autores observaron perfiles referentes a la rugosidad superficial de las espinas en las puntas y la base desde donde se pueden ver surcos o canales sobre la superficie de las espinas. Estos perfiles de rugosidad se utilizaron para conocer R_a y R_z ³³. R_a es una medida de la rugosidad promedio en un área designada y es la

medida de rugosidad superficial típica utilizada, mientras que R_z es una medida de la profundidad de la rugosidad, como ejemplo la **Figura 8** muestra un gradiente de rugosidad superficial desde la punta hasta la base de estas espinas³².

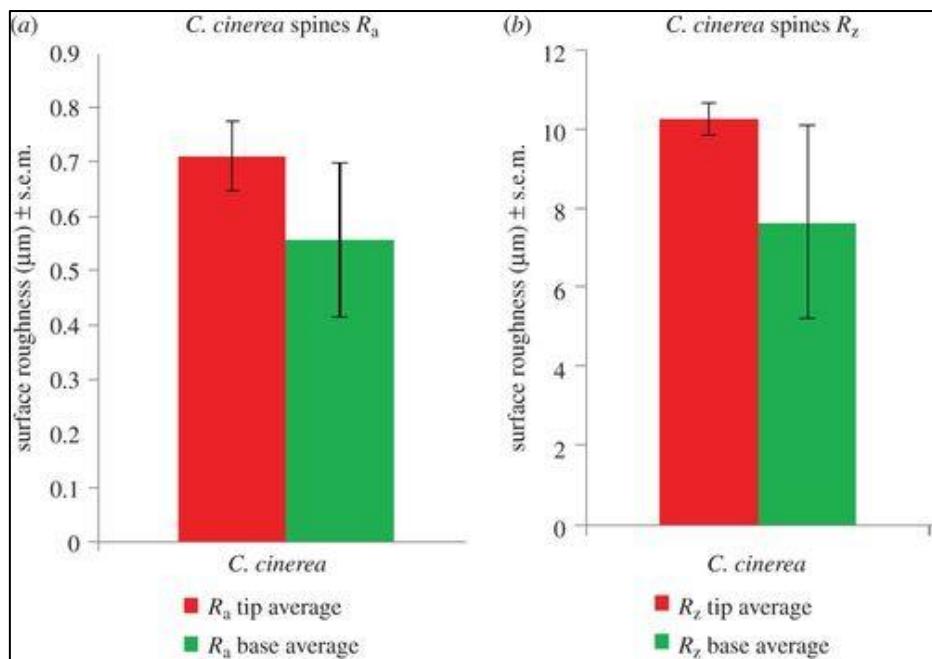


Figura 8. Parámetros de rugosidad superficial media aritmética en la punta y base de las espinas de *C. cinerea* para a) parámetro R_a y b) parámetro R_z ³².

Las puntas de las espinas de *C. cinerea* poseen microsurcos más estrechos en comparación con sus regiones de microsurcos de base más anchas. Considerando ambos parámetros de rugosidad (R_a y R_z) se concluyó que este gradiente de rugosidad es considerada la fuerza impulsora para el transporte de agua sobre las espinas. Así la gota de agua es impulsada desde el área más rugosa hacia las regiones menos rugosas, mediante el gradiente efectivo de superficie minimizando la energía libre³². Dicho comportamiento se explica a través de una serie de expresiones físicas las cuales se desarrollarán a continuación.

1.3.1 Fundamento físico teórico de la formación y transporte de gotas.

La capacidad de captación de agua presente en la neblina inspirada en los cactus se relaciona con la condensación de las gotas de niebla sobre las espinas y su posterior transporte. La captura de neblina se explica mediante dos mecanismos: la deposición de gotas sin transición de fase y, la condensación de vapor de agua con transición de fase. La primera ocurre cuando se tienen condiciones ambientales específicas, como una alta humedad relativa (caso tal de sitios áridos), allí las gotas de agua presente en la niebla o neblina se dispersan en el aire convectivo y chocan con una superficie sólida con una geometría específica (espinas de cactus), lo cual también se combina con algunas gotas las cuales pueden depositarse. Como se mencionó, uno de los factores los cuales llevan que las espinas de cactus capten las gotas de agua es su geometría, es por ello que Langmuir y Blodgett desarrollaron una correlación empírica para la deposición de pequeñas gotas de agua en una superficie con curvatura K , donde la eficiencia de deposición de las gotas η_d se puede calcular empíricamente mediante la siguiente expresión ³⁴.

$$\eta_d \approx 1 - \frac{2}{K u_0 t_0 + \pi}$$

Ecuación 1. Ecuación de Langmuir y Blodgett

Donde u_0 es la velocidad flujo de niebla y t_0 es el tiempo de relajación de las gotas. La eficiencia de deposición η_d es directamente proporcional con radio de curvatura K . La condensación de vapor de agua con transición de fase (de fase gas (neblina) a líquido (agua)) ocurre primero en una superficie sólida al formar gotas de agua a temperatura ambiente³⁵. Luego, las gotas pequeñas de agua se convierten en gotas de más grandes ³⁶. La eficiencia de la transición de fase gas-líquido se determina a partir de la diferencia entre la presión de vapor saturado y la presión de vapor real. La ecuación de Kelvin (**Ecuación 2**) ³⁷, permite obtener la presión de vapor real P en la interfaz vapor-líquido del agua .

$$P = e^{\frac{2\gamma V_m l}{RT} k} P_s \quad \text{Ecuación 2. Ecuación de Kelvin-Presión de vapor real}$$

La **Ecuación 2** presenta la ecuación de Kelvin donde R es la constante del gas ideal, T es la temperatura del ambiente, γ es la tensión superficial del agua, V_m es el volumen molar de agua, P_s es la presión de vapor saturado de agua sobre una superficie absolutamente plana y K es la curvatura de la superficie de la gota de agua capturada. A partir de las ecuaciones anteriormente descritas el radio de condensación crítico r_c de la gota se puede estimar como:

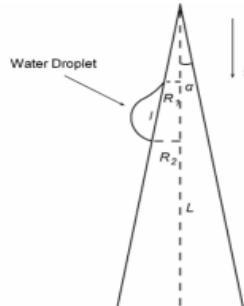
$$r_c = \frac{1}{K} = \frac{2\gamma V_m l}{[RT \ln(P/P_s)]} \quad \text{Ecuación 3. Radio de condensación crítico}$$

Según la **Ecuación 3**, la condensación del agua en la curvatura de la superficie de la gota K , se puede tomar como la curvatura de la interfaz sólido-líquido y por consiguiente se puede afirmar que al aumentar la curvatura de la interfaz sólido-líquido aumenta la presión de vapor P y reduce el radio de condensación crítico r_c . Concluyendo que es más fácil que la captura de niebla ocurra en las puntas de las espinas, favoreciendo a estructuras con mayor curvatura³⁷.

Anteriormente se mencionó que uno de los factores primordiales en la recolección de agua de neblina es el proceso de transporte de agua en las espinas inspiradas en cactus, por tal motivo, es necesario establecer las fuerzas impulsoras, de las cuales se derivan: 1) el gradiente de presión de Laplace que puede transportar la gota de agua de abajo hacia arriba (en contra de la gravedad) con un radio de sección transversal mayor y, 2) el gradiente de energía libre superficial que puede transportar la gota de agua a la región con menor rugosidad. Las gotas impulsadas por el gradiente de presión de Laplace, se refiere a que las gotas de agua pueden moverse a lo largo de la superficie de una espina. Donde el gradiente de presión de Laplace ($\Delta PLaplace$), se puede representar a partir de la **Ecuación 4**.

$$\Delta PLaplace = - \int_{R_2}^{R_1} \frac{2\gamma}{(R+\frac{l}{2})^2} \sin\alpha dz \quad \text{Ecuación 4. Presión diferencial de Laplace}$$

En la **Ecuación 4**, γ es la tensión superficial del agua, R es el radio de la sección transversal de la columna, R_1 y R_2 son el radio de la sección transversal de la columna en el borde superior y el borde inferior de la gota de agua, respectivamente. l es el diámetro de la gota de agua recolectada, α es el ángulo semi superior de la parte central de la espina, como se presenta en la **Figura 9**. En consecuencia, la fuerza impulsora total³⁷, ΔF_{total} para que la gota de agua fluya es descrita por la siguiente ecuación



$$\Delta F_{total} = \frac{2\gamma \sin \alpha}{R_1 + \frac{l}{2}} - \frac{2\gamma \sin \alpha}{R_2 + \frac{l}{2}} + \rho g l \cos \alpha.$$

Ecuación 5. Presión diferencial de Laplace

Figura 9 . Esquema de la gota de agua en la superficie de la espina .⁷

La fuerza impulsora total se muestra en la **Ecuación 5**, donde ρ es la densidad del agua, g es la aceleración gravitacional. Además cabe resaltar que en la geometría tipo espina R_2 siempre es mayor que R_1 . Por lo tanto, el gradiente de presión de Laplace es siempre positivo al transportar las gotas de agua desde la punta a la base. Además de la fuerza impulsora resultante del gradiente de presión de Laplace y la gravedad, el gradiente de energía libre de superficie dado por la rugosidad también es una fuerza impulsora para el movimiento de las gotas de agua como se muestra en la **Figura 9**³⁸.

Cabe hacer mención que aunque en este proyecto de Tesis de maestría no se evidencia físicamente la capacidad de captación a partir de las ecuaciones anteriores, se han adaptado parámetros geométricos claves como radio de sección transversal, inclinación y curvatura, los cuales son directamente proporcionales a la eficiencia de captación. Por lo que, en este proyecto de investigación, a través de los procesos llevados a cabo, busca con la implementación de los factores geométricos y

características superficiales, como la rugosidad estudiados en esta sección, obtener altas tasas de captación.

1.4 Sistemas bioinspirados para la captación de agua presente en la neblina

El alcance de la revisión en esta subsección, es sintetizar la comprensión actual de la recolección de niebla y analizar su potencialidad y limitaciones para el desarrollo futuro³⁹. Estructuras animales y vegetales han sido la base para el desarrollo de estructuras bioinspiradas, las cuales imitan características de rugosidad, geometría, composición química, entre otras; favoreciendo la captación de agua presente en la neblina. De los primeros reportes que se documentan, es en lugares como California, donde se utilizan colectores de niebla en forma de malla tal y como lo ejemplifica la **Figura 10**⁴⁰. No obstante, este tipo de estructuras no es muy eficiente donde la niebla es estacionaria, o no se tienen corrientes de aire significativas⁴¹.



Figura 10. Sistema colector de agua presente en la neblina bioinspirado de tipo malla⁴²

En la **Figura 10** se muestra el sistema colector tipo malla, dispositivo mayormente utilizado según el último informe de “Fog Quest Conference”, (organización que realiza

una serie de conferencias internacionales trianuales sobre recolección de niebla y rocío), la cual desde 1998 reúne hallazgos científicos y usuarios de la técnica de recolección de agua de neblina.

El dispositivo colector consiste en una malla perpendicular a la superficie del suelo basado en la malla Raschel (**Figura 11**). Este dispositivo FWC (Fog water collection) aprovecha el paso de neblina a través de la malla para condensar el agua y por gravedad caer en una canaleta la cual la conduce a un pequeño depósito.

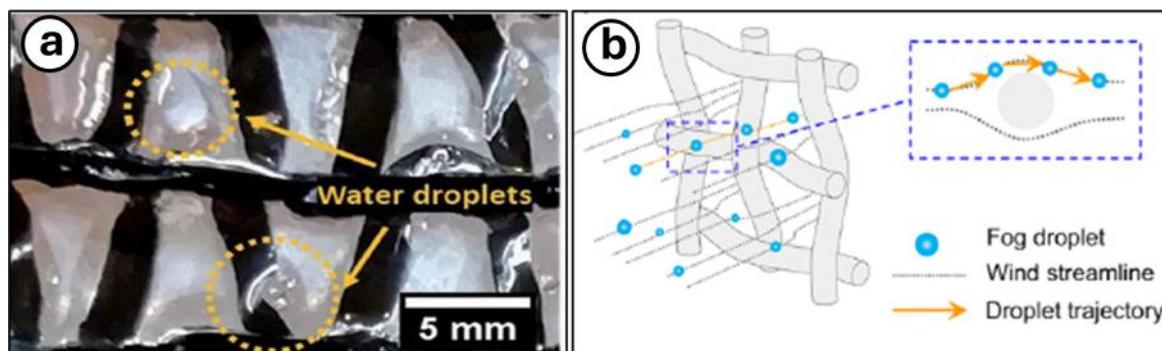


Figura 11. Malla Raschel a) Modelo con nano fibras depositadas en la parte superior⁴³ b) Ilustración esquemática del problema de desviación aerodinámica encontrada por las estructuras de mallas colectoras de niebla convencionales lo cual afecta la intercepción de las gotas.⁴⁴

El diseño mostrado en la **Figura 11** ha mejorado con el paso de los años en su parte estructural, la geometría del mallado, los materiales de fabricación o recubrimiento, y principalmente el sistema de almacenamiento, con el fin de mejorar la eficiencia de este sistema de captación. Este sistema estático no tiene una alta eficiencia, ya que no aprovecha el cambio de condiciones ambientales debido a las altas velocidades de los vientos, las exposiciones a cambios bruscos de climas; y debido a sus dimensiones, lo hacen un sistema bastante costoso económico hablando. Físicamente observamos que esta baja eficiencia se debe al arrastre viscoso del viento cargado de neblina (**Figura 11b**), el cual es desviado alrededor de la superficie⁴⁵. Por lo que en solución a este aspecto se busca controlar el flujo de viento, formando

vértices rotatorios, los cuales regularan la trayectoria de la neblina entrante, y así, conducir las gotas⁴⁴

Los factores que conlleva la recolección por parte de las espinas de los cactus se han desarrollado varias investigaciones, una de ellas es el Kaktus Kirigami el cual se trata de espinas de recolección de niebla inspiradas en cactus del cono mediante el diseño de un kirigami en forma de cactus (**Figura 12a**). El kirigami fue infundido en cera con forma anisotrópica para reproducir la función de las espinas de una cactácea, es decir, la captura eficiente de gotas de niebla y la rápida actualización de la interfaz de recolección a través de la autopropulsión direccional de gotas.¹⁴

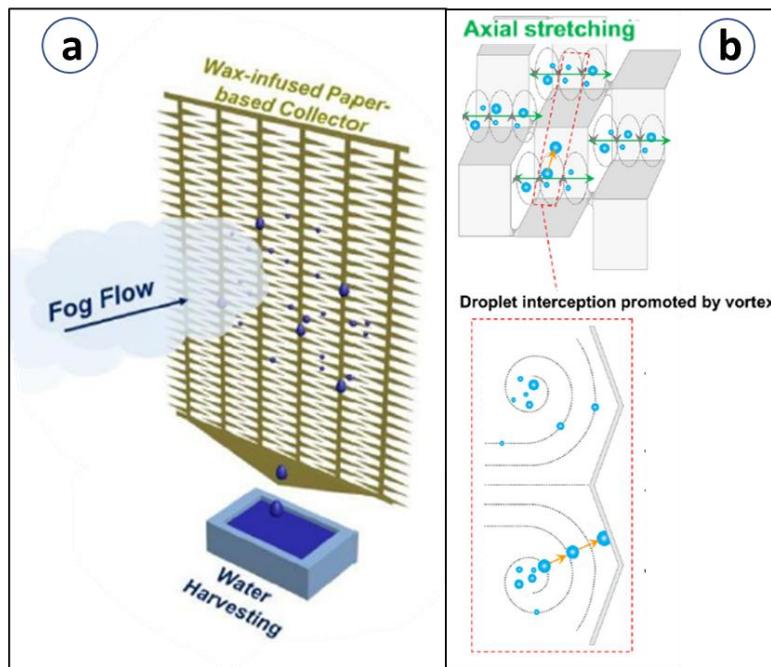


Figura 12. Estructura tipo Malla modificada (a) Estructura 2D Kirigami.¹⁴ (b)Vórtices Tubulares que se forman en aberturas-Trayectoria de las gotas al entrar a el vórtice.⁴⁴

La eficiencia de este tipo de sistemas depende de factores físicos como lo es la formación de los vórtices mostrados en la **Figura 12**, pero otra parte muy importante es la manufactura de ellos, por lo que se debe tener claro físicamente como es que sucede esta captación de agua por parte de las espinas. La simulación de fluidos en

el Kaktus Kirigami sugiere que la columna vertebral más delgada con un ángulo de vértice pequeño proporciona una mayor velocidad de flujo hacia adelante, para capturar mejor la niebla como se muestra en la **Figura 12b**. La estructura simplificada del cactus kirigami bajo un flujo de niebla de ~220 cm/s, presenta una tasa de recolección de agua de ~4000 mg/cm²·h, que es 1,6 y 1,1 veces la tasa de colectores tipo arpa y placa respectivamente.⁴⁴

Zhang y colaboradores (2015) realizaron un proyecto a partir de la preparación de microestructuras super hidrófobas, mediante tecnología de impresión por chorro de tinta mostrado en la **Figura 13**, inspirada en el comportamiento de recolección de niebla de los insectos de la familia *Stenocara*.

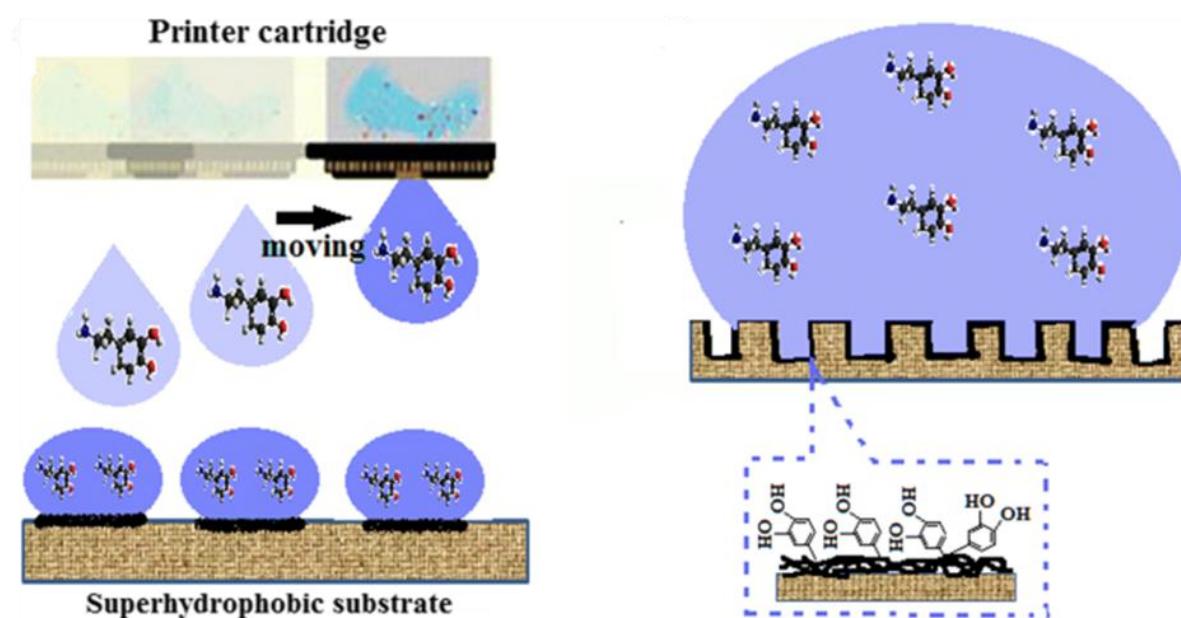


Figura 13. Impresión por inyección de tinta con micro patrones para obtener superficie superhidrófoba²⁶

En el método de impresión por chorro de tinta las áreas y los tiempos de contacto deben mantenerse de manera eficaz y adecuada para garantizar patrones hidrofílicos estables durante el comportamiento de humectación de las microgotas acumuladas en

las superficies superhidrofóbicas. La eficiencia de recolección de agua con el sustrato superhidrófilo es de ~ 14.9 mg cm²/ h ⁴⁶, mientras que el sustrato superhidrófobo aditivado con polidopamina (arreglo de pilares de 500 μm y distancia de separación entre pilares de 1000 μm) presenta un rendimiento de ~ 61.8 mg cm²/ h. Este estudio es importante porque muestra que las superficies super hidrófilas micro revestidas preparadas mediante el método de impresión por chorro de tinta exhiben un mayor rendimiento de recolección de niebla en comparación con las superficies super hidrófilas y superhidrófobas homogéneas, y esta estrategia es más fácil para la fabricación a gran escala.

Por otra parte, Wang y colaboradores(2015), inspirados en los insectos *Stenocara* del desierto de Namib, obtuvieron una superficie híbrida con un patrón super hidrófobo para la recolección de niebla de alto rendimiento(**Figura 14**). El método se basa adicionar una capa de perfluoro-poliestireno sobre una gasa a base de cobre modificada super hidrófobamente mediante el procedimiento de prensado térmico. La tasa de recolección de agua para la combinación de perfluoro-poliestireno, superficie con patrón hidrófilo-super hidrófobo, es de 159 mg.cm²/h ⁴⁷.

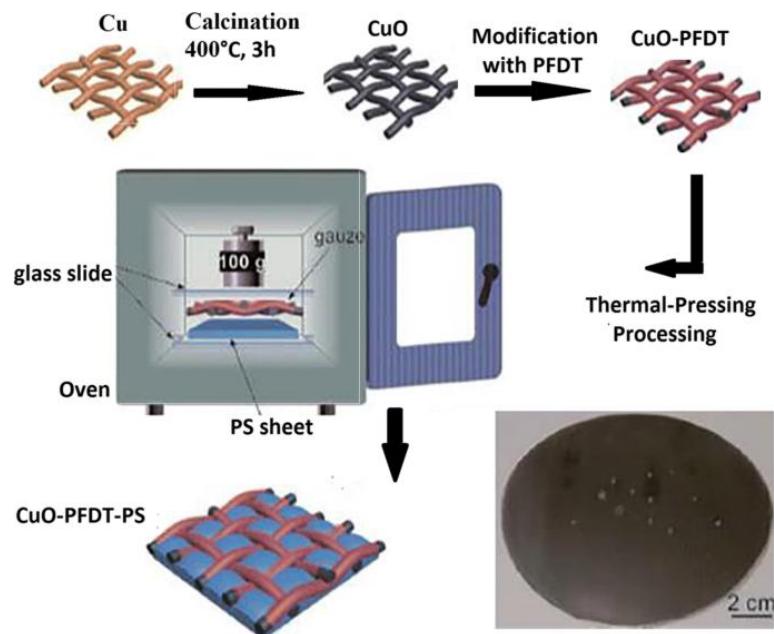


Figura 14. Tejido biomimetico colectro de agua de neblina⁴⁸

El Desarrollo de sistemas de captación de agua a partir de marcos 3D fue objeto de estudio de Wenle Pei y colaboradores (2021). Inspirados en las peculiaridades de super humectabilidad de las espinas de los cactus y las plantas carnívoras, diseñaron un marco tridimensional super hidrófobo con infusión de líquido, generando nano espinas e infundiendo lubricante líquido en las nano texturas. (ver **Figura 15**).

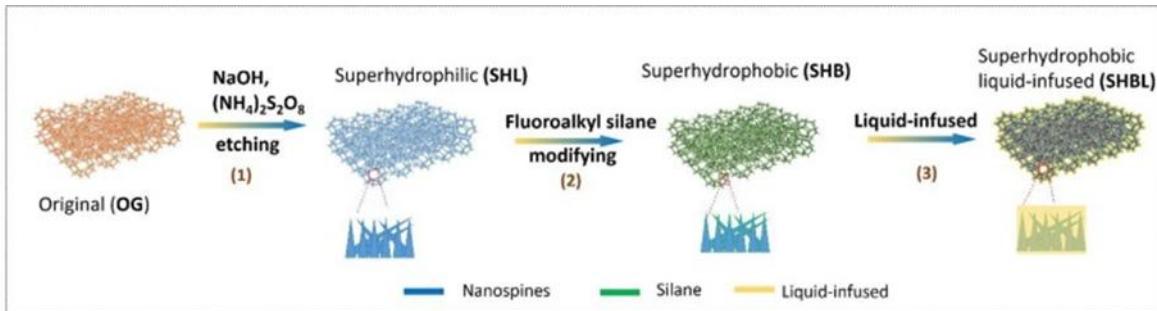


Figura 15. Fabricación del marco con estructuras super hidrófilas a partir del grabado de la espuma de cobre original⁴⁹

En el marco presentado en la **Figura 15** la interfaz con infusión de líquido podría capturar eficazmente las pequeñas gotas y luego acelerar su crecimiento, así como la coalescencia y el transporte de la gota. Además, la presencia de nano espinas aumenta la fuerza capilar, bloqueando eficazmente el lubricante en el marco logrando regiones hidrofílicas e hidrofóbicas. Logrando una alta tasa de recolección de niebla 15,2 g/cm³ h con una excelente estabilidad cíclica de recolección de niebla⁴⁹.

La implementación de micro geometrías en estructuras con el fin de capta agua a desarrollado una serie de dispositivos los cuales buscan captar agua presente en el ambiente como se muestra en la **Figura 16**. Micro geometrías implementadas en dispositivos de captación de agua se han desarrollado como es el caso de Wang, Sol & Wan (2020) los cuales desarrollaron un sistema de recolección de agua atmosférica (AWH) que se basa en la adsorción a partir del impulso generado por la energía solar. Este sistema consta de un agente higroscópico de cloruro de litio, un esqueleto hidrófilo de celulosa nano fibrilada y un absorbente solar. Donde a partir de la

activación de un aerogel higroscópico de biopolímero nanoestructurado (NBH, se genera una bicapa porosa intrínseca con canales a escala micro y nano, que se encuentran interconectados entre ellos, con una alta capacidad de almacenamiento de agua. Lo que permite absorber fácilmente la humedad presente en ambientes con baja humedad relativa, ya que debido a la composición química superficial y con la ayuda de la energía solar, se hace conversión del vapor de agua en agua condensada.

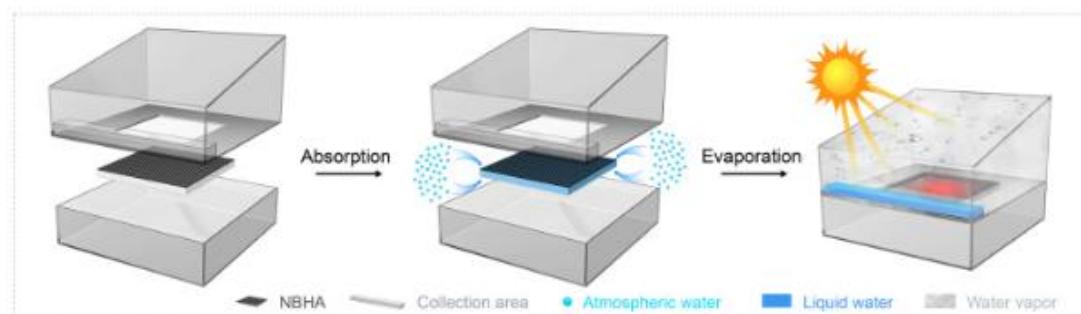


Figura 16. Ilustración esquemática que muestra la estructura de un dispositivo basado en NBHA y el proceso AWH exterior que utiliza el dispositivo⁵⁰.

Estructuras tipo espina fueron desarrolladas basadas en la membrana de Janus (Membrana permeable)⁵¹. A partir de una nueva estructura de recolección que acopla una aguja a un micro canal jerárquico como lo muestra la **Figura 17**. En dicha figura se observa un sistema con una membrana de poro cónico con el objetivo de mejorar la eficiencia de recolección mediante la regulación del comportamiento del líquido, el transporte de alta velocidad en el micro canal y el goteo. Los efectos sinérgicos de la estructura jerárquica canal-poro cónico, la capacidad de captación, el transporte y el goteo construyen un mecanismo subyacente para mejorar la eficiencia de recolección de niebla.⁵²

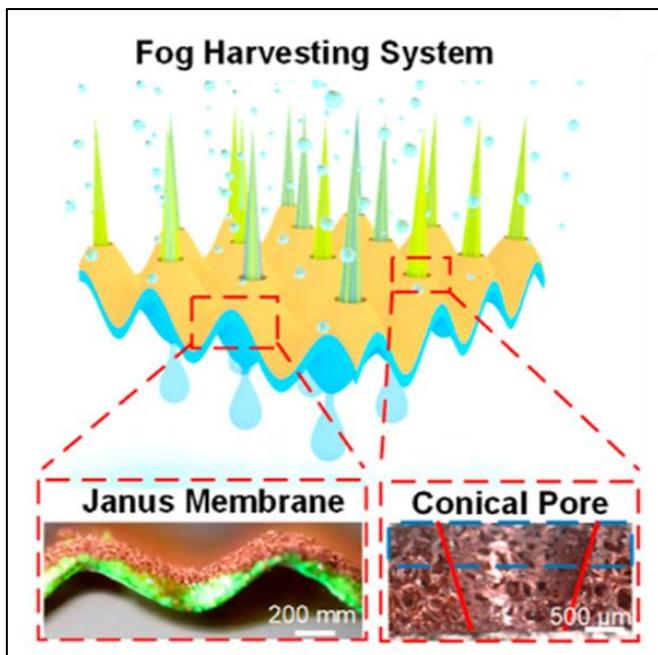


Figura 17. Agujas distribuidas sobre una membrana permeable⁵²

Los ejemplos mostradas en esta sección citan los distintos mecanismos de captación y de almacenamiento de agua en regiones áridas y semiáridas, bioinspirados en sistemas naturales. Cabe resaltar que el principal sistema bioinspirados estudiado hasta el momento se basa en las espinas de los cactus, ya que son sistemas pasivos de captación y su eficiencia se basa en factores como, la inclinación, rugosidad y los fenómenos físicos que desafían la gravedad⁵³

1.5 Sistemas bioinspirados impresos en 3D para la captación de agua de neblina.

Con el fin de obtener modelos tridimensionales con alta eficiencia y de manera rápida, la manufactura aditiva es una tecnología emergente la cual se ha desarrollado y aumentando la calidad y resolución de sus productos. En síntesis, la impresión en 3D convierte un diseño asistido por computadora en modelos reales. Dicha técnica consiste en la construcción de modelos tridimensionales a partir de la adición capa a capa. Donde a partir de distintos grosores de capa y a través de una programación integrada en los equipos, permite la versatilidad y la alta resolución al momento de la obtención de distintos modelos. Este tipo de manufactura reúne y optimiza procesos los cuales en otros tipo de manufactura implican mecanizados de materiales o el uso de moldes aumentando los tiempos de producción.⁵⁴

El desarrollo de estructuras tridimensionales bioinspiradas han sido desarrolladas mediante el uso de la manufactura aditiva. El desarrollo de superficies a partir de un diseño asistido por computadora es impreso de forma tridimensional para obtener modelos con geometrías tipo espina. Las geometrías pueden variar su rugosidad, grado de ramificación, separación entre ellas, entre muchos otros parámetros geométricos. Adicional a los parámetros geométricos diseñados, se busca obtener características químicas en el material, ya sea antes o después de la impresión del modelo, con el fin de obtener características hidrofílicas o hidrofóbicas las cuales aumenten la eficiencia de captación. El desarrollo de estructuras jerárquicas impresas en 3D bioinspiradas se ejemplifica en a **Figura 18**, en donde se ha variado cada uno de los parámetros mencionadas con anterioridad, logrando una doble humectabilidad en pro de la captación de agua.

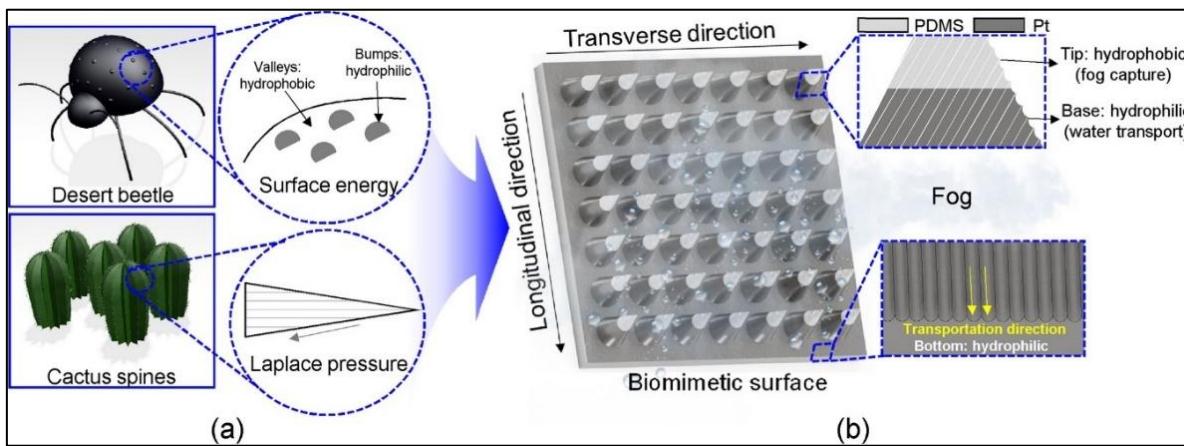


Figura 18. Superficies jerárquicas bioinspiradas (a) Ilustración de las características de los élitros del escarabajo del desierto de Namib y de las espinas de los cactus; b) esquema de las superficies biomiméticas estructuradas jerárquicamente inspiradas en los élitros del escarabajo del desierto⁵⁵

Choi Y., Baek K. & So (2023) desarrollaron una superficie como se muestra en la **Figura 18b** la cual está estructurada jerárquicamente y se obtiene a partir de impresión 3D. La superficie impresa cuenta con una denominada doble humectabilidad, la cual refiere a tener regiones hidrofóbicas e hidrofílicas para la recolección de niebla⁵⁵. Este tipo de estructura esta bioinspirada en espinas de cactus y en los élitros de los escarabajos del desierto de Namib, debido a que se busca imitar la capacidad de autotransporte presente en las espinas de cactus derivada del gradiente de presión de Laplace. A partir de la impresión 3D se implementan patrones micro-ranurados los cuales surgen del efecto de escalera propio de la rugosidad de los impresos. A partir del método de deposición parcial de metal y con un enmascaramiento a base de cera se logra la doble humectabilidad la cual permite que los sistemas de captación aumenten la eficiencia del transporte de las gotas mediante la funcionalización de la superficie. A partir de difusión controlable como se muestra en la **Figura 19** se deposita sobre una superficie impresa en 3D con distintos diseños de espinas un recubrimiento que aumente la capacidad de captación de este sistema.

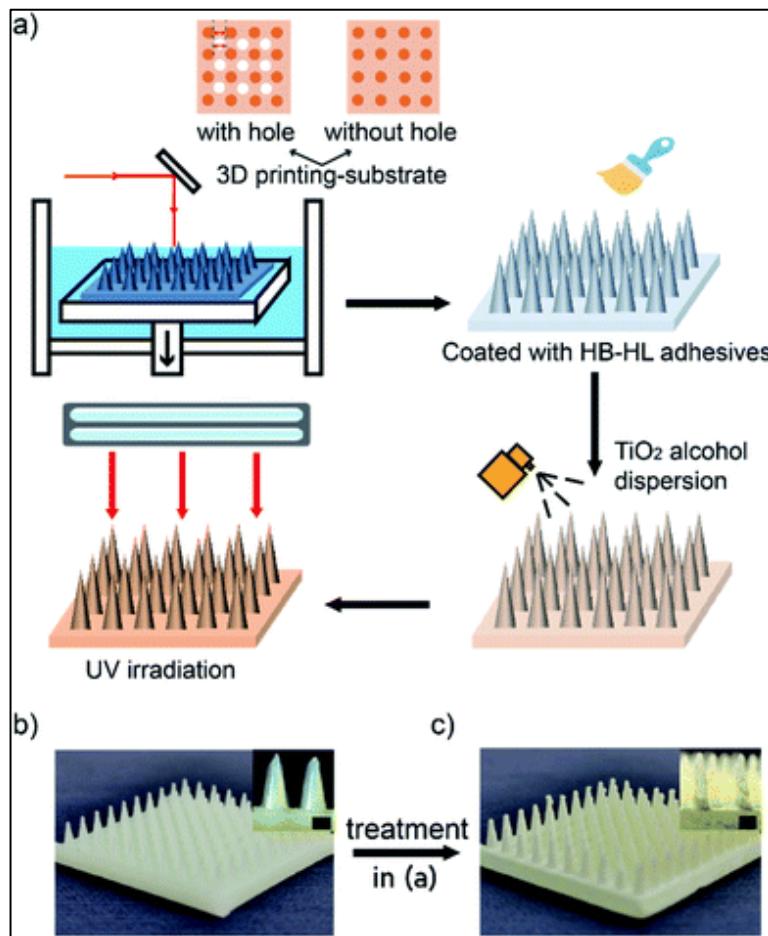


Figura 19. Diagrama esquemático de la fabricación de conjuntos de conos con carácter superhidrófobo-superhidrófilo. Los paneles b) y c) muestran las fotografías de las muestras antes y después del proceso de fabricación como se muestra en el panel a), respect⁵⁶

Linhui Peng y colaboradores (2021) a partir de la impresión 3D y con el uso del método de difusión controlable inducido por luz ultravioleta, fabricaron materiales biomiméticos, los cuales incorporan el carácter hidrofóbico e hidrofílico en su estructura. A partir de la impresión se busca imitar estructuras tipo cono, variando la distancia entre ellos a partir de la incorporación de orificios. Con el uso del método de difusión controlable se busca separar la foto máscara, y así tener una regulación de la humectabilidad, incorporando un recubrimiento de TiO₂ a partir de aspersión (**Figura 19**).

Por su parte, Penghui Zhu y colaboradores (2023) construyeron un andamio estructurado jerárquicamente de nano fibras de celulosa y cloruro de litio (LiCl) a partir de impresión 3D con una posterior liofilización. A partir del diseño de poros multi-escala se buscó el confinamiento eficiente del LiCl aumentando la cinética con la superficie. En comparación con un aerogel liofilizado convencional, el andamio impreso en 3D exhibe un aumento en la tasa de absorción de 1,6 veces, y una tasa de liberación de agua 2,4 veces mayor. Concluyendo que un sistema de andamios bicapa pueden captar 0,63 g/24h (0.02 g/h) por gramo de adsorbente.⁵⁷.

La combinación de parámetros geométrico y químicos es indispensable para la obtención de un sistema biomimético. Xiangjia Li y colaboradores (2019) inspirándose en el mecanismo de recolección de niebla usado por los cactus construye un dispositivo de recolección el cual busca obtener altos valores de recolección. Encontrando que uno de los principales obstáculos para llegar a estos valores es la dificultad al momento de replicar los grupos naturales de las espinas ramificadas mediante métodos de fabricación tradicionales. La **Figura 20** muestra una serie de modelos matriciales variando el número de espinas por núcleo, las cuales fueron fabricadas por impresión 3D y recubiertas por nanotubos de carbono.

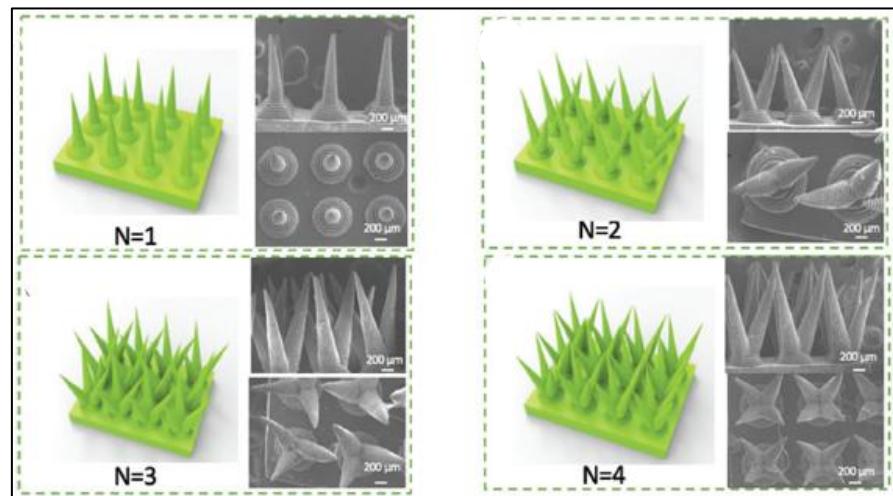


Figura 20. Modelo de matriz de espinas; imágenes SEM de las matrices miméticas de cactus impresas en 3D con diferente número de espinas: N = 1 - 4.

Con el uso de la impresión 3D basada y la acumulación de superficies sumergidas se obtienen los modelos con distinto número de espinas por núcleo. Las cuales se decoran por pulverización con un recubrimiento hidrófobo de nanotubos de carbono. La ramificación de espinas dispuestas hexagonalmente, impresas con un ángulo de inclinación de 10° y aplicando un revestimiento hidrofóbico, mejoran el flujo de aire permitiendo un aumento en el peso de los arreglos causado por la condensación y transporte de las gotas en la superficie. Lo que se traduce a una alta eficiencia de captación de alrededor de 1.21 g/h @95 % de humedad relativa.⁵⁸.

El transporte de las gotas condensadas de agua es un factor importante, ya que aumenta la eficiencia de captación al trasportar la gota hacia la base. Es por ello que a partir de geometrías como la que posee el peristoma de la *N.Alata* mostrada en la **Figura 1**, se desarrollaron canales bioinspirados en ellos, diseñados e impresos en 3D como se muestra en la **Figura 21**, la cual esquematiza los modelos.

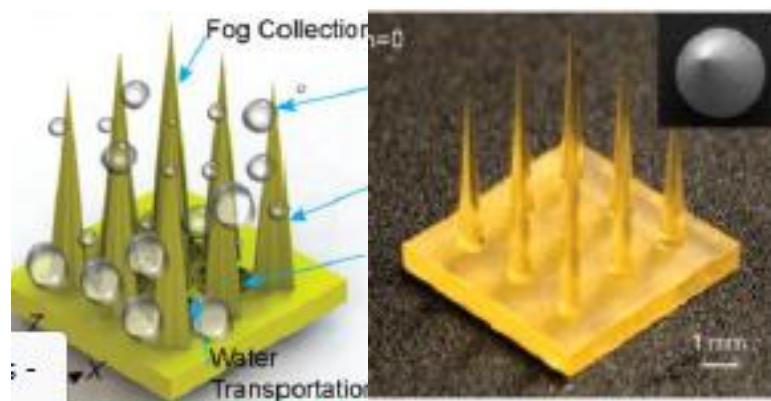


Figura 21. Espinas acanaladas colectoras de niebla impresas en 3D⁷

En toda la literatura científica se han estudiado sistemas en forma de espinas cuya longitud no supera 1 cm de altura, por lo que podrían clasificarse en un grupo especial y denominarlos dispositivos tipo plataformas con espinas bioinspiradas. Por lo anteriormente dicho Luyang Liu y colaboradores (2021) desarrollaron un colector de niebla híbrido el cual consta de espinas inspiradas en cactus con crestas longitudinales

y canales inferiores inspirados en peristomas, a los cuales se le adicionan ranuras curvas e inclinadas con orificios en arco. El colector de niebla (**Figura 21**) se fabricó mediante una impresión de interfaz líquida micro continua personalizada con una resolución de 6,9 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ y una velocidad de 125 $\mu\text{m}/\text{s}$.⁷ Este sistema de captación logró una eficiencia de 1.28 g/h @90 % de humedad relativa.

1.5.1 Micro-estereolitografía (μSLA)

La micro estereolitografía (μSLA , por sus siglas en inglés) es una técnica de impresión 3D la cual ha causado un gran impacto en la industria de manufactura debido a la alta resolución en los modelos obtenidos. Es un proceso el cual consiste en sumergir una plataforma en una resina líquida, donde un láser ya sea de punto único o doble laser polimeriza la resina formando cada una de las capas las cuales llegan a ser de escala micrométrica dependiendo la resolución de cada impresora. Una vez polimerizada cada capa, la plataforma sumergida en la resina se mueve verticalmente hacia arriba de la cuba y después de un tiempo determinado (tiempo programado por fabricantes de las impresoras), vuelve a ingresar a la cuba llena de resina para la construcción de la siguiente capa, la esquematización de la patente la cual es base en funcionamiento y diseño de las impresoras en la actualidad se presenta en la **Figura 22**. Es de importancia resaltar que la trayectoria del láser está dada por una programación la cual es el resultado de una conversión del archivo del diseño asistido por computadora brindado previamente, a una serie de movimientos en dos ejes de los motores dando el desplazamiento del láser.

La impresión 3D por SLA se fundamenta en la irradiación con luz UV de resina foto curable, donde los foto iniciadores forman radicales libres, los cuales reaccionan con los monómeros de la resina. Posteriormente, a través de un láser se da la geometría superficial de la capa para su polimerización. Los primeros modelos de impresoras se remontan a los 80's a través de la marca Huls'3D. A través de los años se ha mejorado la calidad de las resinas, parámetros de impresión como el tamaño del haz de laser y

principalmente la resolución de impresión, siendo en la actualidad las industrias japonesas los principales proveedores de estos dispositivos.⁵⁴

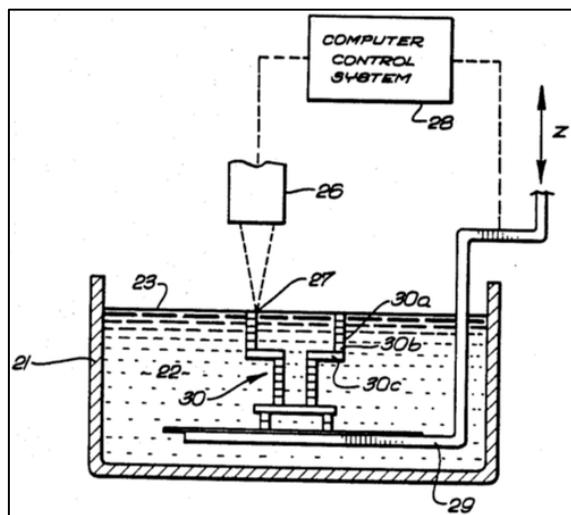


Figura 22. Imagen original de la patente estadounidense 4575330 que presenta el término y el concepto de estereolitografía. Descripción de los componentes utilizando el esquema de numeración de la patente: (21) contenedor, (22) líquido curable por UV, (23) superficie de trab⁵⁹

Aunque la impresión 3D es una de las técnicas más usadas para el desarrollo de sistemas de captación de agua presente en el ambiente, la técnica de micro estereolitografía no se ha reportado en investigaciones similares a la biomimetización de espinas para captación de agua.

1.5.2 Estructuras biomiméticas o bioinspiradas impresas por SLA.

La impresión 3D se ha utilizado para el desarrollo de estructuras biomiméticas con rugosidades variables. Wang y colaboradores (2013) caracterizaron la rugosidad de sus impresos en 3D por SLA para el desarrollo de superficies hidrófobas a partir de estructuras de postes micrométricos (diámetro de 300 µm) y rugosidades del orden de 30 µm en sus lados. Sin embargo, al utilizar esta configuración las capas de impresión

no interactúan con una gota de agua, ya que no están presentes en la cara superior de los postes, y no contribuyen necesariamente a la humectabilidad de la superficie a menos que la gota penetre en los espacios de aire donde la rugosidad podría incluso aumentar la adherencia del fluido.⁶⁰ Con el fin de imitar una estructura jerárquica de tres niveles, se utiliza por primera vez canales impresos en 3D(SLA) (100 µm de ancho) con una rugosidad intrínseca entre capa de 10 µm, los cuales se recubrieron con nanopartículas de TiO₂ de 22 y 100 nm. Esta estructura presentó un ángulo de contacto de avance máximo de 165° siendo mucho más bajo que otras superficies impresas en 3D, debido a la presencia de bolsas de aire en la interfaz superficie/agua⁶¹.

Recientemente, con el objetivo de tener una estructura bioinspirada, Gaxiola y colaboradores en 2021 estudiaron una serie de superficies superhidrofóbicas y parahidrofóbicas impresas en 3D por micro estereolitografía. Las estructuras (**Figura 1d**) en forma de pilar de diversos altos y pitch (distancia entre pilares) presentaron características de mojabilidad similares a las existentes en el caparazón de los escarabajos (manchas super hidrofóbicas). Dado que el proceso de manufactura y materiales de los impresos son idénticos a los usados en este proyecto de investigación, es de vital importancia tener en cuenta los resultados y parámetros usados por Gaxiola y colaboradores.

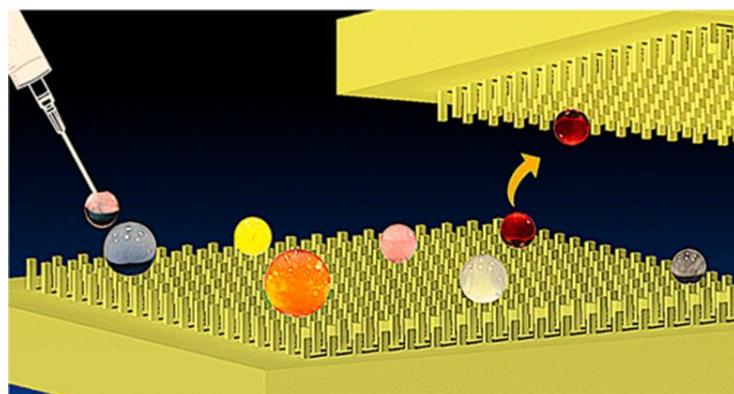


Figura 23. Plataforma multireaccion impresa en 3D por microesterolitografia

La aplicación de las estructuras de pilares fue el desarrollo de plataformas multi reacción, en la cual se logró controlar la mojabilidad mediante la variación de parámetros geométricos como la altura y distancia de los pilares. La plataforma posee características superhidrofóbicas generando un espacio propicio para la reacción de compuestos químicos.

Por su parte, Belén Barraza y colaboradores (2022) realizaron una caracterización a través de imágenes FE-SEM (**Figura 24**) de las superficies impresas planas con micro patrones (impresos en una impresora FORM 2 de la compañía Formlabs). La imagen de la superficie plana en la **Figura 24a**, muestra una rugosidad de alrededor de 10 μm que es característica de las capas de impresión utilizado para la impresión 3D SLA. Esta rugosidad implica que la superficie impresa es anisotrópica dependiendo de la dirección de impresión. La topografía de la superficie de los micro canales impresos muestra bordes redondeados como se muestra en la **Figura 124b** en lugar de los rectángulos perfectos originalmente diseñados por CAD. Esto es debido al tamaño del diámetro del rayo láser (spot) de alrededor de 140 μm , ya que los micro canales se imprimen perpendicularmente a la orientación de la capa de impresión. Las capas de impresión se agregan en el plano zy, agregando altura en el eje x . Sin embargo, esta discrepancia entre las morfologías diseñadas y obtenidas incluso amplifica y favorece el aspecto biomimético de la superficie, ya que se generan canales ondulados sobre una superficie, similar al observado en las espinas naturales.

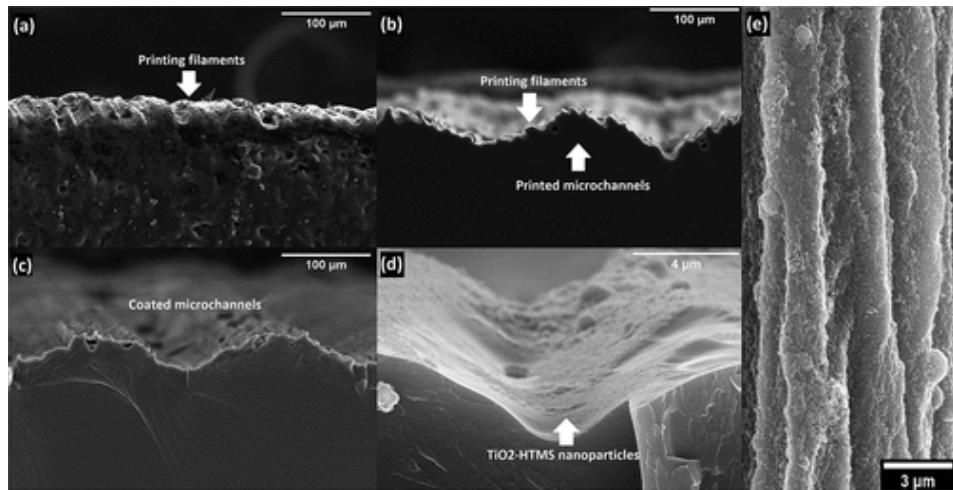


Figura 24. FE-SEM de las superficies impresas 3D SLA (vista perpendicular, plano zy): (a) superficie plana que muestra capas de impresión, (b) microcanales impresos (altura diseñada de 100 μm) con capas de impresión en la parte superior, (c) biomimético microcanales (d) nanopartículas de TiO₂ -HTMS depositadas en los microcanales, y (e) vista superior de las nanopartículas de TiO₂ -HTMS colocadas sobre los filamentos de impresión.⁶¹

Respecto al recubrimiento, las nanopartículas se distribuyeron sobre las capas de impresión de forma homogénea (**Figura 24d y 24e**).⁶¹ Los canales impresos además no coinciden con las dimensiones diseñadas, especialmente su altura (de 50 a 30 μm) ni mantienen un perfil cuadrado el cual es el esperado en la impresión 3D como se muestra en la **Figura 25**. A partir de la impresión en 3D tres de estructuras con diferentes alturas (50, 75 y 100 μm), permitió un análisis más detallado del efecto de esta variable, dando como resultado geometrías acanaladas con perfiles en forma de arco⁶². Cabe destacar que la rugosidad que surge de las capas de impresión en 3D observados en la superficie plana, proporcionan una rugosidad jerárquica a los micro canales, mejorando así la similitud con las papillas observadas en la superficie de la hoja de arroz o de otras estructuras como lo son las espinas de cactus.

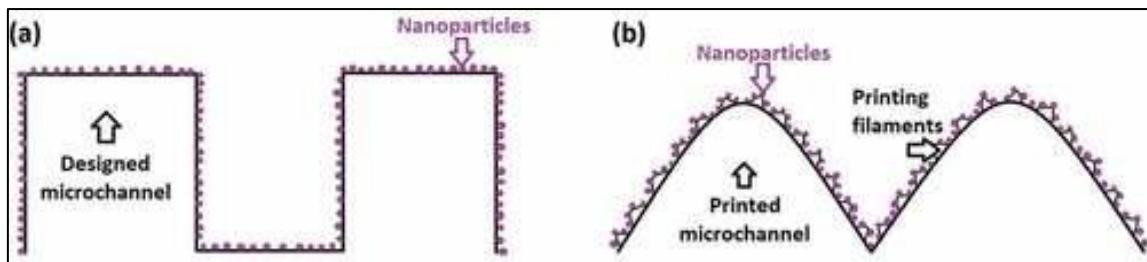


Figura 25. (a) Superficie jerárquica de dos niveles diseñada para el material biomimético: microcanal diseñado y nanopartículas. (b) Superficie jerárquica real de tres niveles para el material biomimético: microcanal impreso, filamento de impresión y nanopartículas.⁶¹

El análisis de la literatura relacionadas con la captación de niebla, inspirados en espinas de cactus, evidencia la necesidad de estudiar la geometría de las espinas y el recubrimiento de las mismas para obtener una superficie con un balance hidrófilo/hidrófobo⁶³. Aquí surge la motivación de este estudio de tesis de maestría con la innovación en la geometría de la estructura y en el diseño de un sistema pasivo de captación de agua, el cual mejore la eficiencia, teniendo en cuenta el material y sus propiedades hidrofóbicas-hidrofílicas. Sin dejar de lado variables importantes y anteriormente citadas como lo son la rugosidad y secciones transversales de las geometrías⁶⁴. Además, se propone por primera vez utilizar espinas huecas, ya sea rectangular o una sección en forma de perfil alar (aerodinámica), dando como resultado una estructura tridimensional, distribuida verticalmente en un arreglo matricial sobre una superficie con conductos previamente diseñados y eficientemente comprobados.¹⁷

1.6 Recubrimientos Hidrofóbicos - Hidrofílicos base alcoxisilanos

De acuerdo con las características que se mencionan se busca tener una superficie híbrida o bifilica la cual a lo largo de ella se encuentren sitios con distintos ángulos de contacto que favorezcan la captación y el transporte de las gotas, por ello es necesario recubrir las superficies impresas en 3D. El recubrimiento y la metodología que sigue se fundamenta en las características de la misma superficie que se deseé recubrir.

Se deben tener en cuenta características esenciales del recubrimiento, no solo el comportamiento físico frente al agua, uno de estos factores a tener en cuenta es su resistencia a condiciones ambientales de un recubrimiento. Hernández y colaboradores (2023), evaluaron la resistencia de rayado de una serie de recubrimientos poliméricos sobre una base de vidrio. A partir de pruebas, se proporcionan dos recubrimientos capaces de reducir el desgaste de polímeros base agua y por tanto aumentar su tiempo de vida. El mejor recubrimiento fue observado al utilizar compuestos tipo silano, donde la dureza presenta los mejores incrementos en comparación a cualquier otro recubrimiento, incrementando de un nivel de 13B a 1B en la prueba del lápiz⁶⁵. Kuntz y colaboradores (2011), realizaron un estudio sobre películas de silanos, aminopropil tiretoxisilano y del aminoethyl-aminopropil trimetoxisilano, aplicados por el proceso de revestimiento por inmersión (dip-coating) sobre un acero galvanizado. El curado se realizó por radiación UV como térmicamente, encontrando que se obtienen ángulos de contacto mayores al curar con radiación UV.

⁶⁶.

Superficies híbridas orgánico/inorgánico se ha reportado recientemente. Tobón Sosa y colaboradores (2018) estudiaron y evaluaron películas de silano como pretratamiento en un recubrimiento híbrido de resina epólica y una solución de silano, que se ha sintetizado mediante proceso sol-gel. Además, con el fin de mejorar la adhesión al sustrato, se utilizó glicidoxipropil trimetoxisilano como recubrimiento, el cual se aplicaron 3 capas, dando como resultado películas uniformes, libres de defectos y con cierto grado de rugosidad. El curado fue térmico a 125°C durante dos horas⁶⁷.

Por otra parte, Kim y colaboradores (2018), inspirados en la estructura presente en la piel de los Colémbolos, fabrican estructuras tipo hongo flexibles mediante la técnica de micro moldeo. Este tipo de superficies reentrantes de forma de hongo se logró en aluminio y recubierta con agente silano como se muestra en la **Figura 26**.

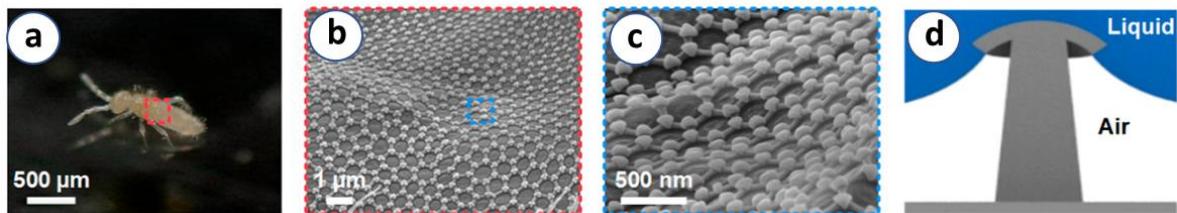


Figura 26. Fabricación de una superficie superomnífoba flexible y no fluorada. (a) Fotografía de un colémbolo (b) imágenes SEM de la textura regular de la piel.(c) Imagen SEM de la estructura fabricada (d) Una imagen de perfil de una suspensión líquida en la piel del colémbol

En las imágenes mostradas en la **Figura 26**, se puede observar por medio de una caracterización SEM la formación de estructuras tipo hongo (**Figura 26c**) y se compara con la imagen de la caracterización realizada a la piel de animal (**Figura 26b**). Concluyendo que a partir del desarrollo de las estructuras descritas se logran obtener superficies las cuales repelen la mayoría de los líquidos de baja tensión superficial como aceites, alcoholes e incluso disolventes florados, con buenas propiedades mecánicas aun después de modificar la energía superficial⁶⁸. El recubrimiento de superficies para generar rugosidades las cuales aumenten el ángulo de contacto, ha llevado a Song y colaboradores (2019) a generar estructuras cónicas tipo espina fabricadas con polidimetilsiloxano. A través de la técnica de perforación con láser y grabado químico, se generaron pilares cónicos y rectos, los cuales dan características superhidrofóbicas a la superficie sin necesidad recubrir por dispersión nanopartículas superhidrófobas⁶⁹. La manufactura por uso de molde y el grabado químico son algunas técnicas efectivas para creación de superficies con alto grado de hidrofobicidad.

La combinación de propiedades hidrofóbicas e hidrofílicas presente en estructuras de la naturaleza han inspirado al desarrollo de proyectos, pero un factor el cual no se ha estudiado es como mantener un ángulo de contacto hidrofóbico, pero con una alta adhesión a la superficie. Teisala y colaboradores (2014), recubren a partir de la técnica de spray de flama liquida con nanopartículas de TiO₂, tableros y sustratos de papel demostrando que las estructuras de superficie con escalas nanométricas tienen el efecto opuesto sobre la adhesión de las gotas, en comparación con estructuras de

escala micrométrica. Ya que la variación jerárquica de las superficies y la adhesión de nanopartículas contribuye a la adhesión de las gotas. Por lo tanto, se necesitan estructuras de escala submicrométrica y micrométrica para disminuir el área de contacto líquido-sólido y causar la super hidrofobicidad²². Debido a los resultados donde se evidencia que la escala nano o micrométricas contribuyen a las características hidrofóbicas y a la adherencia de nanopartículas Davis y colaboradores (2014) recubren por spray coating un sustrato de aluminio con poliuretano, silice y polifluoroacrilato para generar propiedades de anti adhesión ante el hielo. Debido a la adhesión de estas nanopartículas al sustrato se reducen la rugosidad y genera una interfaz sólido- líquido con presencia de aire apto para darle propiedades particulares a la superficie como se muestra en la **Figura 27**.

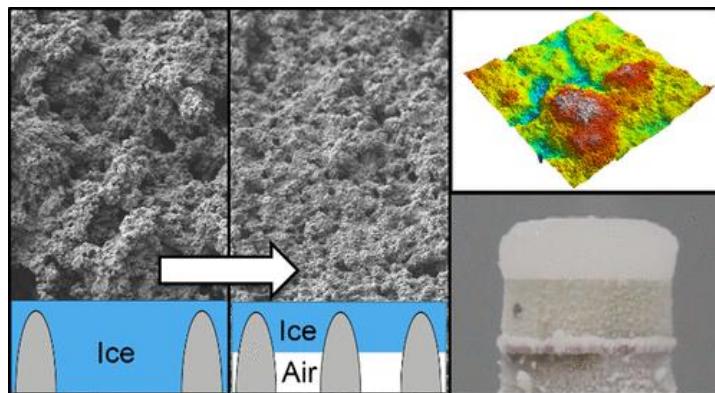


Figura 27. Imágenes SEM de superficie sin y con recubrimiento de poliuretano, silice y polifluoroacrilato⁷⁰

Las imágenes SEM mostradas en la **Figura 27** demuestran la modificación a la superficie, creando una interfaz con presencia de aire, la cual aumenta el carácter hidrofóbico de la superficie⁷¹. SA Mahadik y colaboradores (2016), realizaron un estudio comparativo sobre recubrimientos repelentes al agua mediante los métodos de recubrimiento por pulverización y por rotación. En este estudio se prepararon recubrimientos repelentes de agua a base de TiO₂ y SiO₂ sobre diversos sustratos metálicos y cerámicos donde se demostró que los recubrimientos por pulverización regeneran la super hidrofobicidad y mantienen propiedades de autolimpieza siendo

estables en ambientes exteriores. Presentando una resistencia mecánica a el impacto de gotas de agua sin reducir la transmitancia óptica del sustrato. A partir de una serie de caracterizaciones se logra demostrar que es posible controlar la humectabilidad y las propiedades fisicoquímicas de los recubrimientos a base de TiO_2 y SiO_2 . Demostrando que la rugosidad en los recubrimientos giratorios es menor que en los recubrimientos por pulverización, debido a ello los recubrimientos a partir de un proceso giratorio presentaran ángulos de contacto y ángulos de deslizamiento más bajos⁷². Al igual por el método de dispersión de TiO_2 , de un arreglo de espinas 3D de un proyecto distinto, como se muestra en la **Figura 28**, se busca mejorar las características hidrofóbicas del modelo.

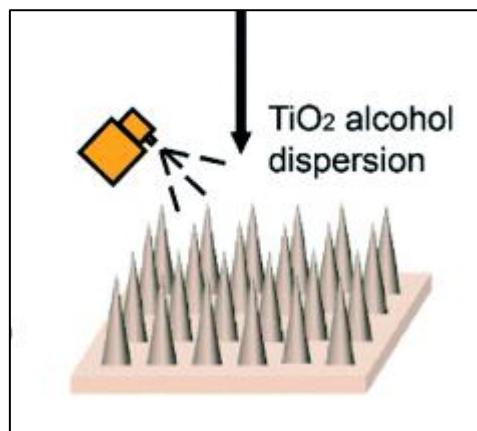


Figura 28. Spray coating de TiO_2 sobre impresos 3D⁵⁶

W. Chen y colaboradores (2021) a partir de la impresión 3D SLA(LT600, Lizhu, China) de un conjunto de conos con diferentes densidades y distancia entre ellos, sobre sustratos de 2cm x 2cm. A parir de la mezcla de adhesivo hidrófobo (adhesivo de silicona) y adhesivo hidrófilo (adhesivo acrílico comercial) variando la proporción de masa entre ellos, recubrieron los arreglos por dispersión de alcohol de TiO_2 como se muestra en la **Figura 28** dispersando 1g de TiO_2 en 75 ml de alcohol anhidro sobre los sustratos, curando cada una de las muestras a partir de irradiación con luz ultravioleta (UV) durante 3 horas. Teniendo como resultado superficies con característica bifilicas las cuales aumentan la capacidad de captación y el transporte de las gotas de agua

{Formatting Citation}. Andrew Siao Ming Ang and Christopher C. Berndt (2014) , realizaron una revisión de los métodos de prueba para recubrimientos por “spray coating” donde a través de mediciones de propiedades mecánicas y de propiedades intrínsecas como tamaño de partícula demostraron que los recubrimientos por pulverización o “spray coating” exhiben un comportamiento anisotrópico y las propiedades microestructurales como la porosidad partir de una estructura salpicada por los recubrimientos influyen positivamente en los métodos de caracterización mecánica ⁷⁰.

Capítulo 2

Fundamento teórico

2.1 Motivación

La motivación surge de la crisis sanitaria causada por la escasez de agua potable en distintas partes del mundo. Debido a la dificultad de crear infraestructura para llegar allí o a la ausencia de fuentes hídricas naturales presentes en dichos lugares, siendo en su mayoría regiones áridas o montañosas. Todo lo mencionado anteriormente motiva a científicos a desarrollar soluciones las cuales aprovechen las condiciones climáticas presentes en estas regiones que se caracterizan por la escasez de precipitaciones y fuentes hídricas; pero con presencia de condiciones ambientales como lo es la neblina. Es por ello que este proyecto de tesis de maestría coadyubará en el diseño y fabricación de sistemas de captación de agua mediante la creación de sistemas pasivos bio-inspirados en las espinas de los cactus para captar el agua presente en la neblina. A partir del desarrollo de estructuras impresas 3D por estereolitografía las cuales combinan el desarrollo de geometrías diseñadas previamente con características aerodinámicas mejoradas y el uso de materiales que posean características fisicoquímicas, se generaron estructuras bio miméticas que imitan las características propias de dichos organismos naturales. Estudiar la capacidad de captar agua presente en la niebla, a través de estos sistemas bio inspirados puede ser una solución innovadora y eficiente al problema mundial de la escasez de este líquido vital.

2.2 Justificación.

Este proyecto busca dar una posible solución para suplir la necesidad más básica de los seres vivos como es el acceso al agua, a través de sistemas ambientalmente amigables. Aunque se han implementado sistemas 2 dimensionales a gran escala los

cuales aprovechan el agua presente en el ambiente, estos no han mostrado la eficiencia esperada, ya que su implementación tiene un costo elevado y la factibilidad de instalación es baja. Además, se debe hacer notar que estos sistemas de captación de agua serán instalados en puntos geográficos donde la población que la habita es de escasos recursos. Por tanto, se busca un sistema que desde su instalación y mantenimiento sea amigable a cada uno de los aspectos que pueda conllevar su uso. Muchos sistemas buscan este recurso hídrico de diferentes fuentes terrestres, pero no toman en cuenta las características del ambiente, el cual ha ido cambiando en consecuencia a los daños ocasionados por las distintas innovaciones y tecnologías con las que va avanzando la humanidad. Así es como la captación de agua presente en la neblina es una fuente potencialmente aprovechable y factible para obtener este recurso a partir del desarrollo e implementación de sistemas de captación. Cabe destacar que en varios lugares del mundo se usan estructuras tipo malla para captar el agua de la neblina o bien, usando estructuras en 3D bio inspiradas. Sin embargo, los resultados muestran baja eficiencia de captación de 2 a 10 ml/m² por día. El diseño, la optimización de geometrías, manufactura y materiales son las áreas por estudiar y mejorar en el desarrollo de nuevos sistemas para incrementar los niveles de captación. He allí donde a partir del diseño y manufactura de un sistema pasivo de captación propuesto en este trabajo de tesis. Se han estudiado y optimizado las propiedades superficiales como la rugosidad, la combinación de superficies hidrófobas e hidrofílicas (basado en estructuras animales y vegetales estudiadas) en diferentes diseños de partes de las espinas, aumentando su eficiencia de captación y mejorando el flujo de gotas de agua recolectadas. Otro aspecto que se estudió es la aerodinámica de las geometrías de las espinas diseñadas: A partir del uso de secciones transversales en forma de perfil alar se ha mejorado la captación aprovechando la aerodinámica la cual no se ha estudiado previamente.

2.3 Hipótesis

A partir del estudio de parámetros geométricos y el nivel de recubrimiento, de arreglos de espinas bio inspirados en espinas de cactus, obtenidos a partir de la impresión en

3D, con un diseño CAD previo, el cual varia sus arreglos en espesor de pared, inclinación de sus puntas, sección transversal y perfil de sus alavés ,obtener un sistema pasivo de captación de agua con alta eficiencia de captación y almacenamiento de agua presente en la neblina del ambiente.

2.4 Objetivos

2.4.1 Objetivo General.

Estudiar en nivel de captación de agua presente en la neblina a partir de sistemas pasivos impresos en 3D bio inspirados en las espinas de cactus

2.4.2 Objetivos específicos.

1. Estudiar y optimizar los parámetros geométricos de los arreglos matriciales de espinas bio inspiradas.
2. Imprimir y recubrir las espinas diseñadas para obtener características superficiales optimas para la captura de agua presente en la neblina
3. Estudiar los niveles de captación de agua presente en la niebla de los sistemas pasivos.

Capítulo 3

Procedimiento experimental

Este capítulo describe los materiales, equipos y la metodología para la obtención y caracterización de sistemas pasivos impresos en 3D capaces de captar de agua presente en la neblina. Cada uno de los sistemas impresos fueron recubiertos con un agente no fluorado para obtener un balance hidrofílico-hidrofóbico en las superficies de cada modelo impreso. La capacidad de captación de agua en cada uno de los sistemas será estudiada a partir de la metodología descrita en este capítulo en el cual describen las técnicas de caracterización superficial (ángulo de contacto, rugosidad, morfología, composición química) de los modelos usados para la captación de agua a partir de neblina.

3.1 Materiales

Resina fotopolimerizable Clear V4(12 mililitros por arreglo matricial) de la marca Formlabs (Somerville,MA,USA),cuya composición es una mezcla patentada de fotoiniciador, monómeros de metacrilato, oligómeros de poliuretano y prepolímeros.. Alcohol isopropílico (IPA, $\geq 99.6\%$),marca J.T. Baker. Trietoxi(octil)silano adquirido en Merk Aldrich(Pureza 97%).Agua desionizada (H_2O D.I., $18.2\text{ M}\Omega\text{.cm}$)

3.2 Instrumentación

Para el diseño asistido por computadora (CAD) de modelos con geometrías tan específicas y con alta demanda computacional. Se uso una computadora con procesador Intel(R) Core(TM) i5 ,(Asus)8 GB de RAM y una tarjeta gráfica NVIDIA GEFORCE 920m. Los modelos fueron impresos en 3D usando una impresora esterolitográfica de la marca FormLab, (Form 3), equipada de un láser ultravioleta de 405 nm de longitud de onda, potencia 250 mW y un tamaño de spot de 805 μm .

Los recubrimientos por “Spray Coating”, se llevaron a cabo usando un aerógrafo profesional Trupper con presión regulable (30-45psi) y boquilla de salida de 0.3mm.

La capacidad de captación de agua se efectuó dentro de una campana de extracción, regulando el flujo de aire (ventana cerrada $\frac{3}{4}$). Se utilizaron dos cámaras de emulación las cuales fueron construidas de acrílico transparente, equipadas con entradas de neblina a través de tubos flexibles conectados a un humidificador de terrario, el cual tiene una emisión de neblina máxima de 380 ml/h.

La caracterización superficial de los sistemas pasivos de captación se efectuó mediante ángulo de contacto, usando un Goniómetro de la marca Dataphysic modelo OKA15plus. El valor de ángulo de contacto se obtuvo ajustando la imagen a la ecuación de Young-Laplace. Para cada una de las mediciones se usó un capilar de 0.52 mm por el cual se depositaron gotas de 3 ml.

La morfología y la topología se estudió usando un microscopio de fuerza atómica (AFM, por sus siglas en inglés) de la marca ASYLUM RESEARCH (Oxford Instruments Company), modelo MFP3D-SA. Se uso la técnica de análisis o barrido en Modo Taping o también conocido como Modo AC. Para cada una de las caracterizaciones se usa un cantiléver OPUS umasch modelo 240AC, con una frecuencia nominal de 70 kHz, con una constante de resorte de 2 N/m. El cantiléver posee un radio de punta < 7nm y un espesor de 2.6 ± 0.5 μm , con una longitud de 240 ± 10 μm y un ancho de 40 ± 2 μm . Para cada una de las mediciones se realizó un barrido en AC sobre un área de $80 \mu\text{m}^2$.

Con el fin de obtener información de la morfología y la composición química de los impresos, los impresos tridimensionales se analizaron por microscopía electrónica de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) empleando un microscopio electrónico de barrido JOEL modelo JSM-6010PLUS/LA a 15KV, El mapeo químico se efectuó mediante análisis de espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS, por sus siglas en inglés) usando un detector tipo BEC con una longitud de referencia de 0.2 mm.

3.3 Diseño asistido por computadora (CAD) de geometrías tipo espina.

Para el diseño de la geometría tipo espina se usó el software AutoCAD 2020, la geometría tiene parámetros de diseño base en los diámetros internos y externos de la espina, diseñando espinas completamente sólidas y espinas huecas. De estos parámetros base, se varió el ángulo de inclinación de las puntas con ángulos de 45 y 30 grados. Las secciones transversales de las espinas huecas fueron diseñadas rectangulares y a partir de geometrías basadas en perfiles alares aerodinámicamente eficientes, a partir principalmente el ángulo de ataque se busca aprovechar las velocidades del viento y aumentar la eficiencia de captación. Diseñadas por individual las espinas con diferentes parámetros, se diseñó un arreglo matricial de espinas de 3x3 con una base cuadrada en común, dicha base será a donde se dirijan las gotas captadas y posteriormente recolectadas en un depósito ubicado debajo del arreglo, esta base tendrá un sistema de conductos coplanares diseñados con estudio previo el cual sea propicio para la recolección y posterior almacenamiento de las gotas recolectadas del ambiente.

El arreglo matricial, será ubicado en un soporte diseñado previamente con medidas pertinentes para poder acoplar los arreglos coplanares a la superficie superior del soporte, el cual primordialmente nos dará una altura pertinente para posteriores procedimientos que se le realicen a los arreglos de espinas(recubrimiento y caracterización) y valores de captación los cuales no tengan influencia de factores como lo es la nucleación de gotas en la superficie comprendida entre la parte inferior del arreglo matricial y la superficie del depósito. Este sistema pasivo de espinas con todos los componentes nombrados anteriormente deberá tener unas dimensiones óptimas para ser implementado en una cámara la cual emulará ambientes con presencia de neblina.

A continuación, se muestran los parámetros de diseño usados en cada uno de los arreglos los cuales fueron tomados de la literatura⁷, para su comparación en términos de capacidad de captación con los diseños impresos en este trabajo de tesis.

Tabla 1. Parámetros de diseño básicos⁷

Parámetro de Diseño	Dimensiones (mm)
Altura Espina	30
Superficie total arreglo	40 x 40
Superficie de captación	30 x 30
Distancia entre centros de conductos	10
Distancia entre centros de espina	10
Grosor base/profundidad del conducto	3.5
Diámetro superior conducto	8
Diámetro inferior Conducto	3.5

Los parámetros básicos de diseño se ejemplifican en la **Figura 1**.

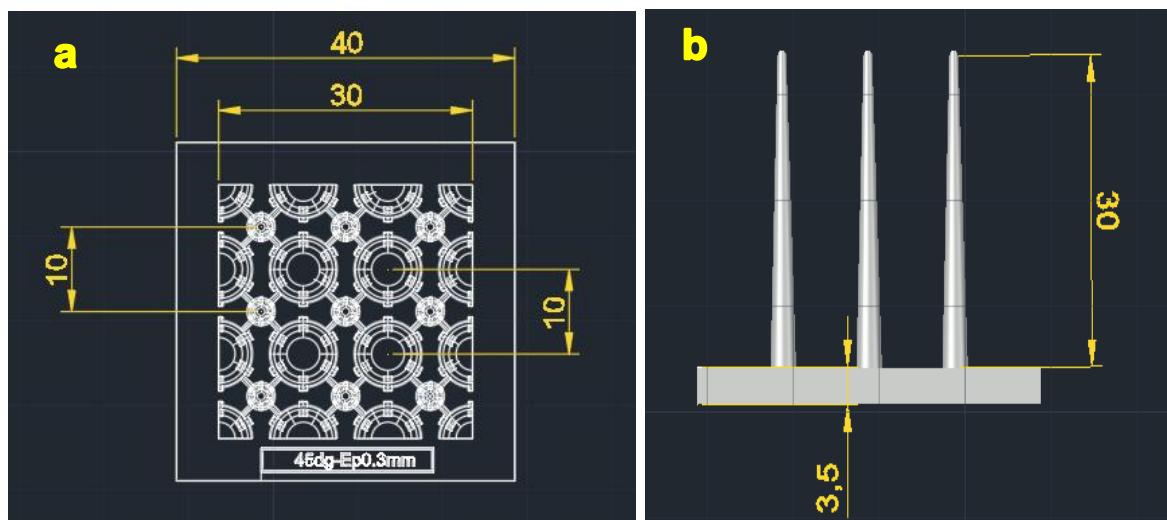


Figura 29. Parámetros estándar de diseño para cada arreglo (a) vista de planta. (b) vista lateral.

Tomando como referencia la geometría cónica plasmada en la **Figura 29** a partir de una vista estructural tanto de planta (**Figura 29.a**) y su correspondiente vista lateral (**Figura 29.b**) se acotan los parámetros de diseño plasmados en la **Tabla 1** los cuales serán la base para cada uno de los diseños expuestos posteriormente.

El diseño de la base de los arreglos se baso en el artículo desarrollado por Liu y col., 2021⁷, en los cuales se estudió y analizó la geometria mas adecuada para la recolecion y buen flujo de las gotas de agua hacia un recipiente de recolección. Por lo que se selecciono el siguiente diseño y se ubica en el arreglo como se muestra a continuacion.

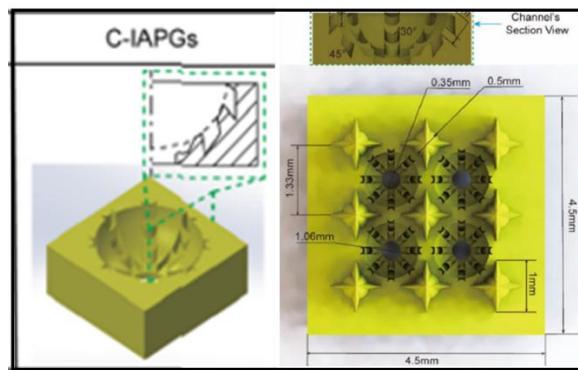


Figura 30. Base del arreglo con mayor eficiencia flujo de agua ⁷

Basado en la geometria mostrada en la **Figura 30** ,de el diseño que muestra mayor eficiencia de flujo de agua se replica realizando unas optimizaciones. La **Figura 30** muestra solo conductos de recoleccion en la parte interna comprendida entre cuatro espinas. Pero debemos tener en cuenta que por cada una de las superficies de la espina se tendra escurrimiento de gotas , debido a ello se incorporan medios conductos en las areas comprendidas entre las dos espinas de cada uno de los laterales del arreglo de espinas y cuatros de conductos en las esquinas del arreglo de espinas. Ademas de ello se generan 4 canales laterales con una inclinacion de 15° los cuales facilitaran el transporte de la gota de la base de la espina al conducto a los conductos principales diseñados mostrados en la **Figura 31**.

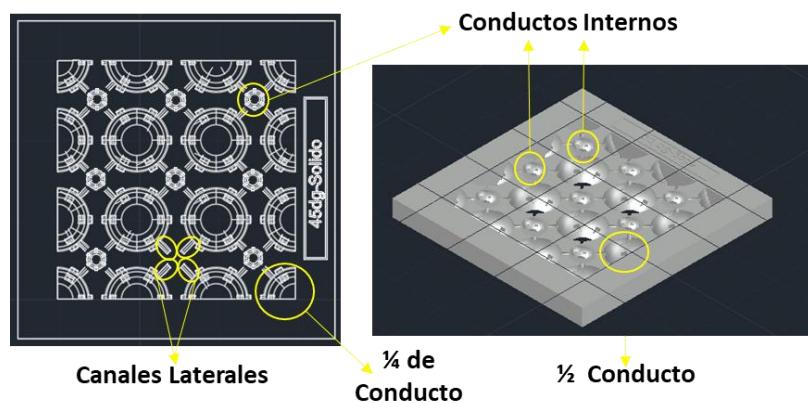


Figura 31.Optimizaciones hidrodinámicas a la base del arreglo

En la **Figura 31** se diseña una base donde se incorporan conductos internos con la misma geometría de los conductos principales pero con una grado de escalamiento, y un diámetro externo correspondiente al diámetro de los conductos internos de los diseño de espinas huecas, por consecuente se ubicaran en la parte inferior interna de cada espina y recolectaran las gotas que fluyen internamente en las espinas huecas

3.3.1 CAD de espinas con pendiente constante y cortes transversales en su punta

Se plantean inicialmente diseños sólidos , la palabra sólido es referente a diseños sin conductos internos ,con una geometría conica y una pendiente constante donde en sus puntas tienen un corte transversal. Para este diseño se tuvo en cuenta las dimensiones mostradas en los parámetros de diseño, con diseños bio inspirados en sus puntas se hace un corte transversal a 45° como se muestra en la **Figura 3.a** y un corte transversal a 30° como se muestra en la **Figura 31.b** en sentido de las manecillas del reloj para generar una inclinación en las puntas.

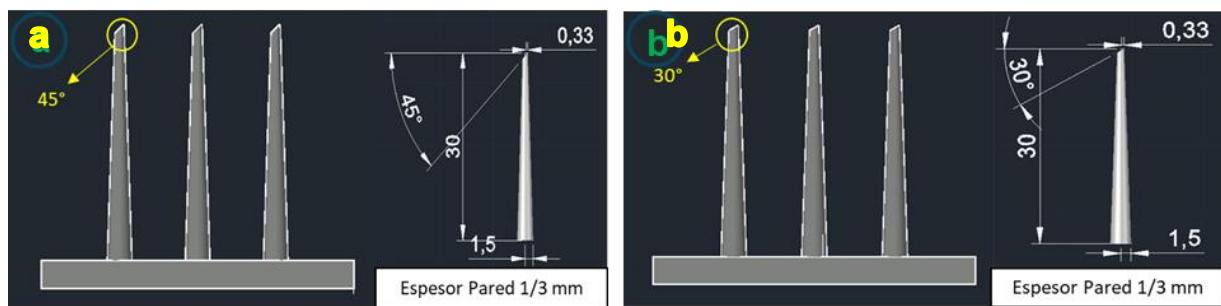


Figura 32. Espinas con pendiente constante y corte en sus puntas (a) Arreglo y vista lateral acotada de espinas a 30° b)Arreglo y vista lateral acotada de espinas a 45°

Los diseños mostrados en la **Figura 32(a y b)** se basan en el primordialmente en los diseños sólidos, con la diferencia de que en estos diseños se incorpora un conducto

interno. Geométricamente se forman a partir de una sección transversal con geometría cuadrada constante de base a punta, con un eje central en su base ubicado a 1,5 mm de la sección transversal en la base y a 0,5 mm de distancia en su punta se aplica el comando revolución para así tener este modelo, aumentando la superficie de captación y por consecuente la eficiencia de la misma. En estos diseños y obedeciendo a las especificaciones geométricas de sección transversal, no se modificará diámetro externo, altura, ni su inclinación en las puntas. Con base en una serie de diseños de diferentes grosores de pared, optimizando procedimientos de lavado y posterior curado de modelos huecos, se observa como al diseñar una pared delgada de sección transversal cuadrada ,se obtienen modelos frágiles, y si por el contrario se diseña una pared gruesa, generara un diseño con un diámetro de conducto interno en la espina variable, por lo que se procede a fusionar las características rescatables de estos arreglos y se obtiene un nuevo diseño optimizado. El cual cuenta con un espesor de pared de 1/3mm y un diámetro interno en su base de 2,67mm diámetro. Todo ello sin comprometer el ángulo de las puntas de las espinas de 30° y 45°. Para el diseño del arreglo matricial se inicia con el diseño de cada espina por separado (**Figura 32**), donde a partir de una serie de comandos de diseño mecánico se llega a obtener una matriz rectangular 3x3 sobre la base de los arreglos, encajando perfectamente los diámetros externos de las espinas en el centro geométrico de los conductos externos de la base y los diámetros de los conductos de las espinas de arreglo de espinas huecas en los conductos internos de la base correspondientes a estos diseños .

3.3.2 Diseños Basados en Perfiles Alares

El diseño de espinas incorporando geometrías basadas en perfiles alares se fundamenta en los principios aerodinámicos referentes a las diferencias de presiones generadas en el fenómeno de sustentación, por cuales la industria aeronáutica selecciona distintos perfiles que cuenta con factores geométricos causantes de la eficiencia aerodinámica. Para la elección del perfil alar y su incorporación en el diseño de las espinas, se tomaron en cuenta principalmente la eficiencia aerodinámica y la

geometría del perfil, se estudia y analiza la geometría de los perfiles con mayor eficiencia. Debido a que el objetivo en uno de los diseños es un sólido por revolución con un conducto interno, se debe elegir una geometría con una distancia entre la curvatura de la cuerda y el intradós adecuadas para que al momento de aplicar el comando de revolución del perfil no se intersequen con el mismo modelo y por consecuente no generen un conducto interno continuo.



Figura 33. Perfil alar USA 49/Ficha técnica⁶³

A partir de una búsqueda ⁶³ en la base de datos de los perfiles alares, se escoge un perfil Biconvexo asimétrico, seleccionando el perfil alar de la familia USA con referencia 49(**Figura 33**). Por lo que para fines prácticos se llamará perfil alar USA 49 el cual tiene una eficiencia del 33.5%. Además de la espina diseñada por revolución, se diseña una espina con cuatro alabes con la geometría del perfil alar en cada uno de ellos.

3.3.3 Diseño Espina por Revolución

Para el diseño de la espina por revolución se toma en cuenta la geometría referente al perfil alar USA 49 y trazando una línea vertical la cual se encuentra a 1 mm del borde de salida que nos servirá como eje de revolución se obtendrá un sólido por revolución la cual será nuestra espina. Como se muestra en la **Figura 34.a** se tiene una distancia de 1 mm, para que al momento de realizar la revolución sobre este eje se genere un

conducto interno el cual en su parte más angosta tendrá un diámetro de 0.5 mm apropiado para dejar fluir por él una gota de agua.

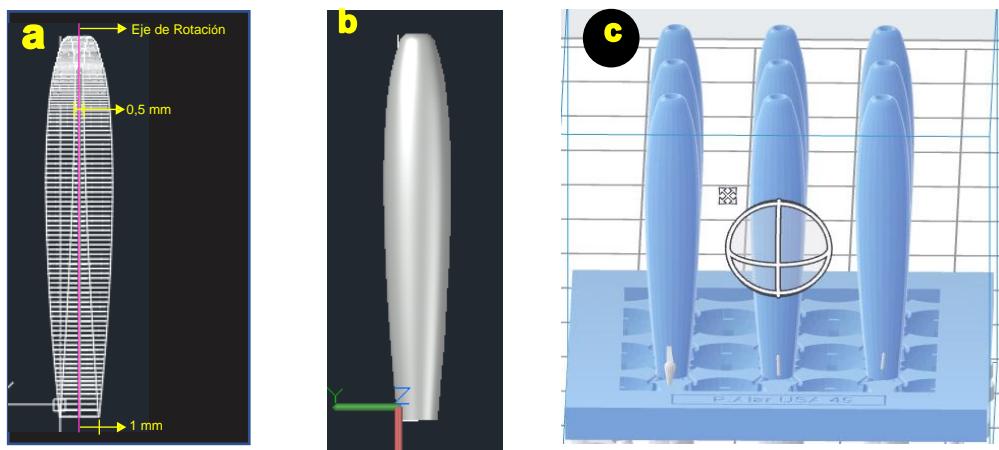


Figura 34. Espina por revolución con perfil alar USA49 (a) Sección transversal- vista estructural lateral. (b) Vista lateral sólida. (c) Arreglo Matricial

La **Figura 34a** muestra una vista estructural de la espina por revolución acotando la geometría del conducto interno, la **Figura 34b** plasma la vista sólida de la espina individual de perfil alar USA 49, la **Figura 34c** a partir la espina sólida formada por la revolución del perfil alar se tiene el arreglo matricial con sus bases y conductos previamente diseñados. A partir de etapas previas de impresión de los arreglos matriciales se decide realizar una optimización al arreglo de espinas por revolución para aumentar la superficie de contacto de la base de la espina con la base del arreglo, se procede a desplazar cada una de las espinas verticalmente hacia el interior de la base del arreglo 1 mm teniendo así una mayor superficie de contacto y comprometiendo mínimamente la geometría en forma de perfil alar que tiene la sección transversal. Con esta optimización se tienen diseños acordes a la geometría lo suficientemente sólidos

3.3.4 Diseño espinas con alavés USA 49

Se decide realizar un diseño con cuatro alavés de base a punta , dicha selección del número de alavés se basa en los modelos 3D impresos para la recolección de agua a partir de niebla, donde al estudiar y analizar el modelo del artículo “Rapid 3D Printing of Bioinspired Hybrid Structures for High-Efficiency Fog Collection and Water Transportation”⁷, el cual relaciona el número de alavés con la capacidad de recolección mostrando mayor eficiencia 4 alavés. Se realiza una optimización de este alabe con sección triangular reemplazándolo por una sección con geometría de perfil alar USA 49 como se muestra en la **Figura 35a**, esta sección se mantendrá a lo largo de los 30 mm de altura que tiene la espina, diseño que busca obtener una mayor eficiencia de recolección de agua (**Figura 35b**)

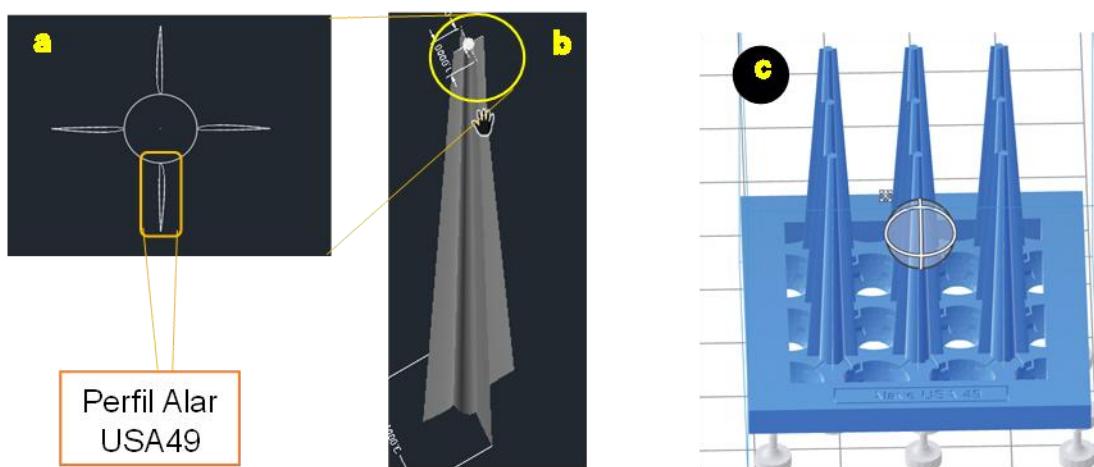


Figura 35. Espinas con 4 alavés de sección de superior basada en el perfil alar USA 49 a) Sección transversal- vista estructural de planta. b) Vista isométrica sólida. c) Arreglo Matricial.

En la **Figura 35a** se observan los cuatro álabes, con una vista de planta se identifican en cada uno de ellos con su correspondiente geometría del perfil alar, la **Figura 35b** muestra una panorámica de la espina con sus cuatro alavés que a lo largo de su cuerpo se mantiene el alabe de geometría alar y en la **Figura 35c** se observa el arreglo matricial de nueve espinas con la geometría mencionada. Cabe resaltar que al ser esta

una espina sin conducto interno se usa una base correspondiente para estos arreglos sólidos (sin conductos internos en su base).

3.3.4 Diseño de Soporte de los arreglos matriciales de espinas

Debido a que se debe mantener cierta altura entre el arreglo de espinas y el depósito de recolección para no tener resultados erróneos de recolección se procede a diseñar soporte impreso en 3D el cual lo garantice dicha altura, por lo que se diseña el modelo plasmado en la **Figura 36a** el cual permite sostener el arreglo a una altura de 10 mm y mantiene libre los conductos de la superficie para que fluya el agua y posteriormente se almacene en el depósito.

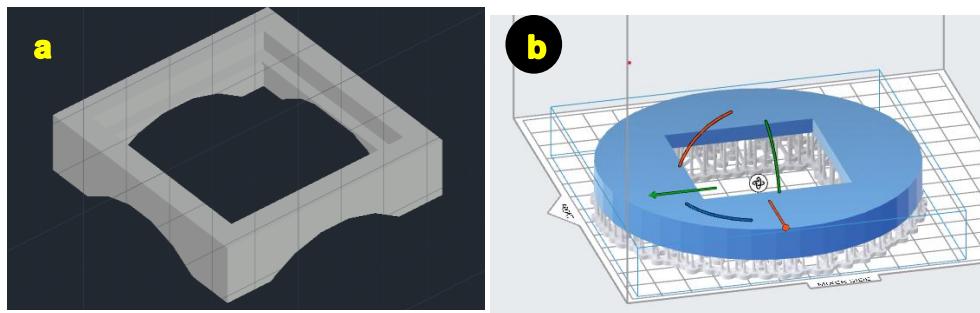


Figura 36.Diseños CAD(a) Diseño del soporte del arreglo de espinas. (b) Diseño de la tapa del deposito

Dicho soporte es diseñado para encajar perfectamente en una tapa diseñada (**Figura 36b**) especialmente para cubrir la superficie libre entre el arreglo de espinas y el depósito garantizando que el agua que se deposite finalmente sea únicamente la captada por las espinas.

3.4 Impresión en 3D por estereolitografía (SLA) del sistema de captación

A través del software **PreForm3.27.1(PreForm®)**, se importaron los archivos CAD de los diseños a un formato STL dicha exportación se realiza en el software de diseño CAD. Los modelos se ubicaron en la base de ($14,5\text{ cm}^2$),esta impresora cuenta con una altura de impresión de 19 cm.

Una vez importados los modelos a formato STL, el software PreForm nos da la facilidad de manipular los modelos 3D, en todos los diseños se usa el mínimo espesor de capa para darle una mayor exactitud a los detalles la cual fue de 25 micras. En PreForm debemos configurar y estudiar ciertas variables como lo son posición de los elementos de impresión, espesor de capa, características de los soportes mostrados en la **Figura 37** (tipo de poste, altura de poste densidad del poste y tamaño de poste).

De cada una de las variables dependerá una impresión completamente correspondiente al diseño CAD, en dichas variables el software sugiere por default unos parámetros, se deben insertar manualmente a partir del estudio de impresiones realizadas previamente y con las optimizaciones pertinentes basadas en ellas. En el software se debe ubicar de manera muy detallada y correcta los puntos base para la impresión ya que debido a las dimensiones puede darse obstrucciones principalmente en aquellas espinas huecas. En la impresión de los sistemas pasivos de captación se ubicaran verticalmente cada uno de ellos sobre la plataforma de impresión como se muestran en la **Figura 37**, debido a que si ubicamos los arreglos con algún otro ángulo de impresión se comprometerá el diseño previamente realizado debido a la ubicación de postes de impresión sobre las distintas superficies de los arreglos de espinas, en esta etapa es pertinente recordar que al ubicar verticalmente los modelos nos generara una rugosidad intrínseca de impresión la cual se caracterizara posteriormente.

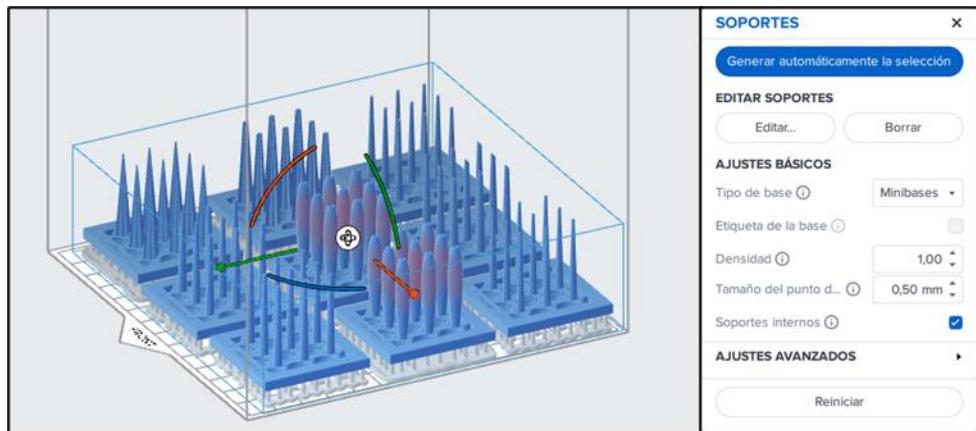


Figura 37. Ubicación de modelos en plataforma de impresión/Características de los postes de impresión.

Se ubican nueve arreglos en 3 filas con 3 modelos cada una (**Figura 37**), dicha ubicación optima ya que nos permite tener distancias propicias entre arreglo y arreglo, sin comprometer sus geometrías, un parámetro muy importante son los postes de impresión dichos postes son utilizados para dar una altura de impresión de la primera capa del arreglo 4 mm la cual nos permitirá que nuestros modelos sean impresos respetando los diseños propuestos principalmente en sus primeras capas ya que si se realiza una impresión donde la primera capa se construya sobre la plataforma de impresión y debido al tiempo de impresión de aproximadamente 15 horas

Debido a una posterior caracterización de la superficie externa de cada una de las geometrías acomodadas en arreglos de 3 x 3 espinas, para caracterizaciones como AFM y SEM no iba a ser posible caracterizar dicho arreglo por el volumen que este posee, por lo que se procede a llevar a cabo el proceso de impresión de cada una de las geometrías diseñadas en elementos individuales como ejemplifica la **Figura 38**.

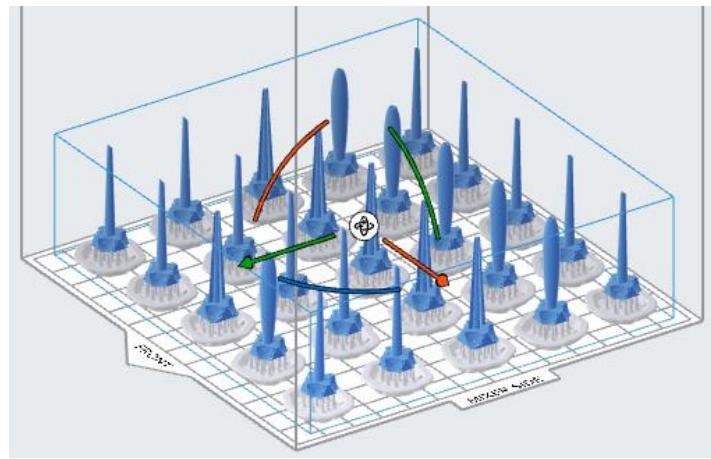


Figura 38 . Impresión por individual de las geometrías diseñadas

3.5 Recubrimiento por “spray coating” con trietoxi (octil)silano.

Posterior a un tratamiento térmico de las piezas de 60 °C durante 2 horas, los arreglos de las diferentes geometrías previamente obtenidas por impresión en 3D, se recubrieron homogéneamente por “spray coating” usando trietoxi(octil)silano, como lo muestra la **Figura 39**.

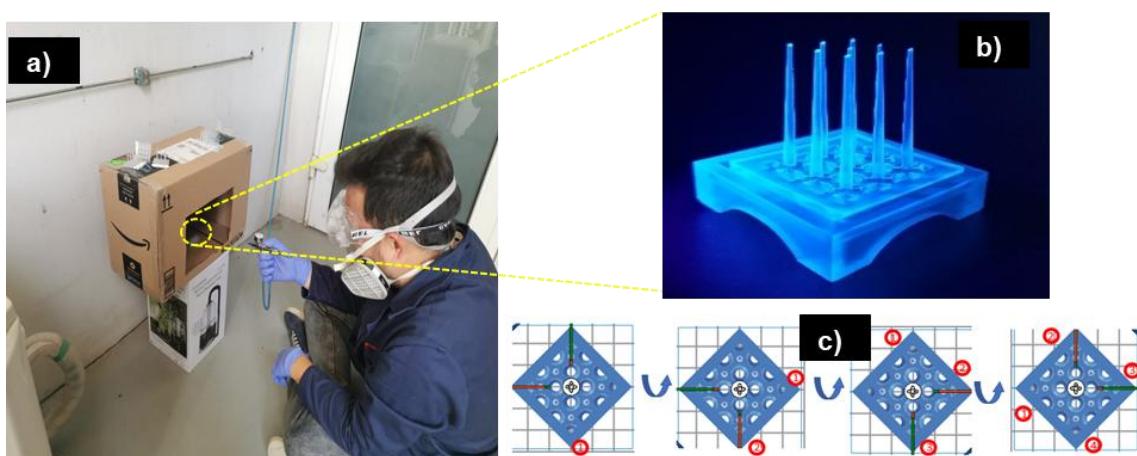


Figura 39. Recubrimiento de modelos impresos (a) Proceso real “spray coating”, (b) Ubicación inicial de los sistemas pasivos de captación en la cámara (c) Rotación de los modelos

La **Figura 39** muestra el procedimiento llevado a cabo para el recubrimiento, en el cual se adaptó una cámara de espreado. La cámara se fabricó en una caja de cartón con el fin de minimizar flujos externos al momento de aplicar el recubrimiento (**Figura 39a**).

Se llevo a cabo siguiente procedimiento, donde cada capa de recubrimiento consta de los siguientes pasos:

1. Se calibra la línea de aire a una presión registrada de 25 psi en la salida del aerógrafo.
2. Se ubicaran las piezas en la cámara la cual garantiza un flujo de aire externo mínimo y resguarda la formación de una nube de Triethoxi (octil) silano ,cada una de las piezas estarán ubicadas verticalmente y a 45 grados en el eje z (**Figura 39b**), rotando cada estructura 90° en el plano XY cada arreglo y así garantizar una homogeneidad del recubrimiento en cada estructura. La ubicación mostrada de las estructuras busca que las puntas y los conductos internos de las estructuras no sean recubiertas y tenga características hidrófobas diferentes. Este procedimiento se hará horizontalmente de derecha a izquierda y de izquierda a derecha en cada una de las cuatro posiciones obteniendo cada una de las. La boquilla del aerógrafo se encontrará a 8 cm del arreglo, a una altura de 1.5 cm la cual es la mitad de la altura de cada arreglo (**Figura 39c**).
3. Al recubrimiento en cada una de las estructura se le dará un tratamiento térmico de 100 °C durante 1h. Se realizo cada vez que apliquemos una capa de recubrimiento, para asegurarnos de un acoplamiento de la capa a la superficie del impreso. El uso de este tratamiento térmico con los parámetros anteriormente descritos es debido a que a esta temperatura el trietoxi (octil) silano no verá afectada su estructura química y consecuentemente su característica hidrofóbica, ya que esta ligeramente por encima de su punto de ebullición y según **R Kunts,2011⁵⁴** esta temperatura dará como resultado un mejor acoplamiento a la fase polimérica de las estructuras. Con esta temperatura se garantiza que la geometría diseñada no se vea comprometida en la fragilidad de sus detalles más finos en cada una de ellas Al igual que los

arreglos matriciales en las espinas impresas por individual posterior a su impresión, lavado y correcto curado se procede a recubrir cada una de ellas ya sea con 1, 3 o 5 capas para llevarlas a caracterizar.

El recubrimiento de las espinas individualmente se debe iniciar accionando el aerógrafo 4 centímetros a la izquierda de la primera espina ubicada dentro de la cámara, ya que debido a la presión usada si se ubica justo en frente dicha presión inicial, ocasionara que se desplacen los diseños y no se obtenga un recubrimiento homogéneo.

3.6 Captación de agua en sistemas pasivos impresos en 3D usando una cámara de simulación de neblina.

Para caracterizar la eficiencia de captación de agua se adaptó a una cámara cubica de acrílico un humidificador generador de neblina. Teniendo en cuenta las dimensiones de nuestros sistemas pasivos se ubicarán en la parte inferior central de la cámara, la cual se encuentra al interior de una campana de extracción. Con un depósito de almacenamiento ubicado por debajo del sistema se tendrá la medida del agua recolectada por tiempo de recolección, en cada uno de nuestros sistemas pasivos de captación determinando su eficiencia.

Las condiciones ambientales en la cámara buscan emular las condiciones presentes en ubicaciones geográficas desérticas con presencia de neblina a partir de valores de humedad y temperatura reportados en artículos relacionados con proyectos de captación de neblina a partir de sistemas impresos. La capacidad de captación se midió a través de la ganancia de peso en cada arreglo con condiciones de 75 % de humedad relativa y un máximo de temperatura de 25° centígrados. Estos valores son importantes mantenerlos constante, debido a ello fue la decisión de realizar el montaje dentro de una campana de extracción, la cual al tener su ventana semi abierta mantendrá un ambiente externo más controlado (sin variaciones de flujo de aire), con un flujo de extracción constante de la campana, el cual pasara por la cámara de

captación y tendrá una emulación de ambiente más realista, eliminando variables causadas por el flujo de personas a su alrededor.

Se construyó una cámara semi abierta fabricada por su servidor en el CIMAV unidad Monterrey (semi abierta debido a que su base presenta una altura de 3 centímetros por encima de la superficie de la campana de extracción) las cuales se encuentran equipada en su parte superior por una entrada de neblina y un sensor de humedad y temperatura en cada una de las cámaras fabricadas. La generación de humedad va por cuenta de un humidificador el cual tiene un flujo de salida variable el cual en su máxima generación tiene como valor 380 ml/h. A esta cámara se le abren una serie de agujeros los cuales permitirán tener un flujo de aire y así tener una mejor emulación de condiciones reales. La cámara es de forma cubica con dimensiones 18 cm x 15 cm en su superficie con altura de 26 cm. En un principio se pensó en generar estas condiciones ambientales en el interior de la balanza como se ha observado en experimentos reportados en la literatura, pero se desiste definitivamente de ello debido a que al generar humedad dentro de la cámara de la balanza primero se pone en riesgo la integridad funcional de la misma debido a la exposición de humedad a su sistema electrónico y mecánico, y principalmente debido a que al tomar mediciones dentro de la balanza se reportara en el cambio de peso de la espina valores de peso los cuales reporta la humedad presente en la cámara, obteniendo datos erróneos.



Figura 40. Montaje de dos cámaras de emulación de neblina del ambiente

Se realiza un montaje de dos cámaras de emulación ya que dada la cantidad de ensayos que se deben hacer optimizaría los tiempos de trabajo, aunque para ellos los parámetros de apertura de la ventana y la distancia entre cada una de las cámaras debieron variar para obtener así una ubicación ideal de cada una manteniendo valores de temperatura y humedad como se muestra en la **Figura 40**. Cada uno de los estudios se realizó con un flujo constante de salida de neblina de aproximadamente 100 ml/h la cual se deja pasivamente por dos horas sometidas a las condiciones mencionadas anteriormente. Cabe resaltar que en este estudio la medición del peso, en las reservas de agua (cajas Petri ubicados debajo de los sistemas pasivos) y en los arreglos pudieron haber sufrido una ligera disminución debido al traslado del lugar del montaje hacia la balanza, siendo ello un factor el cual se incluyó en la desviación estándar.

Se toman en cada una de las mediciones dos valores de delta de peso los cuales son la diferencia de peso del arreglo y la diferencia de peso de cada uno de los depósitos correspondientes al arreglo, se reportan los dos resultados, pero como en este proyecto el fin es determinar la capacidad de captación de cada uno de los arreglos, tomaremos únicamente como objeto de estudio el valor de cambio de peso en el depósito de los arreglos.

Tabla 2. Tabla usada en cada uno de los ensayos para caracterizar la capacidad de captación de cada uno de los arreglos dependiendo geometría y numero de capas de recubrimiento

Número de ensayo	# capa					
	Peso arreglo			Peso Deposito de agua		
	Peso Inicial	Peso Final	Delta	Peso Inicial	Peso Final	Delta
Del 1	Px_i	Px_f	$Px_f - Px_i$	Px_i	Px_f	$Px_f - Px_i$
al 10	Px_{i+1}	Px_{f+1}	$Px_{f+1} - Px_{i+1}$	Px_{i+1}	Px_{f+1}	$Px_{f+1} - Px_{i+1}$
Peso en Miligramos		Promedio	\bar{X}_{1-10}		Promedio	\bar{X}_{1-10}
Desviacion		σ_{1-10}			Desviacion	σ_{1-10}

En la **Tabla 2** se muestran por celdas los datos reportados en cada una de las mediciones realizadas en cada arreglo impreso y recubierto, antes y después de exponerlos dentro de la cámara a las condiciones de humedad y temperatura mencionadas. Tanto en el peso del arreglo como en el peso del depósito de agua se

tienen su delta correspondiente a la diferencia de peso final e inicial donde después de un mínimo diez mediciones se pueden promediar los valores de cada delta y tener la desviación estándar correspondiente a este grupo de valores.

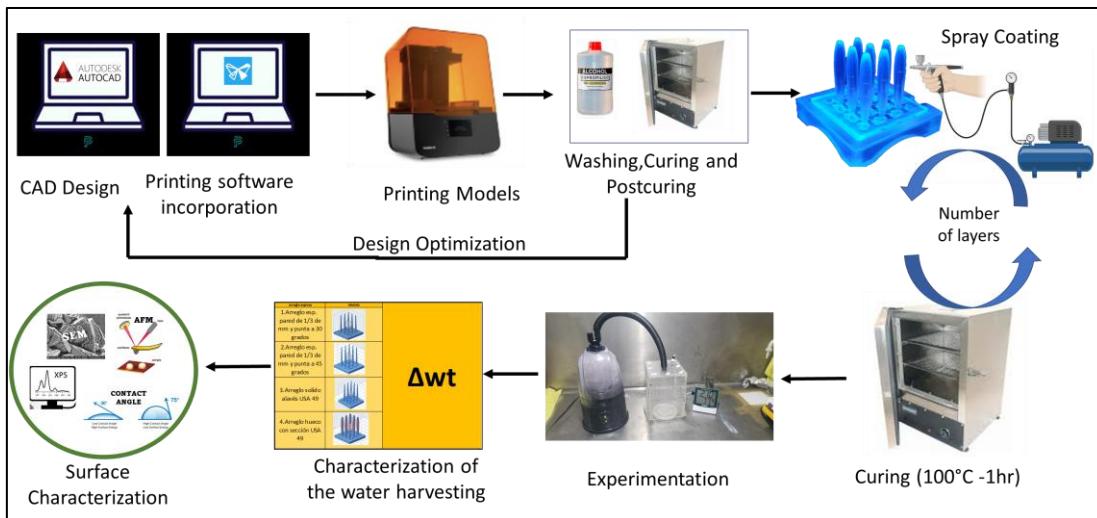


Figura 41. Metodología del desarrollo de sistemas pasivos de captación.

La **Figura 41** es un diagrama esquemático de la metodología usada, cronológicamente de cada uno de los procedimientos llevados a cabo para la obtención de sistemas pasivos de captación de agua presente en la neblina. Partiendo de un diseño inicial de estructuras tridimensionales bio-inspiradas, impresas en 3D a escala real por estereolitografía, a las cuales se les aplicó un recubrimiento homogéneo generando características superficiales propicias para la captación y el transporte de gotas de agua. Características las cuales aumentarán la eficiencia en una posterior captación llevada a cabo dentro de una cámara de emulación de condiciones ambiental y serán caracterizadas fisicoquímicamente.

Capítulo 4

Resultados y discusión

4.1 Diseños asistidos por computadora (CAD)

A partir de la metodología descrita en el Capítulo 3, y siguiendo cada uno de los parámetros de diseño mencionados y sus correspondientes optimizaciones se obtuvieron los diseños tipo espina aptos para impresión en 3D. Con cada uno de los diseños obtenidos inicialmente se distribuyeron en arreglos matriciales de 3 x 3, los cuales fueron colocados sobre bases previamente diseñadas. Las bases y los conductos de desagüe también fueron diseñados y optimizados, como se verá a continuación.

4.1.1 Diseño de la base del arreglo adicionando conductos de desagüe.

Con base en los parámetros descritos en la subsección 3.1 de la parte experimental se realizaron dos diferentes tipos de base para los arreglos con conductos de desagüe como se observa en la **Figura 42**.

En la **Figura 42a** y **42b** se muestra el diseño propuesto de la base de recolección de agua, con los conductos previamente descritos en la sección experimental siguiendo los parámetros de diseños mencionados en el Capítulo 3 e incorporando $\frac{1}{4}$ de conducto en cada una de las esquinas y medios conductos ubicados en los bordes perimetrales entre las esquinas. También se incorporaron los conductos inclinados que van de la base de la espina cada uno de los conductos esféricos

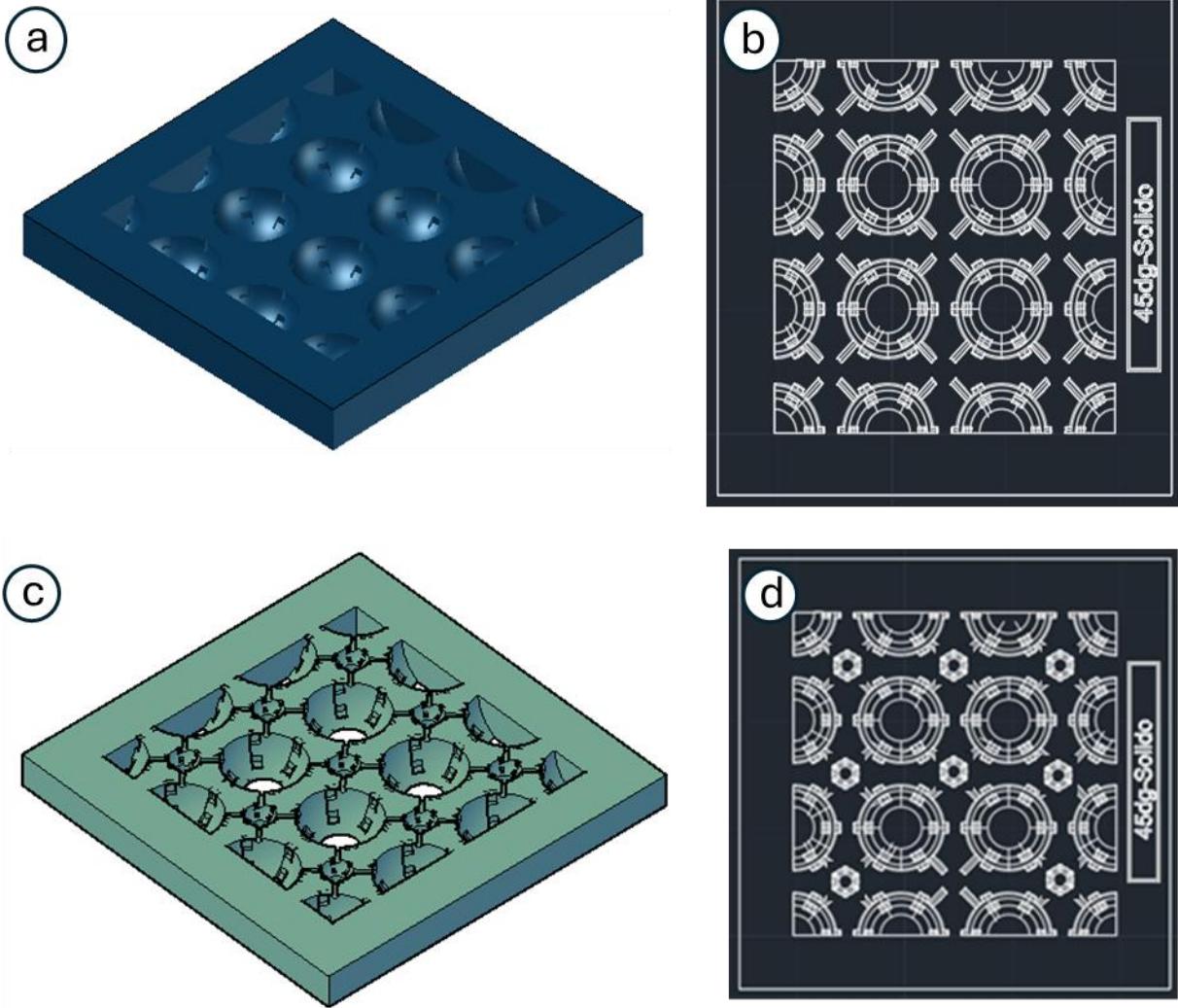


Figura 42.Base para arreglos de espinas a) Base para diseños solidos vista Isométrica b) Base para diseños solidos vista superior. c) Base para diseños con conductos internos vista tipo esbozo d) Base para diseños con conductos internos vista superior

. Con los mismos conductos mencionados y mostrados en la **Figura 42c y 42d**, se obtiene un segundo diseño para la base, correspondiente a aquellas espinas las cuales cuenten con un conducto interno (huecas) como es el caso de las espinas con pendiente constante y corte en sus puntas, así como para las espinas diseñada por revolución con sección transversal de geometría de perfil tipo alar. Dichas bases incluyen conductos de forma esférica, pero con una escala menor la cual permite tener

unas dimensiones donde su diámetro externo tiene la misma magnitud que el diámetro del conducto interno para así favorecer la conducción de las gotas de agua captadas en la superficie interna y externa de las espinas.

4.1.2 Diseño optimizado de espinas para captación de agua de neblina.

A partir de una serie de diseños previos, se obtienen 4 diseños optimizados los cuales se ubicaron matricialmente en las bases mostradas en la **Figuras 43**. Los diseños se clasificaron en cuatro tipos: a) espinas cónicas huecas con punta truncada a 30° , b) espinas cónicas huecas con punta truncada a 45° , (c) espinas cónicas huecas por revolución basadas en un perfil alar, d) espinas cónicas sólidas con cuatro alabes basadas en perfil alar.

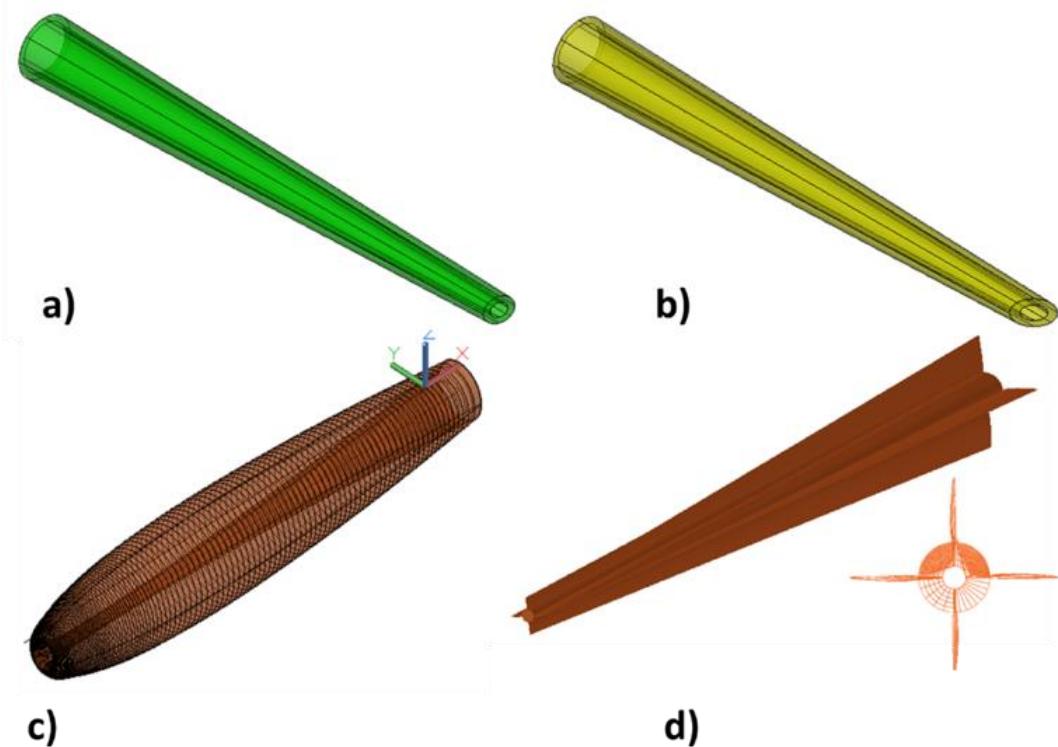


Figura 43. Diseños tipo espina optimizados. a) espina cónica con pendiente constante y punta truncada a 30° . b) espina cónica con pendiente constante y punta truncada a 45° . c) espina cilíndrica por revolución con sección transversal tipo perfil Alar. d) espina cónica con cuatro alabes de sección tipo Perfil Alar Usa49.

En la **Figura 2a y 2b** se observan los dos diseños optimizados de las espinas cónicas huecas con pendiente constante. El conducto en su interior aumenta su diámetro a lo largo de la espina de punta a base, manteniendo constante el área de sección transversal truncada. Como se puede observar las puntas están truncadas a 30° y 45° con el fin de tener una mejor aerodinámica en ellas, y aumentar la condensación de las gotas las cuales posteriormente fluirán por el conducto interno o por la superficie externa

Tomando en cuenta una eficiencia aerodinámica mayor, se propusieron dos diseños de espinas adicionales. A partir de estructuras alares como se muestra en la **Figura 43c y 43d**. En la **Figura 43c** se muestra un diseño el cual a partir del perfil alar forma un sólido por revolución. A partir de una vista tipo Rayos X (nombre técnico de la vista) y en color más claro se puede denotar la geometría del perfil alar e internamente con un color más intenso se observa el conducto interno formado. En la **Figura 43d** se muestra el diseño de espinas con cuatro alabes laterales de base a punta los cuales mantienen una geometría de perfil alar a lo largo de todo su cuerpo. Se puede resaltar a partir de la vista superior, cada uno de los distintos rayados, denotando que es una superficie sólida, con pendiente constante y que entre alabes es completamente lisa

4.2 Impresión en 3D por SLA (estereolitografía) de los modelos optimizados

Una vez realizada las optimizaciones a los modelos CAD y acomodándolos en sus respectivos arreglos matriciales con sus correspondientes bases, se imprimieron en 3D los modelos de sistemas pasivos de captación de agua de neblina apropiados para caracterizar la eficiencia de captación de cada uno de ellos, como se ejemplifica en la **Figura 44**.

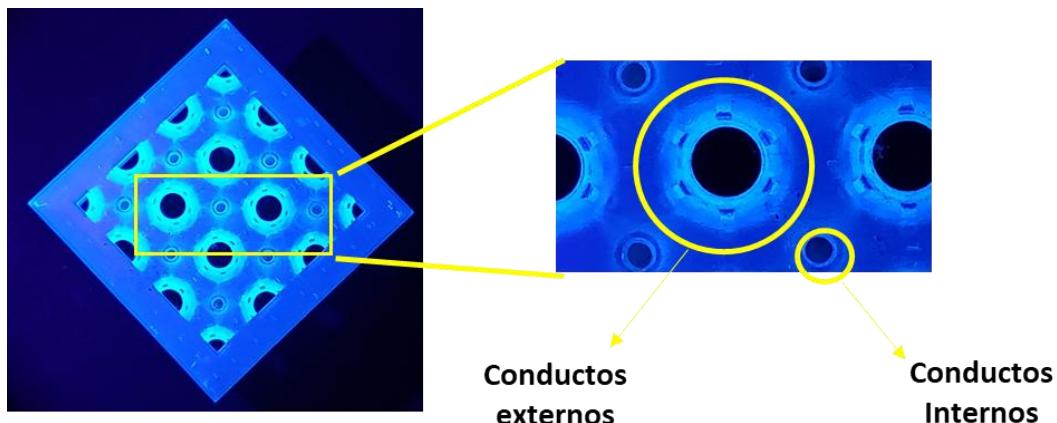


Figura 44. Conductos internos y externos a las espinas de las bases de los arreglos matriciales

Cabe mencionar que debido al alto nivel de complejidad del diseño propuesto y sus dimensiones, primero se imprime la base para verificar su printabilidad y luego se imprime todo el conjunto (base + espina). Una vez impresos los modelos, es necesario verificar que las geometrías conserven su forma (retención de forma y autosoporte), a través de la exposición de los impresos a una lámpara de luz ultravioleta se verifica la impresión de los conductos esféricos, los internos, los externos y la geometría de diseño como se muestra en la **Figura 44**. A continuación, serán mencionados y mostrados en la **Figura 45** dependiendo su ubicación de izquierda a derecha los cuatro sistemas pasivos impresos que se usaron para la captación de agua.

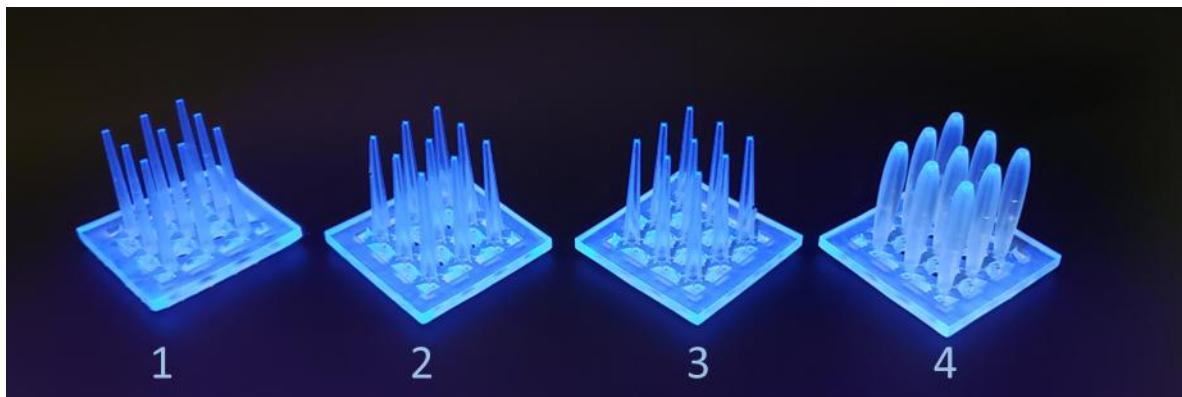


Figura 45. Arreglos matriciales tipo espina impresos en 3D

1. Arreglo de espinas huecas con espesor de pared de 1/3 de mm e inclinación de punta de 30°.
2. Arreglo de espinas huecas con espesor de pared de 1/3 de mm e inclinación de punta de 45°.
3. Arreglo de espinas solidas con 4 alavés de sección basada en el perfil alar USA 49.
4. Arreglo de espinas huecas por revolución con sección transversal de geometría basa en el perfil alar USA 49.

Teniendo en cuenta los parametros de impresión y curado mencionados en la seccion experimental, se obtienen modelos impresos 3D los cuales respetan las dimensiones de las geometrias previamente diseñadas, así como poseen las propiedades mecanicas conferidas por la resina comercial usada.

Ademas, para soportar los modelos, se fabrico un soporte que los fije y sostenga como se ilustra en la **Figura 46**. La **Figura 46a** se muestra el modelo impreso del soporte el cual tiene la función esencial de evitar la condensacion o captacion indirecta del agua, la cual no es debida a la captacion de las espinas. Este modelo fue impreso a diferencia de los modelos de espinas con un grosor de capa de 0.1 mm, debido a que al tener un diseño mas robusto sin tanto nivel de detalle, dicho grosor de capa nos garantiza la impresión de la geometria diseñada y disminuye el tiempo de impresión. En la **Figura 5b** se muestra el acoplamiento de la base con el diseño matricial en dicho soporte evitando con ello la condensacion o captacion indiecta.

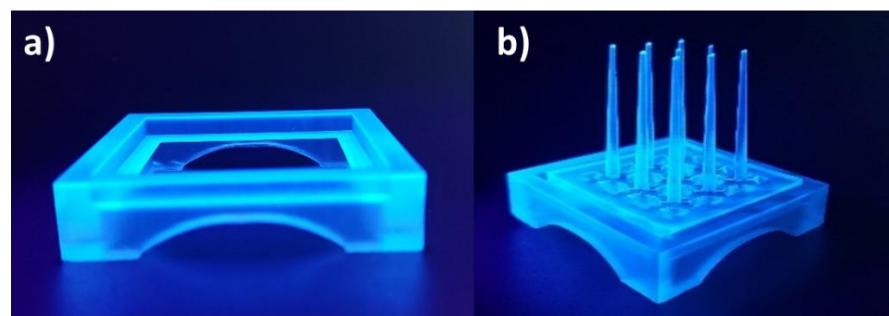


Figura 46. Soporte para arreglo matricial de espinas.

Para la caracterización superficial de cada una de las espinas diseñadas e impresas se imprimieron modelos individuales los cuales son mostrados en la **Figura 47**. Cada uno de estos modelos corresponden a los diseños anteriormente mencionados. En cada uno de ellos, se observa de color gris claro los soportes de impresión, los cuales tienen una altura de 1 cm con base, que servirán para manipular cada una de las espinas en los distintos procesos de caracterización.

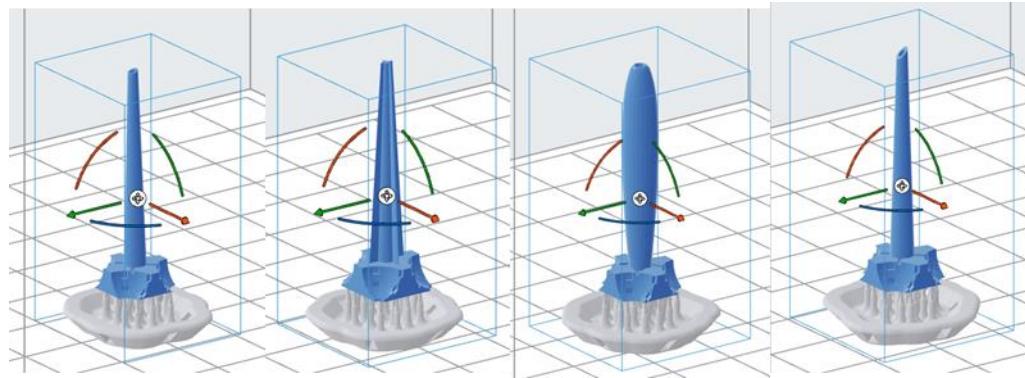


Figura 47. Espinas impresas en 3D para caracterización.

4.3 Caracterización de la mojabilidad en la superficie de los sistemas pasivos de captación de agua de neblina

Se caracterizó la superficie de las espinas por ángulo de contacto estático (θ_s). Se analizó 10 veces el ángulo de contacto en cada uno de los diseños de espinas impresas, las cuales presentaron características hidrofóbicas-hidrofílicas en cada una de las superficies ya sea con 0, 1, 3 y 5 capas de recubrimiento con alcoxilano. Se realizó un análisis de la morfología de las superficies, tomando como variable el número de capas de recubrimiento y la geometría, realizando una caracterización química de la superficie con el objetivo de observar el comportamiento del recubrimiento y su interacción con la matriz polimérica de las espinas impresas en 3D. Toda esta serie de caracterizaciones se llevó a cabo para dar una explicación a porque con 3 capas de recubrimiento la capacidad de captación es notablemente superior a

un recubrimiento con mayor o menor número de capas, y como distintos factores ya sea geometría o morfología de la misma interviene en estos resultados.

4.3.1 Angulo de contacto estático θ_s

Con el fin de determinar θ_s de cada una de las espinas recubiertas y no recubiertas en sus diferentes diseños se lleva a cabo 10 mediciones tanto estáticas como dinámicas a lo largo de su superficie externa en cada una de ellas. La **Tabla 3** resume los resultados obtenidos indicando los promedios y desviación estándar en función de su geometría y numero de capas de recubrimiento, mientras que, la Figura 7 ilustra los resultados obtenidos.

Tabla 3 . Angulo de contacto estático (θ_s) como una función de su geometría y número de capas de recubrimiento

Nombre del arreglo	Numero de Capas trietoxi(octil)silano	Sigla	Angulo de contacto (°)
Perfil alar USA por revolución	0	PU0	101.7 ± 0.022
	1	PU1	104.46 ± 0.008
	3	PU3	96.43 ± 0.015
	5	PU5	85,42 ± 0.013
Alabe USA 49	0	AU0	103,25 ± 0.09
	1	AU1	111,7 ± 0.07
	3	AU3	99,78 ± 0.06
	5	AU5	102,9 ± 0.05
Espina cónica con pendiente constante y punta truncada a 30°	0	P300	105,53 ± 0.022
	1	P301	110,2 ± 0.011
	3	P303	96,63 ± 0.031
	5	P305	84,28 ± 0.021
Espina cónica con pendiente constante y punta truncada a 45°	0	P450	105,9 ± 0.092
	1	P451	107,87 ± 0.028
	3	P453	98,73 ± 0.014
	5	P455	86,43 ± 0.020
Perfil Alar recubierto con trimetoxi(propil)silano	3	PP3	105,3 + 0.0121

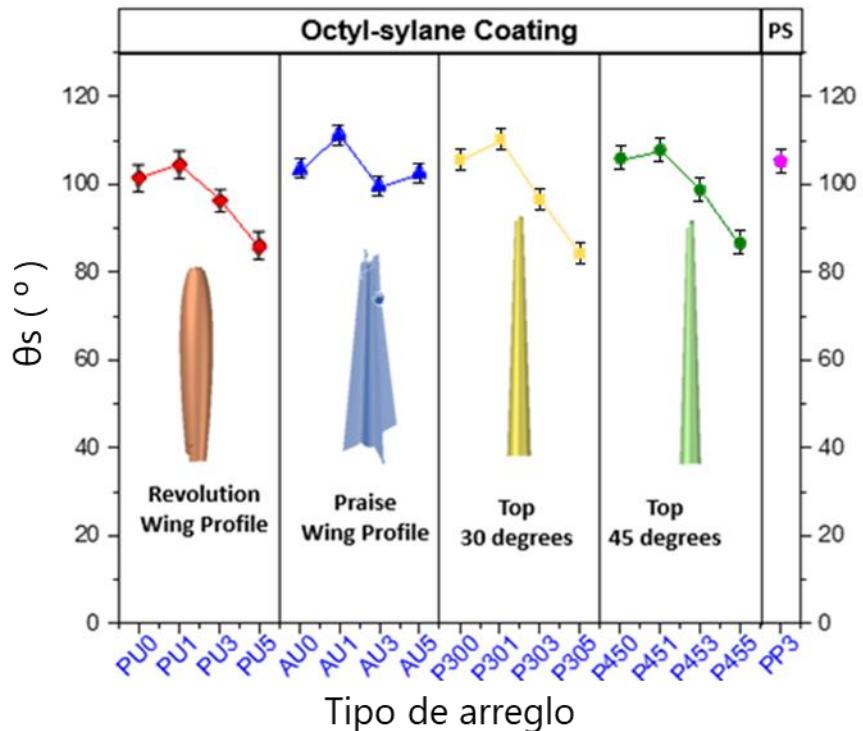


Figura 48. Ángulo de contacto estático como una función de su geometría y número de capas de recubrimiento

La **Figura 48** plasma el comportamiento de los valores de ángulo de contacto (θ_s) de cada geometría dependiendo el número de capas de recubrimiento. Observando como el mayor valor de ángulo de contacto se presenta al depositar una capa de recubrimiento, para posteriormente disminuir notablemente en los arreglos con mayor número de capas de recubrimiento. Interesantemente, los modelos sin álabes recubiertos con 5 capas exhibieron el menor valor de ángulo de contacto, mientras que el modelo que incorpora álabes laterales, presentó un ángulo de contacto similar con 3 o 5 capas. Además de ello, se presenta un ejemplo contrastando el uso de 3 capas de trimetoxi(propil)silano sobre una espina hueca por revolución. Este comparativo demuestra que para obtener un ángulo de contacto superior a 100° se necesitan 3 capas de trimetoxi(propil)silano mientras que con trietoxi(octil)silano solo es necesaria una capa. Cabe destacar que este comparativo se realizó sobre una espina hueca por revolución, ya que este sistema fue el que mejor captación de agua presentó, como más adelante se demostrará.

A continuación, la **Figura 49** muestra el comportamiento de los ángulos de contacto (θ_s) en la superficie de las distintas geometrías diseñadas previamente. En todos los casos se observa como el mayor ángulo de contacto se presenta en las superficies con una capa de recubrimiento. Intrínsecamente, con 3 capas de recubrimiento en cada una de las geometrías, se alcanza un balance hidrofóbico e hidrofílico dado por valores los cuales están ligeramente superior o inferior a 90°. En las geometrías sin alabes el ángulo de contacto disminuye al aumentar de 3 a 5 capas de recubrimiento, pero con los cuatro alabes este ángulo de contacto tiende a aumentar ligeramente. Esto se le atribuye a la geometría y a la técnica usada para recubrir los diseños, ya que al poseer cuatro alabes tendrá una mayor acumulación del compuesto en las superficies comprendida entre alabe y alabe. Todo lo mencionado anteriormente se explicará más adelante a partir de las caracterizaciones realizadas a la morfología y a la composición química de cada una de estas superficies.

El análisis realizado a través de las **Figuras 49**, se muestra los resultados de ángulo de contacto estático exhibido en cada una de las superficies impresas en 3D con resina fotocurable y recubiertas con distintos números de capas de trietoxi(octil)silano. Se realizará un análisis agrupado de las geometrías, se estudiará la morfología del arreglo con 4 alavés USA 49, hablando específicamente de los resultados mostrados en el ángulo de contacto estático(**Figura 49c**), se observa como el mayor resultado es aquel mostrado al recubrir la superficie con una capa, y como el menor es al recubrir con 3 capas la superficie , pero a diferencia de las otras esta geometría en especial presenta un resultado al recubrirlas con 5 capas que aumenta ligeramente a diferencia de las demás geometrías donde este valor disminuye. Se procede a analizar conjuntamente los arreglos de espinas cónicas con pendiente constante y punta truncada a 45° y 30° tal y como se plasma en las **Figuras 49b y 49d**. Cabe resaltar que, aunque su nivel de captación sea distinto, la morfología será la misma, ya que su superficie recibió el mismo tratamiento en su parte externa, donde se llevó a cabo la caracterización.

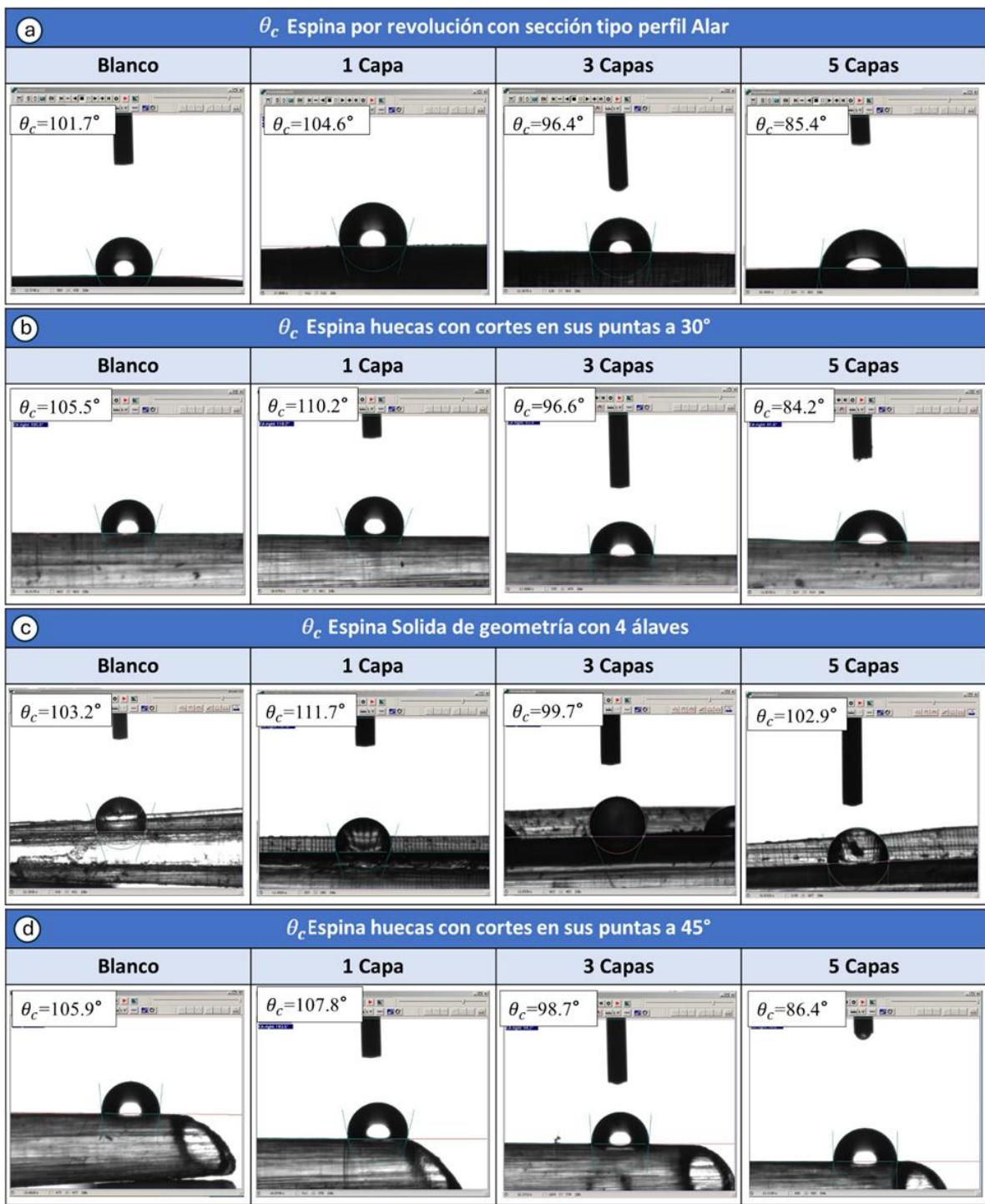


Figura 49. Caracterización ángulo de contacto estático (θ_s) a) ángulo de contacto en geometría por revolución b) ángulo de contacto en espina cónica con pendiente constante y punta truncada a 30° c) ángulo de contacto en geometría con 4 alabes. d) ángulo de contacto en espina cónica con pendiente constante y punta truncada a 45° .

El análisis realizado a los resultados de ángulo de contacto estático presentados en estas dos geometrías mencionadas anteriormente, muestra un aumento en el valor del ángulo al aumentar el número de capas, pero dicho valor disminuye al tener 3 capas de recubrimiento en esta superficie, y sigue dicha tendencia al pasar de 3 a 5 capas. Por ultimo y a más detalle, se caracteriza la geometría por revolución (**Figura 49a**), donde al igual que en las geometrías con cortes en sus puntas presenta un aumento y posterior disminución al aumentar el número de capas de recubrimiento, con la diferencia del valor máximo alcanzado en esta geometría, no es tan alto como el presentado en las otras geometrías lo cual se le acredita a la pendiente constante de dichas geometrías, y manteniendo valores en 3 y 5 capas semejantes a los de las demás geometrías.

4.3.2 Ángulo de contacto dinámico (ángulo de contacto en plano inclinado θ_i)

El comportamiento de las gotas de agua sobre el cuerpo de las espinas recubiertas con alcoxisilano no fluorado (triethoxi(octyl)silano) a distinto número de capas es de gran interés en este proyecto. Por tal motivo se realizaron mediciones de ángulo de contacto dinámico (θ_i) en función del número de capas de recubrimiento. En este caso las espinas se ubicaron con un ángulo de inclinación el cual varía entre 10° y 18°. Además, se realizaron mediciones del ángulo de contacto 5 s posterior a su primera medición. La **Figura 50** Muestra la medición del ángulo de contacto en la superficie de la espina cilíndrica por revolución con sección transversal tipo perfil alar.

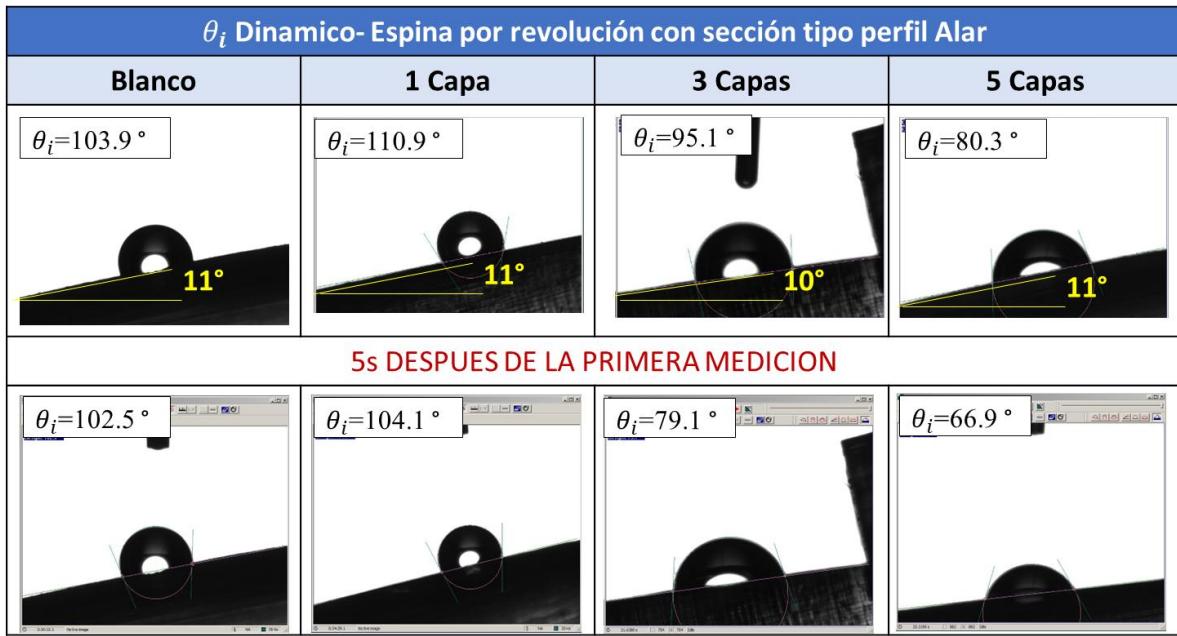


Figura 50. Ángulo de contacto dinámico en geometría por revolución

En la **Figura 50** se observa que al tener un ángulo de inclinación de 10° u 11° durante la medición, cada una de la configuración sufre una disminución en el valor del ángulo de contacto inicial, siendo en las espinas sin recubrimiento y con 1 capa de recubrimiento el valor de θ_i no tiene una variación significativa. A comparación de la configuración de 3 capas de recubrimiento, donde se observa en la sección de análisis hidrodinámico sufre una disminución en el valor de θ_i , pero se desplaza, teniendo así un ángulo de contacto propicio para que la gota se deslice a lo largo del cuerpo de la espina. A diferencia de la medición realizada en la espina con 5 capas de recubrimiento, su disminución del ángulo de contacto es bastante notorio generando un esparcimiento de la gota por la superficie (lo que indica que la superficie es muy hidrofílica), lo que infiere a que si no existe una nucleación con otra gota, ésta se tiende a evaporar, por lo que dicha gota captada no escurrirá y no será almacenada.

La medición del ángulo de contacto dinámico y el análisis del comportamiento de las gotas sobre el cuerpo se hizo en conjunto en las geometrías de pendiente constante con corte en sus puntas. Debido a que en los dos casos se llevó a cabo el mismo

procedimiento de manufactura y su única diferencia radica en la geometría diseñada e impresa en sus puntas como se muestra en la **Figura 51a y 51b**.

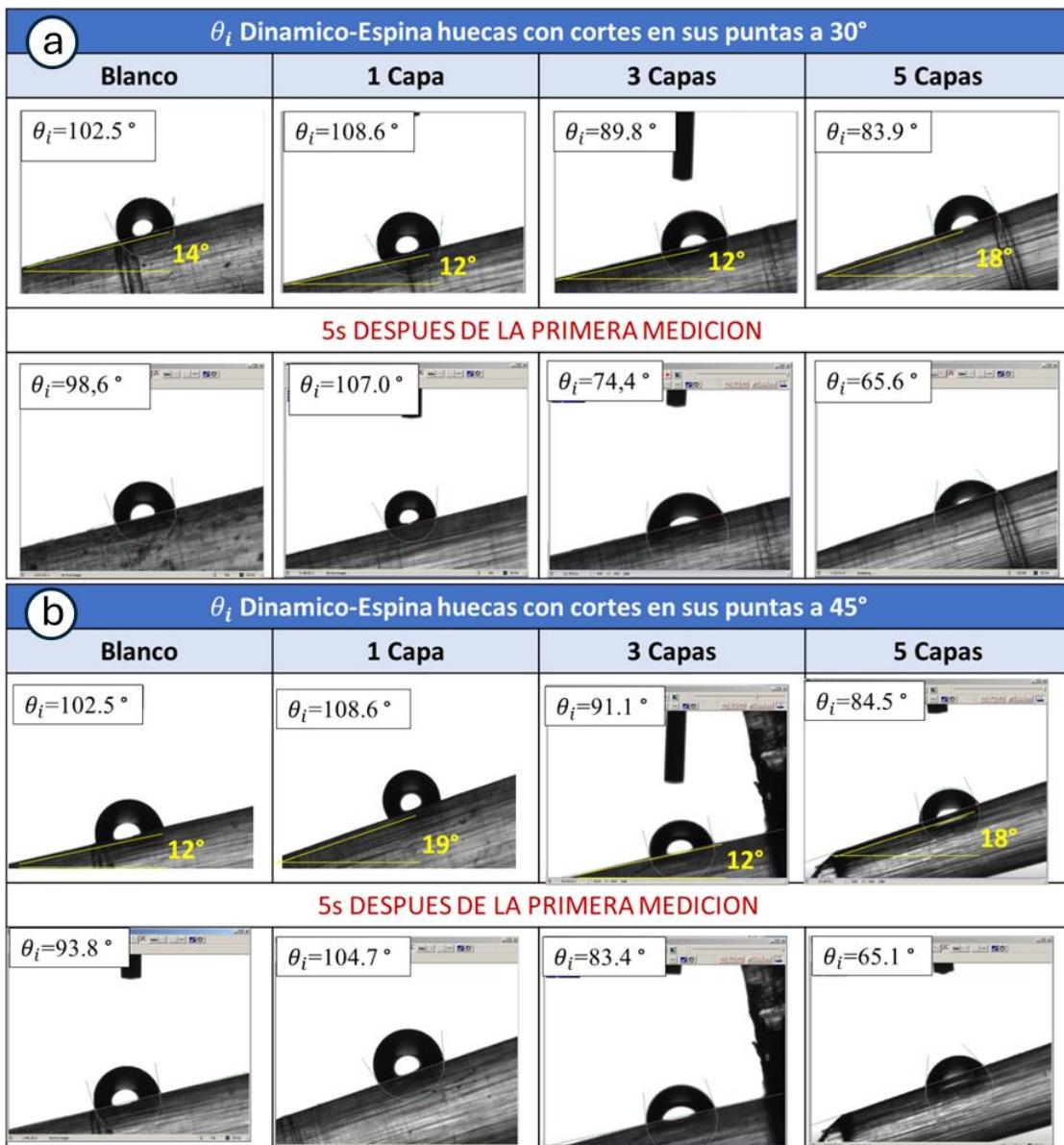


Figura 51. Ángulo de contacto dinámico a) ángulo de contacto dinámico en espina cónica con pendiente constante y punta truncada a 30°b) ángulo de contacto dinámico en espina cónica con pendiente constante y punta truncada a 45°

En la **Figura 51**, al igual que en la espina por revolución, se toman mediciones de ángulo de contacto a lo largo de toda la espina y en este caso la variación en θ_i esta

entre los 12° y 18° . Se presenta una variación menor en los valores de ángulo de contacto con 1 capa y 3 capas recubrimiento después de 3 s, esto se le atribuye a la pendiente constante que tienen estos modelos, debido a que al tomarse distintas mediciones a lo largo de la espina la rugosidad dada por la impresión permanece constante. Los valores dados por las mediciones mostrada en la **Figura 52**, corresponden al ángulo de contacto dinámico referente al área comprendida entre alabe y alabe de las espinas diseñadas con cuatro alabes de sección transversal tipo perfil alar.



Figura 52. Ángulo de contacto dinámico en geometría tipo espina cónica con cuatro alabes de sección tipo Perfil Alar Usa49.

Las mediciones mostradas en la **Figura 52** se realizaron de la mitad de altura de las espinas hacia su base. Esto se debe a que el diámetro de la gota y su área correspondiente era mayor que la superficie comprendida entre los alabes en esta parte de la espina. Allí observamos resultados parecidos a los diseños con pendiente constante sin alabes, lo cual es consistente a diferencia del recubrimiento con 5 capas, debido a que presentan un $\theta_i > 3$ capas, lo cual difiere a la tendencia de ser inferior al de 3 capas.

A partir de los resultados mostrados en esta sección, se observa las variaciones de θ_i después de un tiempo determinado. Concluyendo que al agregar una capa de recubrimiento al modelo impreso su ángulo de contacto aumenta, al igual que se observa en el θ_s y por conseciente el esparcimiento será ligeramente menor al presentado con el modelo sin recubrimiento en cada uno de los modelos. Pero el esparcimiento debido a la hidrofilicidad de la superficie se hace mucho más notorio al aumentar el número de capas, donde dicho esparcimiento al pasar de 3 o 5 s se hace más notorio, exhibiendo un carácter más hidrofílico en las espinas recubiertas con 5 capas de trietoxi(octil)silano.

4.3.3 Análisis hidrodinámico de las puntas de las espinas por revolución recubiertas con distinto número de capas.

Al tener la resina un carácter hidrofóbico, se observa como la combinación de la geometría y energía superficial es un factor importante en la captación y en el posterior comportamiento de las gotas formadas en la punta y a lo largo del cuerpo de la espina. Cada una de las geometrías fueron diseñadas con parámetros específicos los cuales aerodinámicamente favorecieran la captación y el transporte de las gotas a lo largo de la superficie de la espina. Por lo que, al aplicar un recubrimiento, este debe favorecer y aumentar la capacidad de captación, y no perjudicarlo. Por lo que se le realiza un estudio hidrodinámico (análisis del comportamiento de una masa de agua sobre una superficie) en las puntas de los modelos por revolución, los cuales presentan mayor captación. Para analizar el comportamiento de una gota al ingresar a los conductos internos y posteriormente un análisis de la presión inversa de Laplace en las geometrías diseñadas aumentando el número de capas de recubrimiento. Al momento del análisis como se muestra en la **Figura 53a** se observa el comportamiento de la espina sin recubrimiento.

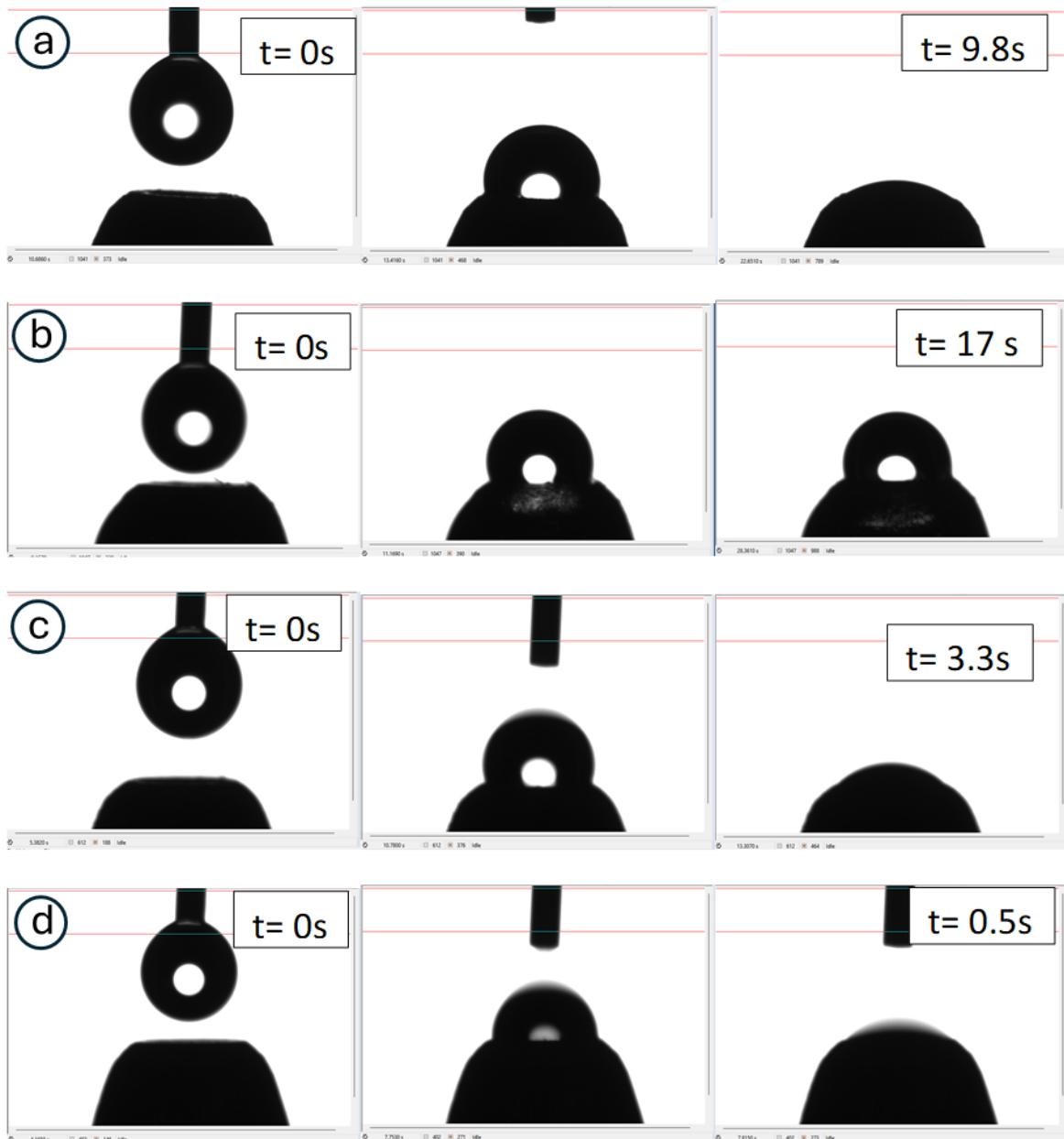


Figura 53. Estudio del comportamiento hidrodinámico de una gota de agua al posarse sobre la punta de las espinas por rotación. a) punta de espina sin recubrir (blanco, muestra control), b) punta de espinas con 1 capa de recubrimiento, c) punta de espinas con 3 capas de recubrimiento, d) punta de espinas con 5 capas de recubrimiento.

En la **Figura 53^a**, al analizar el comportamiento de una gota de $3 \mu\text{L}$ en la parte central y superior del conducto interno, y teniendo en cuenta que θ_s en la superficie sin

recubrimiento es de 103.9° , se observa que la gota tarda alrededor de 9.8 s para entrar en su totalidad al conducto. Interesantemente, en los modelos de espinas recubiertas con 1 capa de recubrimiento en donde su $\theta_s = 110.9^\circ$ (**Figura 53b**) la gota tarda alrededor de 17 s en entrar en apenas una cuarta parte del conducto, lo cual conduce a su evaporación con el tiempo. Por tanto, aunque la gota puede ser captada, esta no suma en la cuantificación de agua que llega al reservorio inferior.

Por su parte, en la **Figura 53c**, la gota tarda alrededor de 3.3 s en entrar por completo al conducto central en modelos de espinas recubiertas con 3 capas de trietoxi(octil)silano y teniendo un $\theta_s = 95.1^\circ$. Cabe resaltar que este arreglo es el que presenta mayor captación de agua de neblina como se mostrara más adelante. Finalmente, las superficies con 5 capas de recubrimiento y $\theta_s = 80.3^\circ$ (**Figura 53d**) muestran que la gota tarda alrededor de 0.5 s en esparcirse al interior del conducto, dando la falsa impresión que entra en su totalidad al conducto. Es decir, como es más hidrofílica la superficie, la gota moja el conducto en lugar de preservar una forma semiesférica. Esto propicia que se evapore como en el primer caso, sin contribuir a la captación efectiva de agua en el reservorio inferior.

Con lo mostrado anteriormente observamos como el número de capas de recubrimiento aplicado puede favorecer o disminuirla la captación. Ya que, si el recubrimiento es muy hidrofóbico como en el arreglo recubierto con 1 capa, la gota no fluirá por el conducto interno, debido a la repelencia de la superficie al agua, generando una pérdida de captación por dicho conducto. Por otro lado, si es muy hidrofílica la superficie, superficialmente se produce un menor ángulo de contacto, un mayor esparcimiento de la gota y por lo tanto una evaporación de la misma. Un balance hidrofóbico-hidrofílico es lo propicio, mostrando que los modelos con 3 capas de recubrimiento no fluorado como el trietoxi(octil)silano y con $\theta_s = 95.1^\circ$. propicia una captación de gotas al interior de los modelos huecos que suman a la masa de agua del reservorio inferior, mostrando niveles de captación superiores a los reportados en literatura como se verá más adelante.

Cabe hacer mención que una característica a la cual se le atribuye la captación de agua de neblina en sistemas naturales (especialmente en los cactus), es la presión inversa de Laplace. Este fenómeno físico genera un movimiento direccional de las gotas captadas desde la punta hacia el tallo de la planta para su posterior almacenamiento, aunque la punta esté orientada hacia abajo. La presión inversa de LaPlace se observó en las espinas cilíndrica por revolución con sección transversal tipo perfil alar ejemplificado en la **Figura 54**.

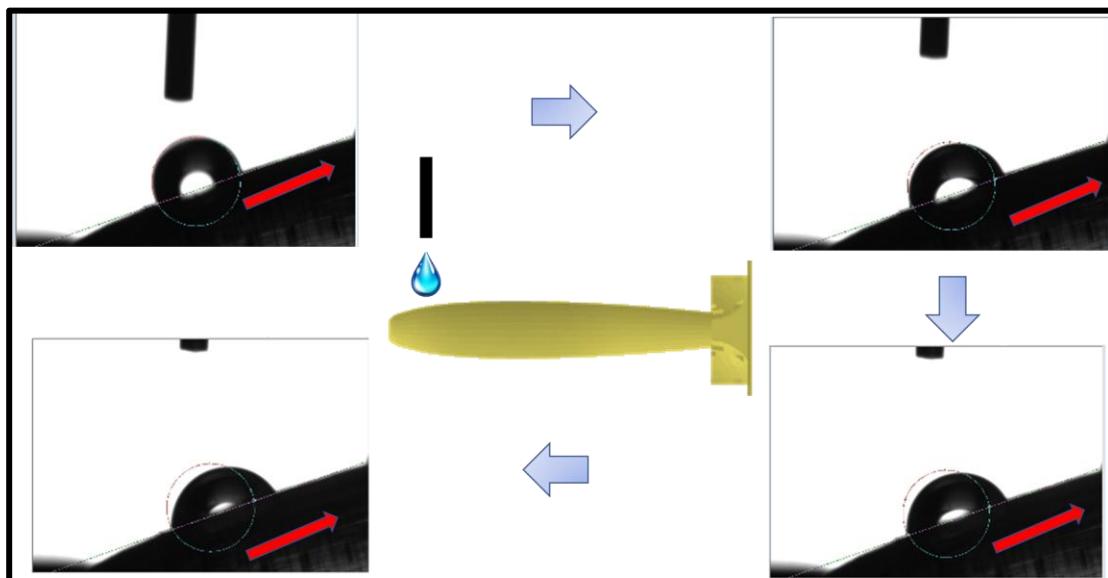


Figura 54. Presión Inversa de Laplace en el cuerpo de la espinas cilíndrica por revolución en plano inclinado con sección transversal tipo perfil alar.

En la **Figura 54** se observó el movimiento de la gota en contra de la gravedad a lo que se conoce como presión inversa de LaPalce presentado en la superficie cercana a la punta de la geometría por revolución. Este fenómeno es típico en la superficie de las espinas de los cactus. Este comportamiento nos indica que debido a la geometría y al balance hidrofóbico-hidrofílico se genera una presión dentro y fuera de una curva de la gota sobre la superficie (driving force), moviéndose en dirección contraria a la gravedad desde la punta hasta el tallo para su posterior almacenamiento. Además, este fenómeno físico observado en espinas por revolución huecas y con 3 capas de recubrimiento, favorece los niveles de captación de agua de neblina.

4.4 Análisis morfológico y composición química de las espinas diseñadas.

Posterior a la caracterización de la capacidad de captación y caracterización de ángulo de contacto de cada uno de los arreglos recubiertos con un cierto número de capas, es necesario caracterizar la superficie externa de cada uno de los arreglos. Dicha caracterización se realizó con el fin de dar una explicación al comportamiento mostrado por los distintos arreglos y demostrar como el recubrimiento influye en la superficie de los impresos en 3D. A continuación, se procede con un análisis por EDS para cada caso, con el fin de observar la distribución de los grupos alcoxisilano a lo largo de la superficie de las espinas, y como con el aumento de numero de capas de recubrimiento se acopla a dicha superficie. Mediante análisis AFM observamos la topología de la superficie como una función del número de capas de recubrimiento, dicha morfología presenta cambios los cuales pueden ser o no conveniente para llevar a cabo la captación. Así, se puede construir una idea clara y correlacionar de cómo los distintos factores ocasionados por una impresión 3D, con el recubrimiento con distinto número capas de un compuesto no fluorado para optimizar un sistema de captación de agua pasivo procedente de la neblina

4.4.1 Análisis morfológico y composición química de arreglos con 4 álabes de sección tipo perfil alar

La geometría compuesta por cuatro álabes (**Figura 55**) muestra una particularidad tanto en su captación como en el ángulo de contacto, presentado en la superficie con 5 capas de recubrimiento. Cabe mencionar que es la única geometría en la cual tanto el ángulo de contacto como el nivel de captación no disminuyen notoriamente de 3 a 5 capas de recubrimiento, sino que tiene un comportamiento muy semejante. Además de ello, hay que resaltar en esta geometría la complejidad que se tiene para llevar a cabo caracterizaciones debido a los álabes que salen de su estructura, por tanto, se analizó la superficie comprendida entre álabe y álabe la cual transversalmente es bastante pequeña.

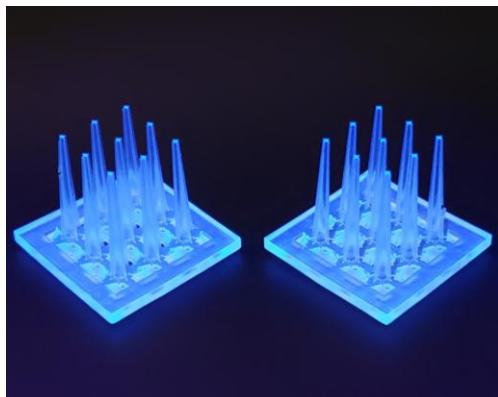


Figura 55. Arreglo de espinas cónicas con cuatro alabes de sección tipo Perfil alar Usa49

Como se menciona, la deposición de la gota para medir el ángulo fue un reto, así como en los ensayos de AFM para la correcta ubicación de la muestra para su caracterización. Se toma la decisión de que en este impreso solo se lleve a cabo la caracterización por EDS para tener un mapeo químico de la presencia de los grupos silanos en la superficie en función al número de capas.

Con el anterior mapeo químico mostrado en la **Figura 56** observamos el máximo contenido expresado en porcentaje atómico de silicio está presente en la geometría recubierta por 5 capas, aunque se destaca que entre 3 y 5 capas la diferencia de contenido de silicio no es sustancialmente diferente. Además, correlacionando con los resultados de ángulo de contacto y captación de agua, vemos como específicamente esta geometría con la presencia de grupos silanos no fluorados permite llegar con 5 capas a un balance hidrofóbico-hidrofílico, muy semejante al de 3 capas. Así los resultados son parecidos, concluyendo que la presencia de silanos aumenta ligeramente con 5 capas a comparación de 3 capas, en donde la captación es muy similar.

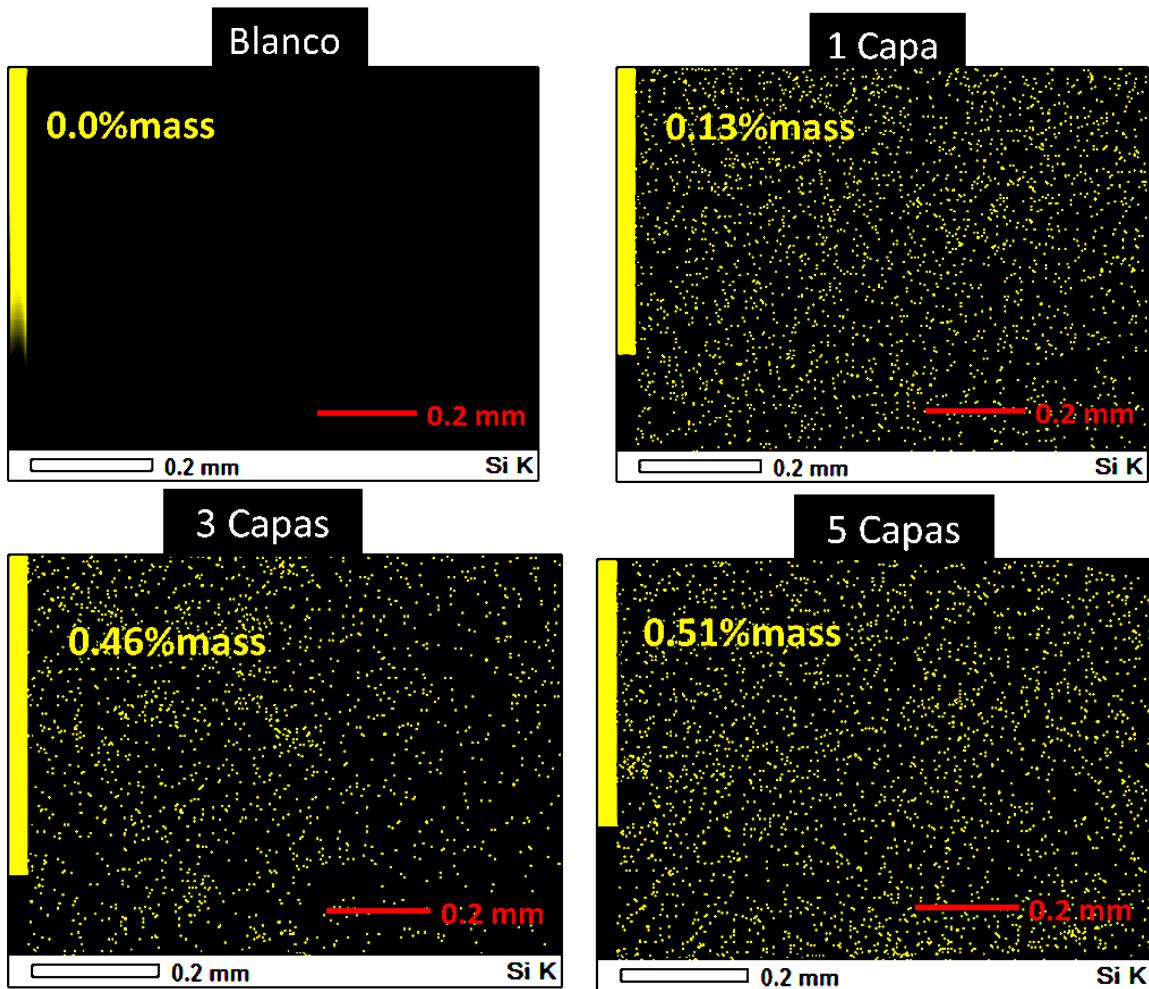


Figura 56. EDS (Energy-dispersive X-ray spectroscopy) de geometría tipo espina cónica con cuatro álabes de sección tipo Perfil Alar Usa49 variando el número de capas

Por otra parte, la distribución de mapeo químico de carbono en función del número de capas sobre los impresos se plasma en las imágenes tomadas de la caracterización SEM, en la **Figura 57**.

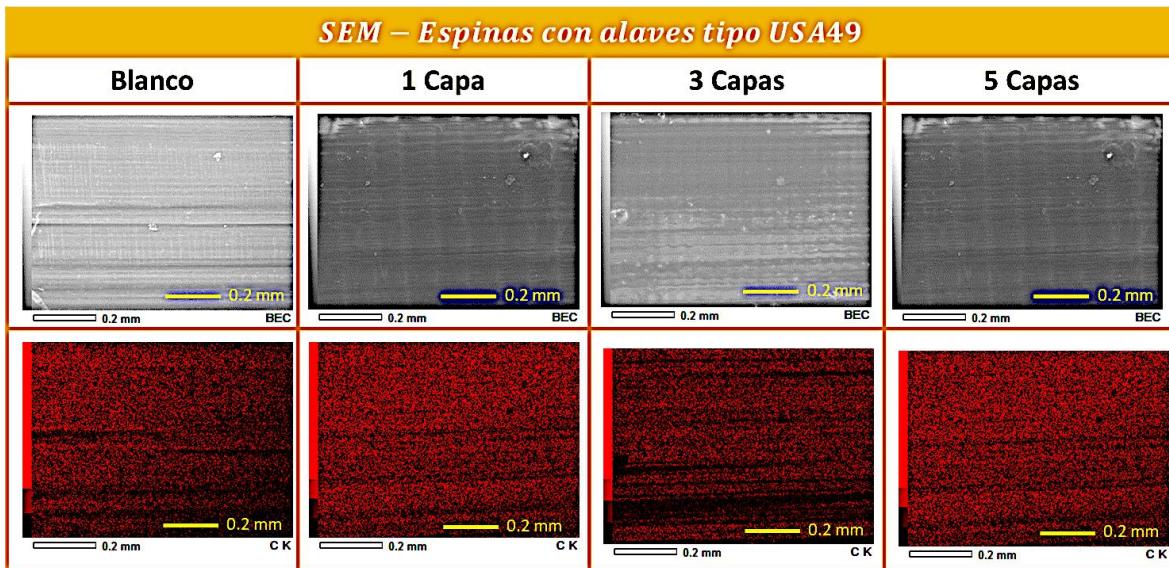


Figura 57. SEM espinas con alabes tipoUSA49. Columnas: Número de capas; Fila1: Micrografía SEM; Fila 2: Micrografía EDX (Carbono)

Debido a la geometría presentada en este tipo de espinas, específicamente a causa de los alabes fue imposible el análisis AFM de la morfología de la superficie de estos modelos sin tener que destruirlos. Por tanto, a partir de la micrografía SEM y EDX se observa un acanalamiento propio del proceso de impresión en dirección vertical debido a la impresión en 3D por SLA⁶². Este defecto de impresión es una ventaja estructural que emula el acanalamiento natural presente en espinas de las cactáceas (v.g. *C. Cirinea*³³). Cabe destacar que con el aumento del número de capas (y por consecuente el número de tratamiento térmicos) se denotan dichos canales al pasar de 0 a 3 capas, mientras que con 5 capas, se pierden esta definición, debido a la acumulación de recubrimiento. Esta geometría presenta una pendiente constante, además de que el material y proceso de recubrimiento/curado es el mismo para todos los modelos, por lo que los resultados mostrados a continuación de la caracterización AFM a las espinas con pendiente constante y sin álabes serán similares a los que debería presentar esta geometría con 4 álabes.

4.4.2 Análisis morfológico y composición química de los arreglos de espinas con conductos internos, cónicas con pendiente constante y punta truncada a 30°y 45°

Se agrupan estas dos geometrías en la caracterización superficial ya que en estas geometrías solo las distingue la inclinación de las puntas, conservando el grosor de capa de impresión, los tiempos de curado, la forma de aplicación de recubrimiento y sus tratamientos térmicos por lo que su superficie será la misma con 0 ,1 ,3 y 5 capas.

La **Figura 58** ejemplifica las geometrías analizadas.

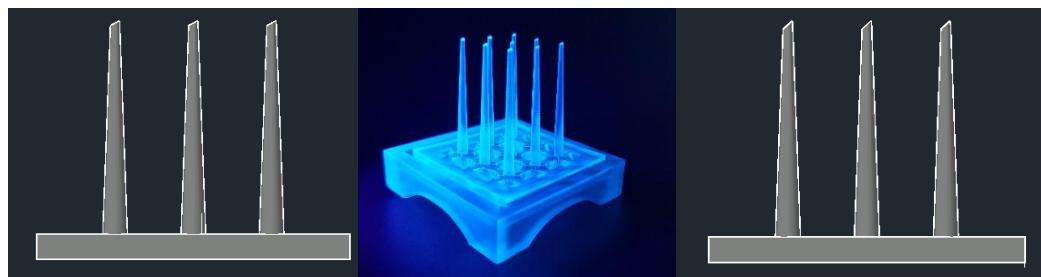


Figura 58. Arreglos espina huecas y cónicas con pendiente constante y punta truncada a 30°y 45°.

Con fin de explicar por qué al aumentar el porcentaje atómico de silicio presente en los grupos silanos del recubrimiento en la superficie, lo cual disminuye el ángulo de contacto notoriamente, se realizó un análisis por AFM en donde se muestra el comportamiento morfológico de la superficie como lo ejemplifica la **Figura 59**.

La **Figura 59** revela la formación de canales longitudinales propios de la impresión en 3D vertical por SLA⁶². El acanalamiento (el cual podría considerarse como un defecto de impresión) es el que da origen a emular ésta característica inherente en espinas naturales presentes en la cactáceas³³. Los canales aumentan su definición desde el blanco hasta su máximo en 3 capas, además de observar como con 5 capas de recubrimiento dichos canales de distorsionan y pierden la definición, lo que demuestra una vez más que con 3 capas los valores alcanzan su punto máximo.

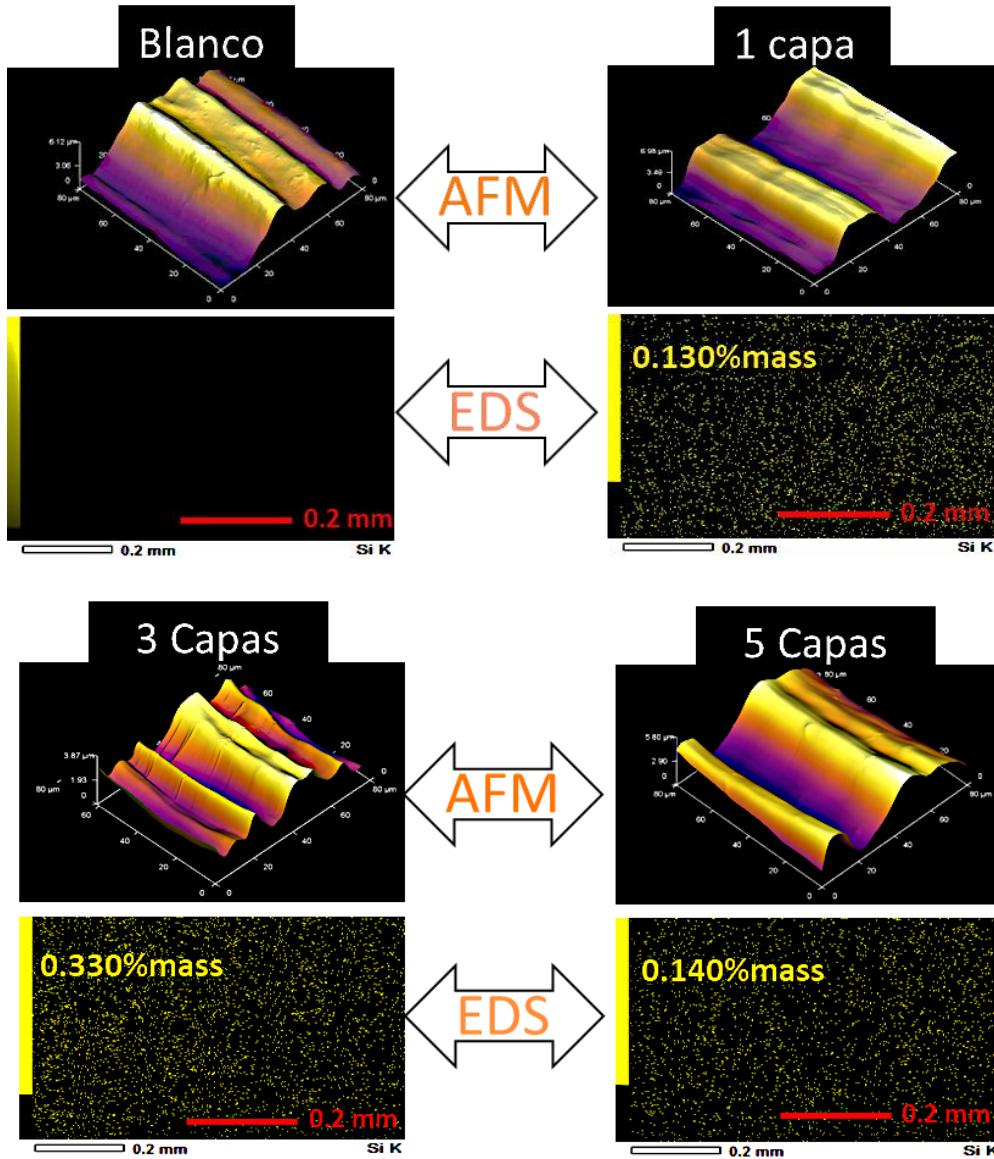


Figura 59. AFM (Atomic force microscopy) y EDS(Energy-dispersive X-ray spectroscopy) de geometrías tipo espina cónicas con pendiente constante y punta truncada a 30°y 45° con 0,1,3 y 5 capas.

A partir de un perfil de profundidad de las imágenes de AFM, se obtiene la altura de cresta a valle de los canales formados aumentando ligeramente de 6.1 a 6.9 μm . Como se mencionó anteriormente con los modelos de 4 alabes, los canales presentados en los impresos con 3 capas de recubrimiento y por consiguiente 4 tratamientos térmicos, se refinan tomando valores en su altura de 3.8 μm y ancho de canal variable de 2 a 5 μm . La distorsión de los canales presentada en los modelos recubierto con 5 capas y

tratamientos térmicos se tiene un mayor valor de altura en los canales obteniendo valores de 5.9 μm . Lo dicho anteriormente demuestra principalmente como la deposición de 3 capas de recubrimiento de trietoxioctil silano altera la morfología de la superficie a partir de los tratamientos térmicos entre capa y capa, generando canales en los cuales se deposita el recubrimiento de una capa posterior y aumentan la capacidad de captación con la presencia de silanos en las crestas de los canales. Esto es muy importante, ya que se logra un balance entre morfología y composición química apta para el transporte de las gotas sobre la superficie de las espinas diseñadas e impresas en 3D por SLA. Esta morfología estructural conduce a las gotas de manera eficiente hacia un depósito ubicado en la parte inferior de los arreglos. Este balance se le denominó balance hidrofóbico-hidrofílico.

Por otra parte, la **Figura 60** muestra las imágenes obtenidas a partir de caracterización SEM de las espinas cónicas de pendiente constante y punta truncada. En las columnas encontramos las figuras correspondientes a la geometría de esta sección variando el número de capas de recubrimiento. La primera fila de imágenes corresponde a la micrografía SEM de la geometría recubierta con el número de capas correspondiente, y la micrografía EDX del mapeo químico correspondiente a carbono se muestra de color rojo en la fila 2. A partir de estas imágenes se corrobora la presencia notoria de micro canales en la superficie de las espinas propios de la impresión en 3D por SLA⁶¹ y el cual corresponde a un acanalamiento propio de espinas naturales de cactáceas³³. La presencia de ellos se maximizó con 3 capas de recubrimiento, en donde los canales son más finos. En la segunda fila la presencia de carbono y en las crestas genera una demarcación de los canales. A diferencia de los resultados presentados en las espinas con álabes estas imágenes tienen una mayor definición de canales debido a que la superficie es plana, lo que causa un recubrimiento más homogéneo.

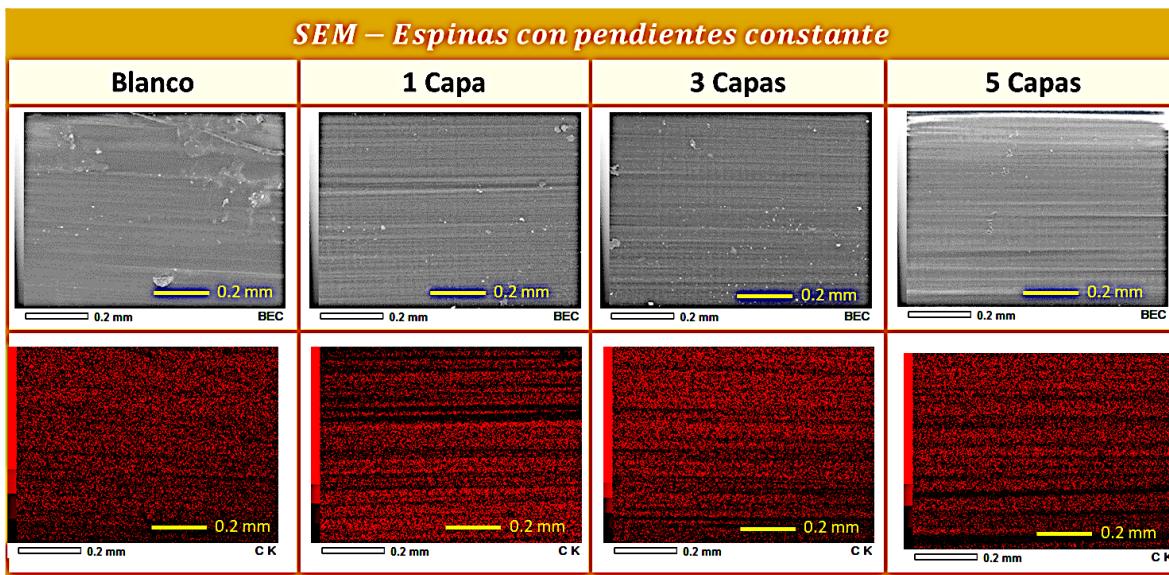


Figura 60. SEM espinas con pendiente constante y punta truncada
 .Columnas:Numero de capas; Fila1: Micrografía SEM; Fila 2: Micrografía EDX(Carbono)

4.4.3 Análisis morfológico y composición química del arreglo por revolución del perfil alar USA 49

Una caracterización en su superficie más detallada se efectúa a esta geometría debido a que presenta los mejores resultados de captación (**Figura 61**). Debido a su diseño aerodinámico se analizan longitudinalmente las geometrías y principalmente en las superficies más altas ya que aerodinámicamente la parte superior de esta superficie debe tener características especiales las cuales aumenten notoriamente las velocidades de flujo de la gota para consecuentemente llevarla al depósito de almacenamiento.

Un análisis superficial por SEM y AFM (**Figura 62**) se realizaron para correlacionar y dar explicación de ¿cómo con 3 capas de recubrimiento depositadas en esta geometría basada en perfiles alares, su capacidad de captación aumenta notoriamente? a comparación de los demás diseños propuestos en este trabajo de tesis de maestría y de la literatura, arrojando los siguientes resultados.



Figura 61. Arreglo por revolución del perfil alar USA 49

La **Figura 62** muestra el análisis AFM y el mapeo EDS en la superficie de las espinas con geometría cilíndrica por revolución con sección transversal tipo perfil alar.

A partir del análisis por EDS y AFM mostrados en la **Figura 62** del arreglo con 3 capas (mayor captación), observamos por AFM como se forman canales longitudinales los cuales son propicios para el transporte de gotas de agua los cuales son observados en las espinas naturales de cactus³³ y se generan en la impresión 3D por SLA⁶¹. Se observa como con 3 capas se obtiene una mayor concentración del silicio presente en el trietoxi(octil)silano en la superficie del impreso. A lo largo de toda su superficie y principalmente en la parte con mayor altura de su sección transversal, se observa este aumento de concentración, confiriéndole un balance ideal físico y químico para la captación y posterior almacenamiento de las gotas formadas. En las imágenes de AFM del perfil de profundidad, se muestra la disminución de altura de los canales con valores en la muestra de control de 8.7 μm , llegando a 6.1 μm en la geometría recubierta con 3 capas. Esta disminución en la altura se atribuye a la mayor presencia del recubrimiento en la superficie y el refinamiento de los canales generado por los tratamientos térmicos realizados en el curado del modelo y el realizado entre capa y capa. En 5 capas dicho comportamiento de refinamiento y disminución de altura cambia, teniendo canales poco definidos, atribuyendo dicho comportamiento al tratamiento térmico y a la alta presencia superficial de recubrimiento la cual se puede comprobar a partir del porcentaje en masa reportado.

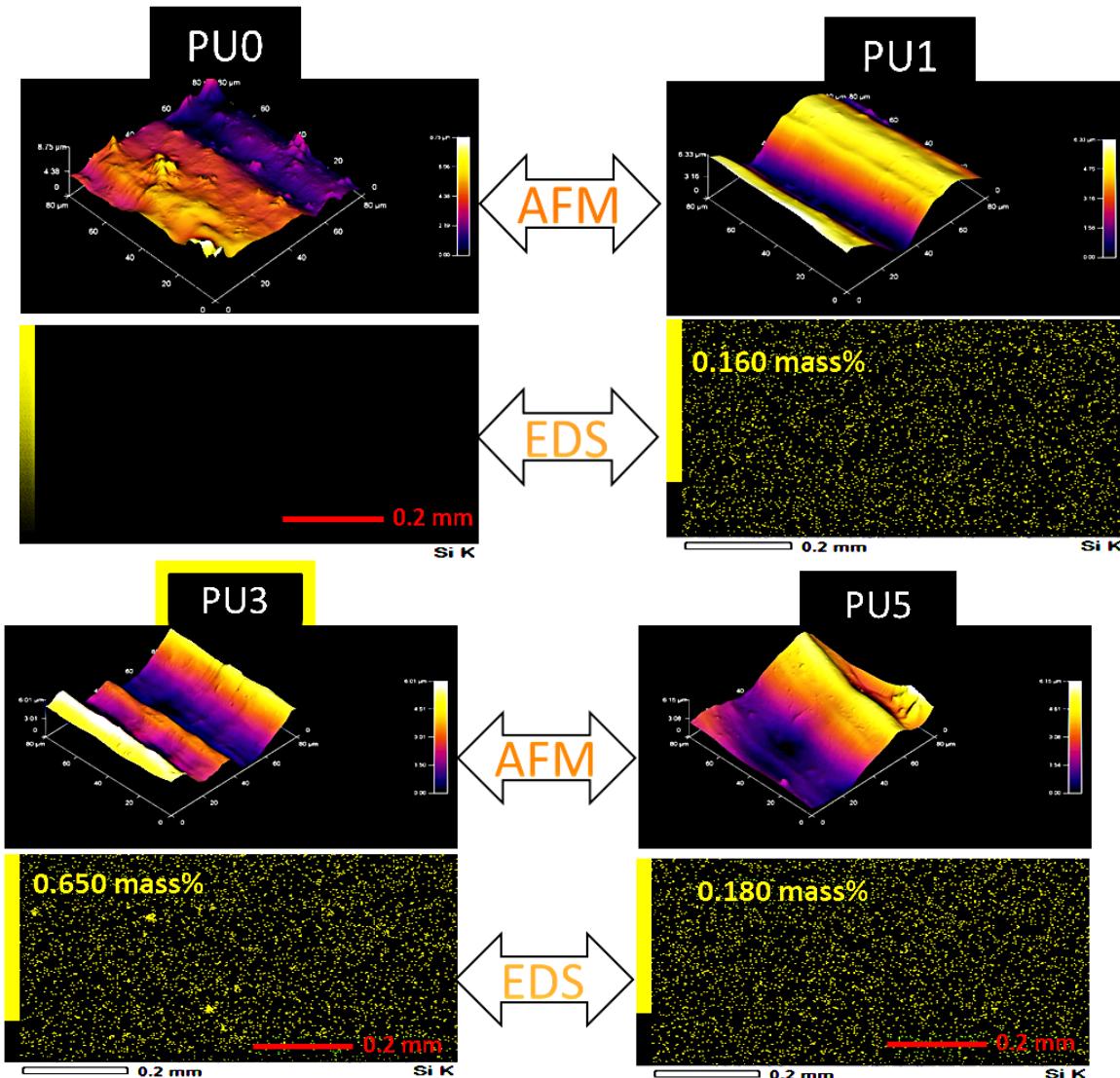


Figura 62. AFM (Atomic force microscopy) y EDS (Energy-dispersive X-ray spectroscopy) de geometrías por revolución

La caracterización SEM de la espina por revolución se realizó a lo largo de toda la superficie perimetral del modelo 3D de base a punta, a través de las micrografías presentadas en la **Figura 63**.

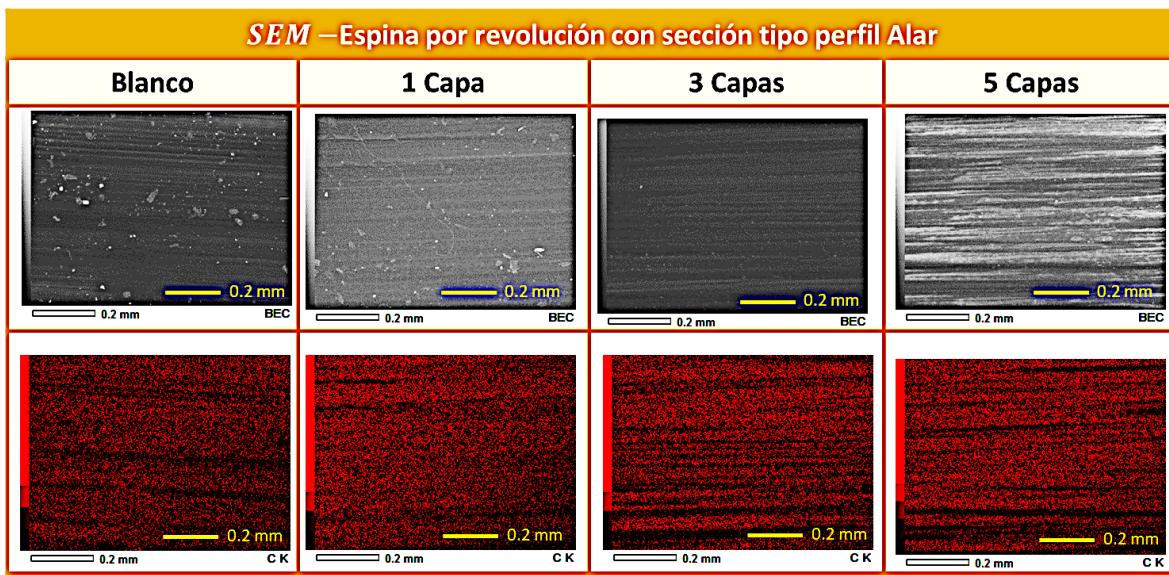


Figura 63. SEM espinas con alabes tipo USA49. Columnas: Numero de capas; Fila1:Micrografía SEM; Fila 2:Micrografía EDX(Carbono)

Cabe hacer mención que este modelo no presenta un volumen de pared, ni pendiente constante debido a la geometría diseñada, por tanto, tiene un comportamiento particular en comparación con los resultados anteriormente mostrados de los modelos con pendiente constante. En esta geometría los canales se demarcan mucho más y por consecuencia se visualizan con mayor facilidad, particularmente en el área donde cambia su pendiente, región correspondiente al espesor máximo de la sección transversal tipo perfil alar. Al igual que en los resultados mostrados por AFM, las micrografías EDX del mapeo químico del carbono muestran la presencia de canales y su refinamiento al aumentar el número de capas de 1 a 3. De forma consistente de pasar de 3 a 5 capas, estos canales pierden su definición y se distorsionan. Dicho análisis se observa más específicamente al comparar la micrografía SEM de 3 y 5 capas donde las líneas son de mayor grosor, haciendo referencia a los canales distorsionados mostrados en los resultados de AFM de la geometría recubierta con 5 capas del modelo por revolución mostrados en la **Figura 62**.

4.5 Capacidad de captación de agua de neblina de cada uno de los sistemas impresos en 3D.

Las propiedades ópticas de la resina usada para la impresión de los modelos permiten la visualización de parámetros geométricos mostrados, pero aparte de ello debido a su fluorescencia genera un contraste con las gotas de agua las cuales nos evidencia la formación de gotas a lo largo de las espinas diseñada.



Figura 64. Formación de gotas en la punta y cuerpo de espina por revolución

En la **Figura 64** se muestra la formación de gotas en la punta y el cuerpo de los arreglos por revolución. Se denota su formación debido a que este arreglo presenta una pendiente positiva en los primeros 0.5 cm, la cual termina en una cresta característica de los perfiles aleres, terminando con una pendiente negativa hasta su base, contrario a las demás geometrías las cuales presentan pendientes positivas y constantes de punta a base como se muestran en la **Figura 65**.

Debido a la geometría cónica truncada en las espinas con pendiente constante, el área de la superficie en la punta es menor, pero gracias a la fluorescencia del material se puede evidenciar la formación de gotas en sus puntas y dentro del conducto interno de las espinas.

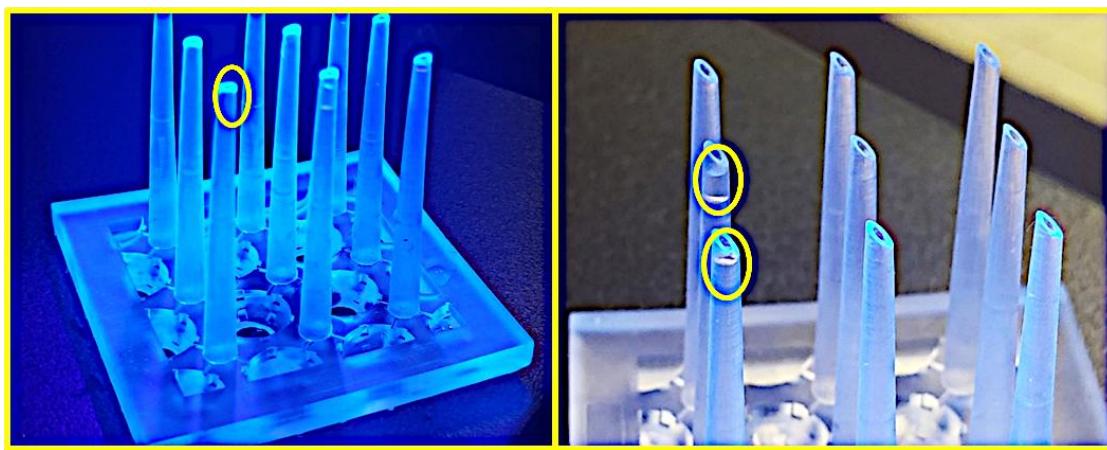


Figura 65. Formación de gotas en la punta y cuerpo de espina con pendiente constante

Para medir la capacidad de captación de agua de cada uno de los arreglos se toman en cada una de las mediciones dos valores de delta de peso, los cuales son la diferencia de peso del arreglo y la diferencia de peso de cada uno de los depósitos correspondientes al arreglo, se reportan los dos resultados, pero como en este proyecto el objetivo es determinar la capacidad de captación de cada uno de los arreglos, se tomó únicamente el valor de cambio de peso en el depósito inferior de los arreglos. Lo explicado anteriormente se plasma en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Medición de la capacidad de captación de cada uno de los arreglos dependiendo geometría y número de capas de recubrimiento

Número de ensayo	# capa					
	Peso arreglo			Peso Deposito de agua		
	Peso Inicial	Peso Final	Delta	Peso Inicial	Peso Final	Delta
Del 1	Px_i	Px_f	$Px_f - Px_i$	Px_i	Px_f	$Px_f - Px_i$
al 10	Px_{i+1}	Px_{f+1}	$Px_{f+1} - Px_{i+1}$	Px_{i+1}	Px_{f+1}	$Px_{f+1} - Px_{i+1}$
Peso en Miligramos		Promedio	\bar{X}_{1-10}	Promedio		\bar{X}_{1-10}
		Desviacion	σ_{1-10}	Desviacion		σ_{1-10}

Realizado el estudio de los sistemas pasivos, determinando la diferencia de peso en cada uno de ellos, y teniendo el resultado dependiendo el número de capas de recubrimiento, se plasman los valores correspondientes clasificándolos en tipo de geometría y numero de capas de recubrimiento como se muestra en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Resultados de captación de cada uno de los arreglos con su correspondiente recubrimiento por número de capas

Nombre del arreglo	Numero de Capas	Sigla	Captación Arreglo (g)	Desv. estándar	Captación deposito (g)	Desv. estándar
Perfil alar USA por revolución	0	PU0	0.172	0.045	0.123	0.022
	1	PU1	0.181	0.008	0.113	0.008
	3	PU3	0.329	0.010	0.515	0.015
	5	PU5	0.494	0.013	0.237	0.013
Alabé USA 49	0	AU0	0.131	0.015	0.133	0.199
	1	AU1	0.132	0.010	0.123	0.010
	3	AU3	0.161	0.010	0.148	0.020
	5	AU5	0.258	0.014	0.155	0.018
Espina cónica con pendiente constante y punta truncada a 30°	0	P300	0.127	0.042	0.142	0.022
	1	P301	0.148	0.011	0.137	0.011
	3	P303	0.178	0.004	0.214	0.031
	5	P305	0.186	0.034	0.154	0.021
Espina cónica con pendiente constante y punta truncada a 45°	0	P450	0.105	0.061	0.123	0.179
	1	P451	0.165	0.014	0.118	0.028
	3	P453	0.164	0.013	0.171	0.014
	5	P455	0.179	0.006	0.160	0.020
Perfil Alar recubierto con trimethoxy(Propyl) silane (control)	3	PP3	0.154	0.015	0.138	0.012

Con base en la **Tabla 5** se procede a graficar los datos para tener una visualización más detallada como lo sugiere la **Figura 66**.

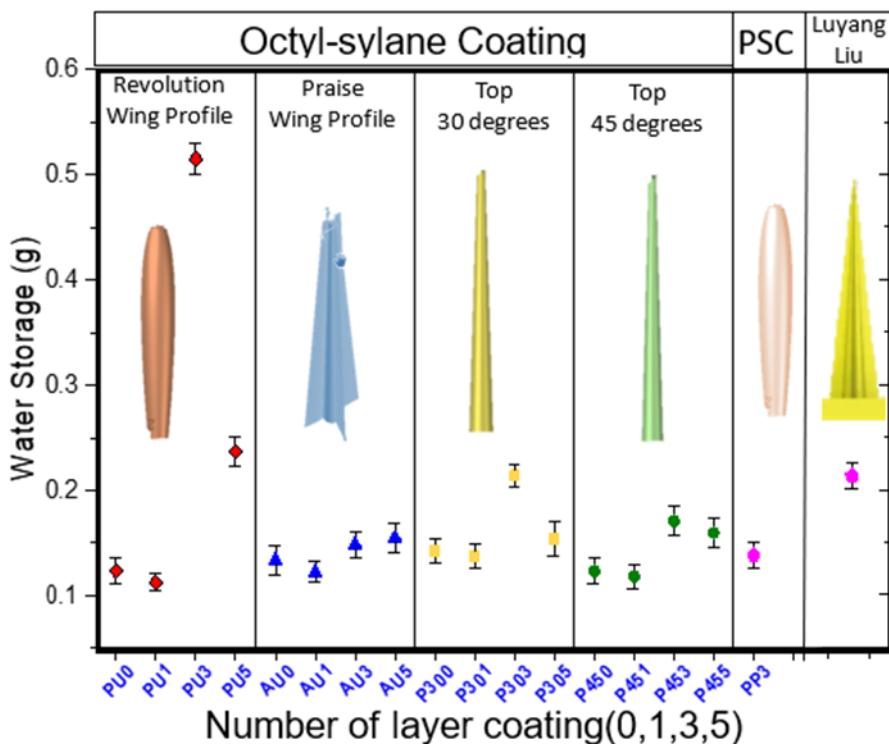


Figura 66. Capacidad de captación de cada arreglo con su correspondiente recubrimiento por número de capas, PSC (trimetoxi(propil)silano), Luyan Liu (Mejor sistema de captación reportado en literatura)⁷

Los resultados mostrados en la **Figura 66** evidencian la capacidad de captación de agua de neblina de cada uno de los sistemas pasivos. En esta grafica se observa que el mejor sistema de captación es el sistema pasivo por revolución con perfil alar. En particular con 3 y 5 capas de recubrimiento presentan los mejores resultados. En cada uno de los sistemas geométricamente hablando se observa que el mejor sistema es aquel que se recubre con 3 capas de trietoxi(octil)silano. En cada uno de ellos se observa que con 1 capa de recubrimiento el nivel de captación disminuye levemente, eso lo atribuimos al aumento del carácter hidrofóbico de las superficies externas de las espinas, y por consecuente de la entrada a sus conductos internos. Con 3 capas de recubrimiento, el valor de captación aumenta debido a que se propicia un balance hidrofóbico-hidrofílico. Además, de acuerdo a los análisis realizados por AFM a cada uno de los sistemas con 3 capas de recubrimiento, se demarcán canales los cuales favorecieron la morfología superficial para una captación y fluides de las gotas hacia

su depósito. Con 5 capas de recubrimiento los 3 sistemas con conductos internos en sus espinas muestran una disminución en su nivel de captación, pero ligeramente superior al nivel logrado sin recubrimiento. Esto se atribuyó a la morfología superficial con ausencia de canales y por consecuencia a la distribución heterogénea de los grupos silano mostrados por EDS. Además, de un bajo ángulo de contacto estático (θ_s) mostrado en la **Figura 48**, lo que genera un mayor esparcimiento de las gotas captadas sobre la superficie ocasionando (alta mojabilidad) y la evaporación de las mismas. Un comportamiento particular se presentó en la configuración con cuatro álabes ya que dicha geometría presenta un ligero aumento en el nivel de captación al pasar de 3 a 5 capas de recubrimiento. Este efecto se atribuyó a la mayor presencia de grupos silano lo que propicia un mejor balance hidrofóbico e hidrofílico, pero sin llegar a ser el mejor resultado de captación de los sistemas propuestos. En la **Figura 66** también se muestra el resultado presentado al aplicar 3 capas de recubrimiento de trimetoxi(proplil)silano, para tener un comparativo al variar el grupo silano de 8 a 3 átomos de carbono. Este ejemplo exhibe valores de captación de agua similares a los reportados al aplicar una capa de trietoxi(octil)silano bajo el mismo arreglo de espinas. Este resultado resalta el efecto de la cadena hidrocarbonada, en donde cadenas pequeñas de 3 átomos de carbono, no cubren adecuadamente la superficie usando 3 capas, ya que su desempeño en captación es similar a usar 1 capa de recubrimiento con 8 átomos de carbono. En la parte derecha de la **Figura 66**, se muestra el mejor resultado reportado en la literatura de sistemas pasivos impresos en 3D y con espinas de altura mayor a 3 cm. Dicho diseño presentó el mejor resultado en comparación con otros diseños propuestos por los otros autores⁷. Como se puede observar, el diseño de espinas con perfil alar supera los niveles de captación de agua de neblina reportados en la literatura recientemente. En la figura 67 se tiene muestran las superficies impresas en 3D con un acercamiento a una región aleatoria la cual tuene como objetivo mostrar los canales propios de la impresión vertical de los modelos

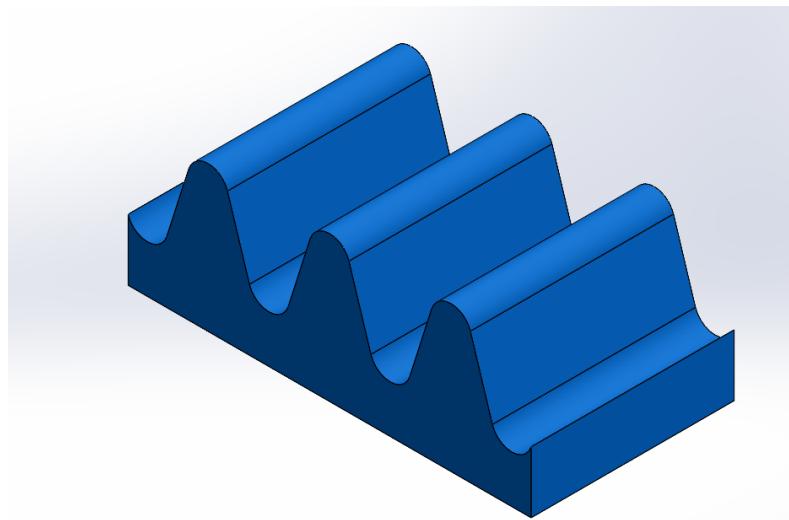


Figura 67 Superficie impresa en 3D -Patrones acanalados

En la Figura 67 se tiene una representación tridimensional de los canales formados por la impresión 3D, después de las caracterizaciones mostradas en cada uno de los capítulos anteriores se puede concluir que al momento de depositar una capa del compuesto dicha capa se ancla a la superficie aprovechando dicha rugosidad acanalada ya que no se muestra una interacción química evidente como se muestra en la siguiente figura. En este caso el anclaje del compuesto no fluorado se debe a un Hidrolisis-condensación del etoxi ya que presenta una polimerización impulsada por el agua presente en la humedad del ambiente como se muestra en la Figura 68.

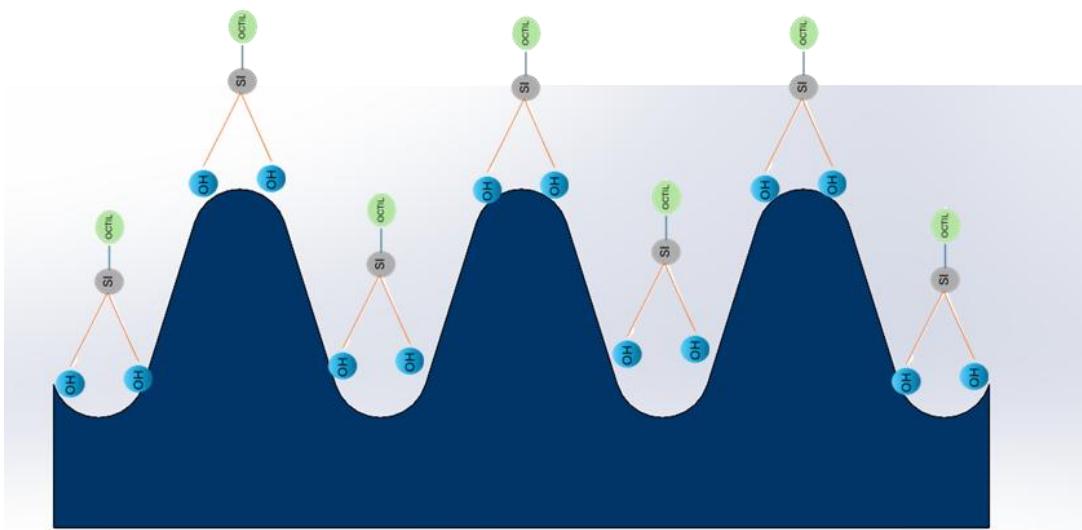


Figura 68 Anclamiento de primera capa de recubrimiento a la superficie

La Figura 68 es una representación en vista frontal de la adhesión del compuesto a la superficie de las espinas impresas en 3D. Allí se observa como el grupo hidroxilo queda anclado a la superficie polimérica, dejando expuesto el octil silano. Y por lo tanto se tendrá un aumento en la característica hidrofílica de la superficie. Los valores obtenidos de ángulo de contacto son superiores a los valores presentados de la superficie sin recubrimiento comprobando lo dicho anteriormente. Debido a que el recubrimiento no es completamente homogéneo se tendrán ciertas áreas en la superficie las cuales no se anclen por completo el compuesto.

Al adicionar una segunda capa del compuesto se tendrá que el grupo hidroxilo será en esta ocasión el que quede expuesto al ambiente ocasionando tener características hidrofílicas. Es por ello que aplicar una tercera capa es necesario para poder obtener por consiguiente una superficie con los silanos expuestos. A parte de ello debemos resaltar que debido a tratamientos térmicos aplicados entre cada aplicación de capa de recubrimiento el acanalamiento se pronuncia más como se caracterizó anteriormente y como se muestra en la figura tridimensional siguiente(Figura 69).

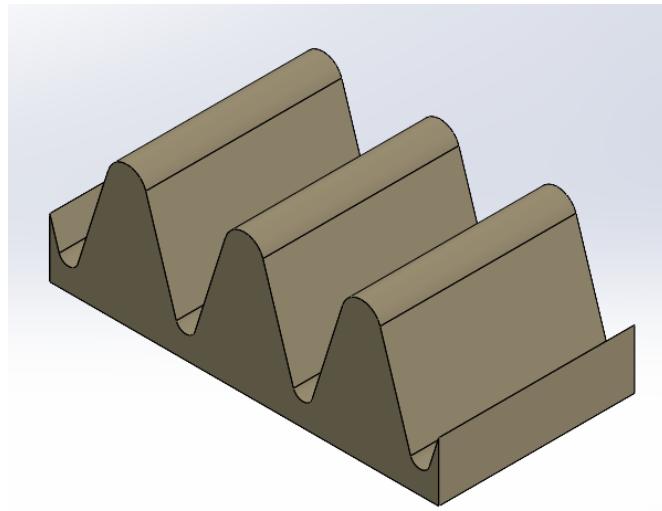


Figura 69 Rugosidad de superficie con 3 capas de recubrimiento.

Como se observa en la Figura 69 y con lo mencionado previamente se tendrá una superficie con canales más pronunciados lo que facilitara en anclamiento recubrimiento, y que a su vez el silano quedara expuesto atribuyendo propiedades hidrofílicas .

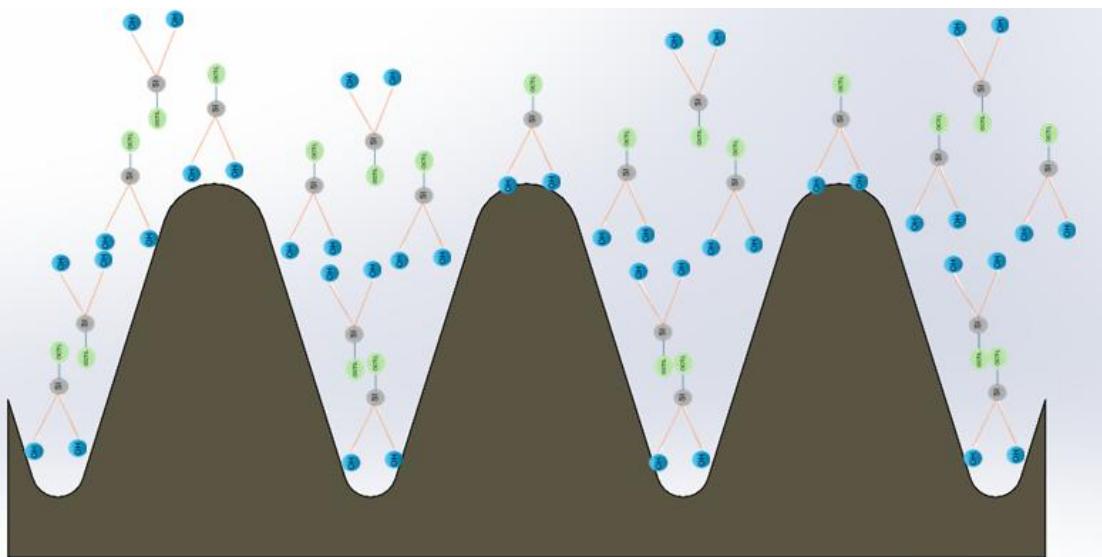


Figura 70 Anclamiento de el compuesto a la superficie con tres capas de recubrimiento

En la configuración con 3 capas de recubrimiento y por consiguiente 4 tratamientos térmicos, se observó cómo se disminuye el ángulo de contacto. Cabe resaltar que capa tras capa el octil silano del compuesto se une a la cadena de la siguiente capa a través de interacciones de van der Walls. Como se dijo anteriormente capa tras capa se va adicionando compuesto obteniendo un recubrimiento más uniforme a lo largo de la espina. Pero en ocasiones y debido a que se satura la superficie quedaran expuesto en regiones el grupo hidroxilo y en otras el octil. Al recubrir con tres capas se obtienen dichos patrones , con una mayor presencia del octil silano, y es por ello que se tiene una mayor presencia de este compuesto obteniendo los resultados de porcentaje mostrados en las caracterizaciones, dando propiedades hidrofílicas a la superficie pero con un ángulo de contacto cercano al límite de lo hidrofóbico(Figura 70). En esta configuración se tiene una rugosidad y un recubrimiento ideal para obtener una alta captación de agua presente en el ambiente.

La figura 71 muestra una geometría 3D de la superficie recubierta con cinco capas de recubrimiento. La cual adquiere canales menos pronunciados debido a la incorporación de capas a ella y a los tratamientos térmicos sometida capa tras capa.

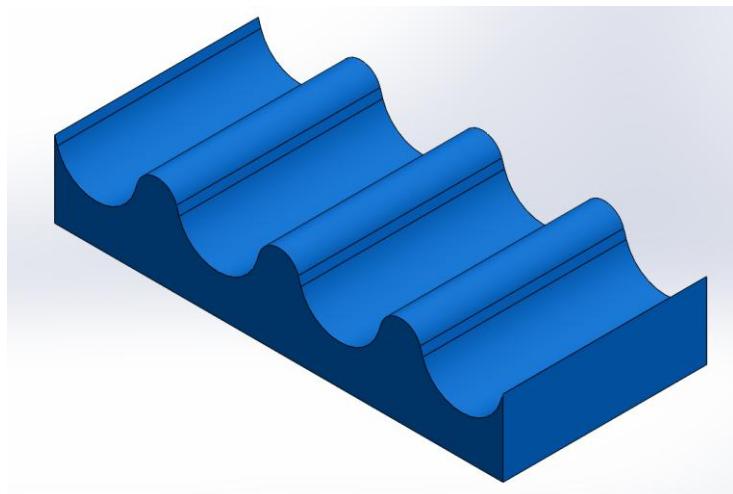


Figura 71 Rugosidad de supercice con 5 capas de recubrimiento.

En dicha superficie el anclaje sucede tal cual como se explicó en las configuraciones anteriores. Pero en esta superficie obtendremos más expuesto nuestro recubrimiento más superficial como se muestra en la Figura 72.

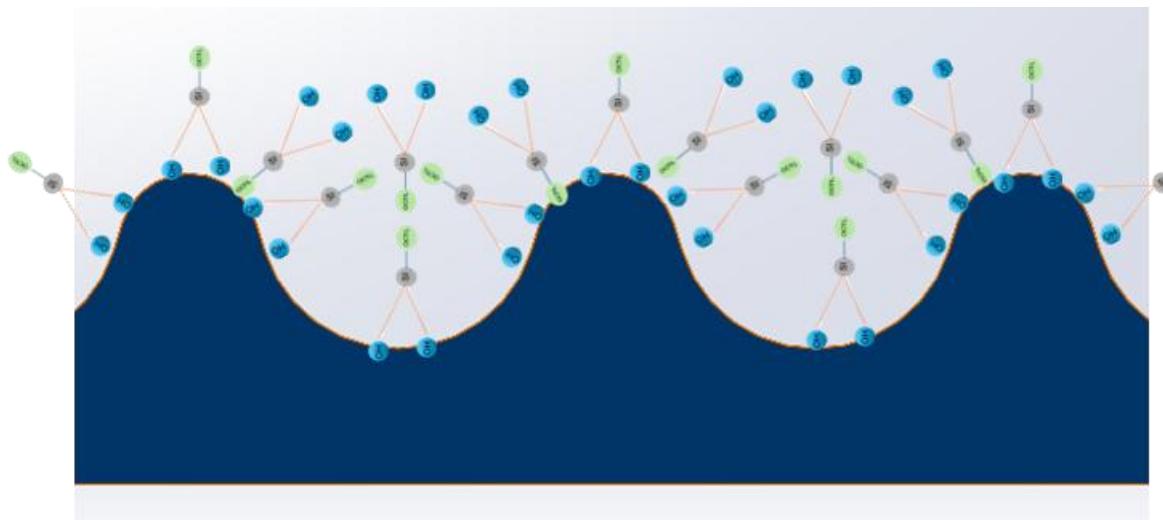


Figura 72 Anclamiento de el compuesto a la superficie con cinco capas de recubrimiento

La Figura 72 es un diagrama de cómo se ancla el recubrimiento a la superficie con cinco capas de recubrimiento. En esta configuración se deben analizar varios factores los cuales dieron los resultados observados en cada una de las caracterizaciones estudiadas anteriormente. Observamos como en esta ocasión el grupo hidroxilo es el que mayormente queda expuesto por lo que debido a ello se tiene un carácter hidrofílico mostrado en el ángulo de contacto. Aunque debería tener una mayor exposición del silano en esta ocasión se tiene una superficie menos acanalada, en donde los silanos quedan expuestos por completo al tratamiento térmico llevado a cabo capa tras capa, ocasionando que se evaporen, y es por esto que se tiene en cinco capas una menor cantidad de silanos como se mostró en los resultados de la caracterización correspondiente. Debido a un acanalamiento menos pronunciado y como se muestra en AFM canales distorsionados, y si le adicionamos una saturación en la superficie la cual ocasiona la no adhesión de las siguientes capas, se obtuvieron valores bajos de captación de esta configuración.

Como se muestra en la **Figura 73** para llegar a un valor alto de captación se tomaron en cuenta distintas variables como lo son: a) una diseño geométricamente propicio para aumentar la captación; b) una impresión 3D con un grosor de capa de 25 μm el cual garantiza la geometría previamente diseñada y genera una rugosidad intrínseca de impresión en forma de canales los cuales son propicios para el transporte de las gotas; c) un lavado, curado y post-curado de la pieza, y d) finalmente un recubrimiento de un silano no fluorado por “spray coating” sobre la superficie con su correspondiente tratamiento térmico variando el número de capas de depositadas hasta llegar a 5 capas. Cada uno de los procesos mencionados anteriormente confirma que a partir de ellos y al recubrir exactamente con 3 capas la geometría por revolución, se generara una morfología acanalada a partir de los tratamientos térmicos realizados entre capa y capa demostrado por AFM con una mayor presencia de grupos silano (SEM). Estos factores son los causantes de un balance hidrofóbico - hidrofílico mostrado en la caracterización del ángulo de contacto, donde consecuentemente este balance y

rugosidad es la explicación para obtener una mayor captación, flujo y posterior almacenamiento de agua proveniente de la neblina.

Capítulo 5

Conclusiones

- Para lograr un sistema pasivo eficiente de captación de agua presente en la neblina a través de la impresión 3D, se deben tener en cuenta una serie de variables las cuales con una buena combinación dará los resultados buscados.

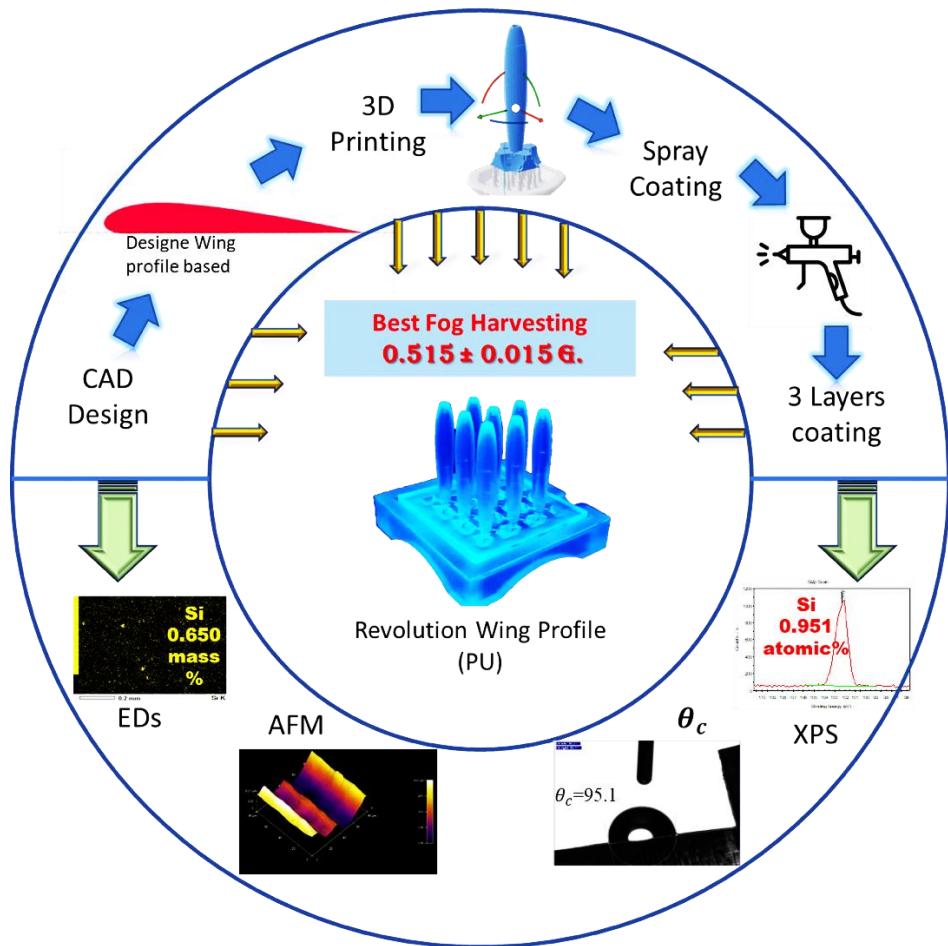


Figura 73. Desarrollo de un sistema pasivo de captación de agua de neblina eficiente

Por todo lo dicho anteriormente se concluye que para lograr un valor de captación agua de neblina de **0.52 ± 0.015 g** a través de impresión 3D se deben diseñar modelos de espinas por revolución basada en el perfil alas USA 49, ubicados en

arreglos de tres por tres en una base optimizada con conductos tanto internos como externos, y recubiertos a través de “Spray Coating” con 3 capas de trietoxi(octil) silano.

- La exposición de superficies impresas en 3D por microestreolitografía a tratamientos térmicos repetitivos, ocasionan que en un principio dicha superficie tenga una refinamiento de los canales (mayor demarcación de las crestas y valles), pero que después de 3 o 4 tratamientos térmicos dichos canales se distorsionen presentando canales con valles más anchos y crestas menos pronunciadas.
- Al aplicar por spray coating trietoxi octil silano a superficies impresas en 3D usando resina comercial, da como resultado un recubrimiento uniforme el cual se ancla físicamente en sus primeras capas a la superficie impresa. Los grupos etoxi polimerizan vía hidrólisis-condensación debido al agua presente en la humedad del ambiente sobre la superficie del impreso, teniendo una mejor adhesión de las 3 primeras capas.
- El carácter hidrofílico-hidrofóbico de las superficies recubiertas dependerá principalmente de la adhesión del recubrimiento de trietoxisilano. En la primera capa, se propone que en la mayoría de los casos los grupos etoxi se anclen a la superficie, quedando expuesto el grupo propil (el cual es hidrofóbico). En la segunda capa, los grupos propilo expuestos interaccionan preferentemente con los mismos grupos propilo del recubrimiento, quedando expuestos los grupos trietoxi (los cuales son hidrofílicos), produciendo una superficie menos hidrofóbica que la observada en durante el primer recubrimiento. Este procedimiento se repite hasta la tercera capa, en donde se obtiene un nivel óptimo de ángulo de contacto. Después de 3 capas de recubrimiento, la cobertura incrementa de espesor, pero durante el tratamiento térmico, según los experimentos, se observa que la propiedad hidrofóbica disminuye, así como decrementa la concentración de grupos silicio. Por tal motivo, se especula que

durante el tratamiento térmico se pierde parte de este recubrimiento, lo cual es consistente con la perdida de grupos silicio.

- La captación obtenida por el arreglo por revolución con 3 capas de recubrimiento es el resultado de una superficie la cual se ancló a ella una cantidad apropiada de propiltrietoxisilano, dejando expuestos grupos funcionales propilo, los cuales le confirieron un carácter hidrofóbico e hidrofílico (en ciertas zonas no recubiertas, o en donde quedó expuesto el grupo etoxi). Sumado a la presencia de canales pronunciados de forma senoidal, crean una combinación ideal para la captación, nucleación de la gota y su posterior transporte a lo largo del cuerpo de la espina, logrando con ello niveles de captación agua de neblina de **0.52 ± 0.015 g**

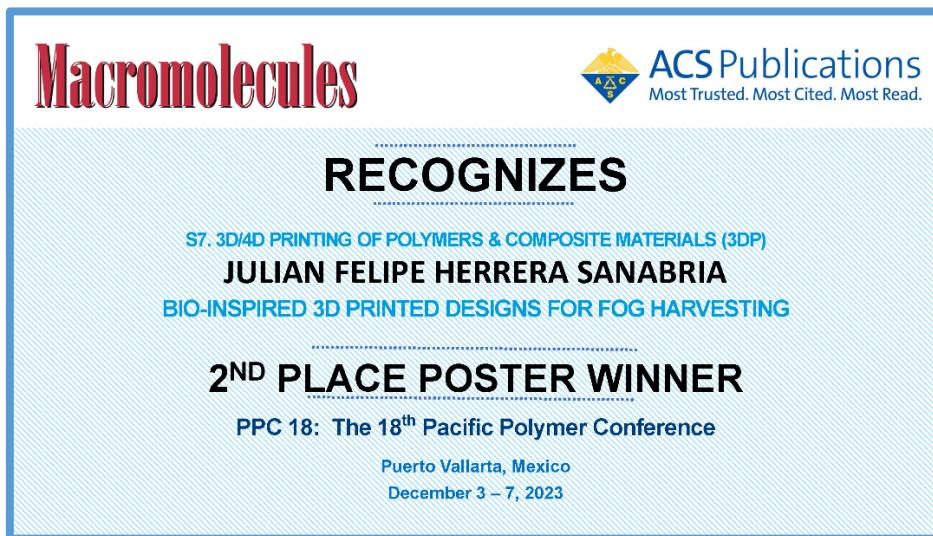
Capítulo 6

Trabajo futuro

- Extrapolar el mejor diseño de captación desarrollado en este trabajo de tesis a un sistema en condiciones reales para validar la eficiencia en un entorno real.
- Realizar un análisis de experimentos estadístico variando cada uno de los aspectos y adicionando nuevos parámetros de diseño, impresión y recubrimiento.
- Acomodar las espinas estudiadas en arreglos de distintos tipos, como por ejemplo en una base cónica, cilíndrica o bio inspirada en la forma del tallo de los diferentes tipos de cactus.
- Optimizar el método de impresión 3D a partir de un mejor acomodo de las estructuras diseñadas y de la variación de los factores de impresión, teniendo como resultado la reducción considerable en tiempo y material.

Capítulo 7

Logros académicos



Reconocimiento en sesión de posters recibido en el Pacific Polymer Conference (PPC-18) en 2023.



Participación en diversas actividades de divulgación

Bibliografía

- (1) Qadir, M.; Jiménez, G. C.; Farnum, R. L.; Dodson, L. L.; Smakhtin, V. Fog Water Collection: Challenges beyond Technology. *Water (Switzerland)* **2018**, *10* (4), 1–10. <https://doi.org/10.3390/w10040372>.
- (2) Fessehaye, M.; Abdul-Wahab, S. A.; Savage, M. J.; Kohler, T.; Gherezghiher, T.; Hurni, H. Fog-Water Collection for Community Use. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd 2014, pp 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.063>.
- (3) Alexandra, G.; Álvarez, H. La Interacción Astrocito-Biomaterial Empleado Como Andamio En Regeneración de Sistema Nervioso . Propuesta de Un Modelo Fisicoquímico de La Interacción Astrocito-Biomaterial Empleado Como Andamio En Regeneración de Sistema Nervioso . **2022**.
- (4) Frick, K. D.; Baltussen, R.; Resnikoff, S.; Smith, A. W. *The Global Water Supply and Sanitation Assessment 2000 Report*; A custom publication of the Disease Control Priorities Project, 229., 2006.
- (5) Tomaszkiewicz, M.; Abou Najm, M.; Beysens, D.; Alameddine, I.; Bou Zeid, E.; El-Fadel, M. Projected Climate Change Impacts upon Dew Yield in the Mediterranean Basin. *Sci. Total Environ.* **2016**, *566–567*, 1339–1348. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2016.05.195>.
- (6) Ingeniera, U. N. A. B.; Favret, E. A. La Naturaleza, Una Brillante Ingeniera En Desarrollos Tecnológicos Innovativos. **2000**.
- (7) Liu, L.; Liu, S.; Schelp, M.; Chen, X. Rapid 3D Printing of Bioinspired Hybrid Structures for High-Efficiency Fog Collection and Water Transportation. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2021**, *13* (24), 29122–29129. <https://doi.org/10.1021/acsami.1c05745>.
- (8) Pascual, J.; Naranjo, M.; Payano, R.; Medrano, O. Tecnología Para La Recolección de Agua de Niebla. *IV Simp. Int. Tecnohistoria* **2011**, No. May 2014, 1–20. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4806.7048>.
- (9) Rodríguez, T. F. Producción y Caracterización de Materiales Biobasados Mediante Impresión 3D. **2022**.
- (10) Abdulhussein, A. T.; Kannarpady, G. K.; Wright, A. B.; Ghosh, A.; Biris, A. S. Current Trend in Fabrication of Complex Morphologically Tunable Superhydrophobic Nano Scale Surfaces. *Appl. Surf. Sci.* **2016**, *384*, 311–332. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.04.186>.
- (11) Zhai, L.; Berg, M. C.; Cebeci, F. Ç.; Kim, Y.; Milwid, J. M.; Rubner, M. F.; Cohen, R. E. Patterned Superhydrophobic Surfaces: Toward a Synthetic Mimic

- of the Namib Desert Beetle. *Nano Lett.* **2006**, *6* (6), 1213–1217. <https://doi.org/10.1021/nl060644q>.
- (12) Reinhardt, D.; Pesce, E.-R.; Stieger, P.; Mandel, T.; Baltensperger, K.; Bennett, M.; Traas, J.; Friml, J.; Kuhlemeier, C. Regulation of Phyllotaxis by Polar Auxin Transport. *Nature* **2003**, *426* (6964), 255–260. <https://doi.org/10.1038/nature02081>.
- (13) Malik, T.; Gethin, D.; Boy, F.; Davies, G.; Parker, A. Re-Engineering Dew-Harvesting Cactus Macrostructures to Enhance Water Collection as an Adaptive Climate Change Strategy: An Experimental Comparison. *Atmosphere (Basel)*. **2023**, *14* (12). <https://doi.org/10.3390/atmos14121736>.
- (14) Bai, H.; Zhao, T.; Wang, X.; Wu, Y.; Li, K.; Yu, C.; Jiang, L.; Cao, M. Cactus Kirigami for Efficient Fog Harvesting: Simplifying a 3D Cactus into 2D Paper Art. *J. Mater. Chem. A* **2020**, *8* (27), 13452–13458. <https://doi.org/10.1039/d0ta01204a>.
- (15) Itzel, A.; Flores, L.; Flores, A. G.; José, R.; Vilchis, S.; Hugo, V.; Rizo, T.; Iniesta, D. J. Efecto En La Microdureza de Resinas Compuestas Aplicando Un Recubrimiento de Nanopartículas de Plata Inmersas En Un Adhesivo Hidrofílico. **2019**, *23*, 233–239.
- (16) Nobel, P. S. *Environmental Biology of Agaves and Cacti*; Cambridge University Press, 2003.
- (17) Ganiele, M. J.; Ponzoni, L.; Montenegro, S.; Nicoletti, P.; Lingeri, S. D.; Villanueva, A.; Anello, D. Perfiles de Microaerogeneradores HAWT a Bajo Número de REYNOLDS (Low REYNOLDS Number Airfoils for Small Horizontal Axis Wind Turbine). **2021**, *33*–51.
- (18) Gaxiola-López, J. C.; Lara-Ceniceros, T. E.; Silva-Vidaurre, L. G.; Advincula, R. C.; Bonilla-Cruz, J. 3D Printed Parahydrophobic Surfaces as Multireaction Platforms. *Langmuir* **2022**, *38* (25), 7740–7749. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.2c00788>.
- (19) Wenzel, R. N. Resistance of Solid Surfaces to Wetting by Water. *Ind. & Eng. Chem.* **1936**, *28* (8), 988–994.
- (20) Cassie, A. B. D.; Baxter, S. Wettability of Porous Surfaces. *Trans. Faraday Soc.* **1944**, *40* (0), 546–551. <https://doi.org/10.1039/TF9444000546>.
- (21) Gao, L.; McCarthy, T. J.; Zhang, X. Wetting and Superhydrophobicity. *Langmuir* **2009**, *25* (24), 14100–14104. <https://doi.org/10.1021/la903043a>.
- (22) Teisala, H.; Tuominen, M.; Aromaa, M.; Stepien, M.; Mäkelä, J. M.; Saarinen, J. J.; Toivakka, M.; Kuusipalo, J. Nanostructures Increase Water Droplet Adhesion on Hierarchically Rough Superhydrophobic Surfaces. *Langmuir* **2012**, *28* (6), 3138–3145. <https://doi.org/10.1021/la203155d>.
- (23) Commentary, G. De Fi Nitions for Hydrophilicity, Hydrophobicity, and Superhydrophobicity: Getting the Basics Right. **2014**, 686–688.

- (24) Lößlein, S. M.; Merz, R.; Müller, D. W.; Kopnarski, M.; Mücklich, F. An In-Depth Evaluation of Sample and Measurement Induced Influences on Static Contact Angle Measurements. *Sci. Rep.* **2022**, *12* (1), 1–16. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-23341-3>.
- (25) Exstrand, C. W. Contact Angles and Hysteresis on Surfaces with Chemically Heterogeneous Islands. *Langmuir* **2003**, *19* (9), 3793–3796. <https://doi.org/10.1021/la0268350>.
- (26) Gao, L.; McCarthy, T. J. Contact Angle Hysteresis Explained. *Langmuir* **2006**, *22* (14), 6234–6237. <https://doi.org/10.1021/la060254j>.
- (27) Liu, X.; Beysens, D.; Bourouina, T. Water Harvesting from Air: Current Passive Approaches and Outlook. *ACS Mater. Lett.* **2022**, *4* (5), 1003–1024. <https://doi.org/10.1021/acsmaterialslett.1c00850>.
- (28) Beysens, D. Dew Water. *Dew Water*. 2018, pp 1–370. <https://doi.org/10.1201/9781003337898>.
- (29) Jin, Y.; Zhang, L.; Wang, P. Atmospheric Water Harvesting: Role of Surface Wettability and Edge Effect. *Glob. Challenges* **2017**, *1* (4). <https://doi.org/10.1002/gch2.201700019>.
- (30) Hou, Y.; Shang, Y.; Yu, M.; Feng, C.; Yu, H.; Yao, S. Tunable Water Harvesting Surfaces Consisting of Biphasic Nanoscale Topography. *ACS Nano* **2018**, *12* (11), 11022–11030. <https://doi.org/10.1021/acsnano.8b05163>.
- (31) Medici, M.-G.; Mongruel, A.; Royon, L.; Beysens, D. Edge Effects on Water Droplet Condensation. *Phys. Rev. E* **2014**, *90* (6), 62403. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.90.062403>.
- (32) Malik, F. T.; Clement, R. M.; Gethin, D. T.; Kiernan, M.; Goral, T.; Griffiths, P.; Beynon, D.; Parker, A. R. Hierarchical Structures of Cactus Spines That Aid in the Directional Movement of Dew Droplets. *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* **2016**, *374* (2073). <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0110>.
- (33) Bico, J.; Thiele, U.; Quéré, D. Wetting of Textured Surfaces. *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* **2002**, *206* (1–3), 41–46. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(02\)00061-4](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(02)00061-4).
- (34) Park, K. C.; Chhatre, S. S.; Srinivasan, S.; Cohen, R. E.; McKinley, G. H. Optimal Design of Permeable Fiber Network Structures for Fog Harvesting. *Langmuir* **2013**, *29* (43), 13269–13277. <https://doi.org/10.1021/la402409f>.
- (35) Tang, X.; Guo, Z. Biomimetic Fog Collection and Its Influencing Factors. *New J. Chem.* **2020**, *44* (47), 20495–20519. <https://doi.org/10.1039/D0NJ04632A>.
- (36) Kim, S.; Kim, D.; Kim, J.; An, S.; Jhe, W. Direct Evidence for Curvature-Dependent Surface Tension in Capillary Condensation: Kelvin Equation at Molecular Scale. *Phys. Rev. X* **2018**, *8* (4), 41046. <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.8.041046>.

- (37) Fisher, L. R.; Gamble, R. A.; Middlehurst, J. The Kelvin Equation and the Capillary Condensation of Water. *Nature* **1981**, *290* (5807), 575–576. <https://doi.org/10.1038/290575a0>.
- (38) Kim, S.; Kim, D.; Kim, J.; An, S.; Jhe, W. Direct Evidence for Curvature-Dependent Surface Tension in Capillary Condensation: Kelvin Equation at Molecular Scale. *Phys. Rev. X* **2018**, *8* (4), 41046. <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.8.041046>.
- (39) Klemm, O.; Schemenauer, R. S.; Lummerich, A.; Cereceda, P.; Marzol, V.; Corell, D.; Heerden, J. Van; Reinhard, D.; Gherezghiher, T.; Olivier, J.; Osse, P.; Sarsour, J.; Frost, E. Fog as a Fresh-Water Resource : Overview and Perspectives. **2012**, *1998*, 221–234. <https://doi.org/10.1007/s13280-012-0247-8>.
- (40) Potter, C. Measurements of Fog Water Interception by Shrubs on the California Central Coast. *J. Coast. Conserv.* **2016**, *20* (4), 315–325. <https://doi.org/10.1007/s11852-016-0443-y>.
- (41) Malik, F. T.; Clement, R. M.; Gethin, D. T.; Krawszik, W.; Parker, A. R. Nature's Moisture Harvesters: A Comparative Review. *Bioinspiration and Biomimetics* **2014**, *9* (3). <https://doi.org/10.1088/1748-3182/9/3/031002>.
- (42) Qadir, M.; Jiménez, G. C.; Farnum, R. L.; Trautwein, P. Research History and Functional Systems of Fog Water Harvesting. *Front. Water* **2021**, *3* (April), 1–11. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.675269>.
- (43) Knapczyk-Korczak, J.; Szewczyk, P. K.; Ura, D. P.; Berent, K.; Stachewicz, U. Hydrophilic Nanofibers in Fog Collectors for Increased Water Harvesting Efficiency. *RSC Adv.* **2020**, *10* (38), 22335–22342. <https://doi.org/10.1039/d0ra03939j>.
- (44) Li, J.; Ran, R.; Wang, H.; Wang, Y.; Chen, Y.; Niu, S.; Arratia, P. E.; Yang, S. Aerodynamics-Assisted, Efficient and Scalable Kirigami Fog Collectors. *Nature Communications*. 2021. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25764-4>.
- (45) Zhou, X.; Lu, H.; Zhao, F.; Yu, G. Atmospheric Water Harvesting: A Review of Material and Structural Designs. *ACS Materials Letters*. 2020, pp 671–684. <https://doi.org/10.1021/acsmaterialslett.0c00130>.
- (46) Zhang, L.; Wu, J.; Hedhili, M. N.; Yang, X.; Wang, P. Inkjet Printing for Direct Micropatterning of a Superhydrophobic Surface: Toward Biomimetic Fog Harvesting Surfaces. *J. Mater. Chem. A* **2015**, *3* (6), 2844–2852. <https://doi.org/10.1039/C4TA05862C>.
- (47) Wang, Y.; Wang, X.; Lai, C.; Hu, H.; Kong, Y.; Fei, B.; Xin, J. H. Biomimetic Water-Collecting Fabric with Light-Induced Superhydrophilic Bumps. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2016**, *8* (5), 2950–2960. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b08941>.
- (48) Korkmaz, S.; Kariper, İ. A. Fog Harvesting against Water Shortage. *Environ.*

- Chem. Lett.* **2020**, 18 (2), 361–375. <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00950-5>.
- (49) Pei, W.; Li, J.; Guo, Z.; Liu, Y.; Gao, C.; Zhong, L.; Wang, S.; Hou, Y.; Zheng, Y. Excellent Fog Harvesting Performance of Liquid-Infused Nano-Textured 3D Frame. *Chem. Eng. J.* **2021**, 409, 128180. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.128180>.
- (50) Wang, M.; Sun, T.; Wan, D.; Dai, M.; Ling, S.; Wang, J.; Liu, Y.; Fang, Y.; Xu, S.; Yeo, J.; Yu, H.; Liu, S.; Wang, Q.; Li, J.; Yang, Y.; Fan, Z.; Chen, W. Solar-Powered Nanostructured Biopolymer Hygroscopic Aerogels for Atmospheric Water Harvesting. *Nano Energy* **2021**, 80, 105569. <https://doi.org/10.1016/J.NANOEN.2020.105569>.
- (51) Yang, H.-C.; Xie, Y.; Hou, J.; Cheetham, A. K.; Chen, V.; Darling, S. B. Janus Membranes: Creating Asymmetry for Energy Efficiency. *Adv. Mater.* **2018**, 30 (43), 1801495. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/adma.201801495>.
- (52) Zhang, K.; Chen, H.; Ran, T.; Zhang, L.; Zhang, Y.; Chen, D.; Wang, Y.; Guo, Y.; Liu, G. High-Efficient Fog Harvest from a Synergistic Effect of Coupling Hierarchical Structures. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2022**, 14 (29), 33993–34001. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c06803>.
- (53) Song, Y. Y.; Yu, Z. P.; Dong, L. M.; Zhu, M. L.; Ye, Z. C.; Shi, Y. J.; Liu, Y. Cactus-Inspired Janus Membrane with a Conical Array of Wettability Gradient for Efficient Fog Collection. *Langmuir* **2021**, 37 (46), 13703–13711. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.1c02368>.
- (54) Ligon, S. C.; Liska, R.; Stampfl, J.; Gurr, M.; Mülhaupt, R. Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing. *Chem. Rev.* **2017**, 117 (15), 10212–10290. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00074>.
- (55) Choi, Y.; Baek, K.; So, H. 3D-Printing-Assisted Fabrication of Hierarchically Structured Biomimetic Surfaces with Dual-Wettability for Water Harvesting. *Sci. Rep.* **2023**, 13 (1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37461-x>.
- (56) Chen, W.; Liu, P.; Zheng, F.; Shi, J. Study on the Enhancing Water Collection Efficiency of Cactus- and Beetle-like Biomimetic Structure Using UV-Induced Controllable Diffusion Method and 3D Printing Technology. **2021**, 14769–14776. <https://doi.org/10.1039/d1ra00652e>.
- (57) Zhu, P.; Yu, Z.; Sun, H.; Zheng, D.; Zheng, Y.; Qian, Y.; Wei, Y.; Lee, J.; Srebnik, S.; Chen, W.; Chen, G.; Jiang, F. 3D Printed Cellulose Nanofiber Aerogel Scaffold with Hierarchical Porous Structures for Fast Solar-Driven Atmospheric Water Harvesting. *Adv. Mater.* **2024**, 36 (1), 2306653. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/adma.202306653>.
- (58) Li, X.; Yang, Y.; Liu, L.; Chen, Y.; Chu, M.; Sun, H.; Shan, W.; Chen, Y. 3D-Printed Cactus-Inspired Spine Structures for Highly Efficient Water Collection. *Adv. Mater. Interfaces* **2020**, 7 (3). <https://doi.org/10.1002/admi.201901752>.

- (59) Gibson, I.; Rosen, D. W.; Stucker, B.; Khorasani, M.; Rosen, D.; Stucker, B.; Khorasani, M. *Additive Manufacturing Technologies*; Springer, 2021; Vol. 17.
- (60) Wang, X.; Cai, X.; Guo, Q.; Zhang, T.; Kobe, B.; Yang, J. I3DP{,} a Robust 3D Printing Approach Enabling Genetic Post-Printing Surface Modification. *Chem. Commun.* **2013**, 49 (86), 10064–10066. <https://doi.org/10.1039/C3CC45817B>.
- (61) Barraza, B.; Olate-Moya, F.; Montecinos, G.; Ortega, J. H.; Rosenkranz, A.; Tamburrino, A.; Palza, H. Superhydrophobic SLA 3D Printed Materials Modified with Nanoparticles Biomimicking the Hierarchical Structure of a Rice Leaf. *Sci. Technol. Adv. Mater.* **2022**, 23 (1), 300–321. <https://doi.org/10.1080/14686996.2022.2063035>.
- (62) Li, Y.; Mao, H.; Hu, P.; Hermes, M.; Lim, H.; Yoon, J.; Luhar, M.; Chen, Y.; Wu, W. Bioinspired Functional Surfaces Enabled by Multiscale Stereolithography. *Adv. Mater. Technol.* **2019**, 4 (5), 1800638. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/admt.201800638>.
- (63) De, U.; De, N. Y. Proyecto Fin de Grado Análisis Aerodinámico de Perfiles Alares En Forma de Diamante En Régimen Supersónico Mediante CFD Aerodynamic Analyses of Diamond Shape Air-. **2020**.
- (64) Fernando, A.; Córdoba, L.; Centro, S.; Tecnológico, D. D. APPLICATION OF NANO COATINGS ON.
- (65) Hernández Velázquez, E.; Martínez Toto, D. G.; Navarro Rojero, M. G. Evaluación de Procesos de Aplicación de Segunda Capa Para Mejorar La Resistencia Al Tallado de Un Recubrimiento Polimérico Base Agua Aplicado a Sustratos Vítricos. *Rev. Ciencias Tecnológicas* **2022**, 5 (4), 339–362. <https://doi.org/10.37636/recit.v54339362>.
- (66) Kunst, S. R.; Matos, J. F.; Korb, M. A.; Malfatti, C. F. Obtención y Caracterización de Revestimientos Protectores a Base de Silanos Para La Protección de Aceros Galvanizados. *Inf. Tecnol.* **2011**, 22 (5), 67–76. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642011000500009>.
- (67) Tobon Sosa, C. A.; others. Evaluación de Una Película de Silano Como Pretratamiento En Un Recubrimiento Hélico, 2018.
- (68) Kim, H.; Han, H.; Lee, S.; Woo, J.; Seo, J.; Lee, T. Nonfluorinated Superomniphobic Surfaces through Shape-Tunable Mushroom-like Polymeric Micropillar Arrays. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2019**, 11 (5), 5484–5491. <https://doi.org/10.1021/acsami.8b17181>.
- (69) Song, J.; Huang, L.; Zhao, C.; Wu, S.; Liu, H.; Lu, Y.; Deng, X.; Carmalt, C. J.; Parkin, I. P.; Sun, Y. Robust Superhydrophobic Conical Pillars from Syringe Needle Shape to Straight Conical Pillar Shape for Droplet Pancake Bouncing. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2019**, 11 (48), 45345–45353. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b16509>.
- (70) Ang, A. S. M.; Berndt, C. C. A Review of Testing Methods for Thermal Spray

- Coatings. *Int. Mater. Rev.* **2014**, *59* (4), 179–223.
<https://doi.org/10.1179/1743280414Y.0000000029>.
- (71) Davis, A.; Yeong, Y. H.; Steele, A.; Bayer, I. S.; Loth, E. Superhydrophobic Nanocomposite Surface Topography and Ice Adhesion. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2014**, *6* (12), 9272–9279. <https://doi.org/10.1021/am501640h>.
- (72) Mahadik, S. A.; Pedraza, F.; Mahadik, S. S. Comparative Studies on Water Repellent Coatings Prepared by Spin Coating and Spray Coating Methods. *Prog. Org. Coatings* **2017**, *104*, 217–222.
<https://doi.org/10.1016/J.PORGCOAT.2016.11.006>.