

Modelamiento de la superficie de la hoja Pistia stratiotes para el desarrollo de recubrimientos hidrofóbicos bioinspirados.

Paula Nicoll Tarazona Zambrano, Vivian Paola Arrieta Williams

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Bucaramanga

2022

Modelamiento de la superficie de la hoja Pistia Stratiotes para el desarrollo de recubrimientos hidrofóbicos bioinspirados.

Paula Nicoll Tarazona Zambrano, Vivian Paola Arrieta Williams

Trabajo de grado: proyecto de investigación para optar al título de Ingenieras Metalúrgicas

Director

Sergio Ismael Blanco Vásquez

Doctor en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Bucaramanga

2022

Dedicatoria

Agradezco a Dios, a mis padres Bronis y Rosalba y al amor de mi ahora Edilson

por su acompañamiento, motivación y total apoyo.

A mi hermano Bronis por ser mis buenos y mis malos días,

pero sobre todo por ser mi compañía.

A mis profesores, de cada uno me llevo no sólo

su conocimiento sino también esas características

que los hacen tan peculiarmente humanos y particularmente ellos.

A mi gran amigo Elio, un faro entre tanta incertidumbre.

*A mis bellas y maravillosas amigas, Natalia, Ángela y Ada
con quienes tengo los mejores recuerdos de mi paso por la UIS.*

A Juan, Dani y Palmita cómplices de tantas choco aventuras.

A todos mis compañeros de carrera,

en especial a los que lograron sacar lo mejor de mí.

A Kira, mi camarada de estudio nocturno, matutino y virtual,

sus ronroneos apaciguaron muchas tormentas.

A mi compañera y hermana de esta cruzada llama tesis Paula Tarazona

por soportarme en mis días buenos

y en los regulares, gracias por tú comprensión, paciencia y amor.

Por último y no menos importante, a mi director, el mejor que pude tener.

Vivian Arrieta

Dedicatoria

Este logro va dedicado a mis padres María Fernanda Zambrano y Gustavo Adolfo Rodríguez que con el cariño, ejemplo y apoyo incondicional que me han brindado a lo largo de mi vida han forjado la mujer que soy hoy en día.

*A la Señora Sofía Ballesteros que ha sido para mí una fuente de sabiduría y amor.
A mi Nonita Gladys Helena que con sus palabras y consejos ha impulsado mi caminar.
A mi tía Raquel Zambrano que con su fuerza me inspira a enfrentarme y seguir adelante.
A mi hermana María Juliana Rodríguez y mis hermosas mascotas en especial Luperka.*

*A mi gran amiga Vivian Arrieta por ofrecerme su amistad incondicional,
por enseñarme que las cosas más sencillas son las más bonitas.
A el Profesor Sergio Blanco por sus consejos y por inspirarnos con su forma de ver la vida.*

A todos los amigos que han sido parte de mi proceso, en especial a los que me han impulsado a ser mejor cada día y me han ayudado a terminar esta gran etapa de la mejor manera, Mery, Cristian, Catalina, Juan Pablo, Julián, Fabian, Daniel, David y a todos mis amigos deportistas de la selección de Ultimate Frisbee, siempre tendrán un lugar en mi corazón.

Por último, pero no menos importante a Dios, porque a pesar de las adversidades me has ayudado a cumplir diferentes metas que me he propuesto a lo largo de mi vida

Paula Nicoll Tarazona Zambrano

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro sincero agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander por acogernos durante estos 5 años de formación profesional.

A nuestro director Sergio Blanco, por sus enseñanzas, apoyo, orientación y paciencia en la realización de este proyecto.

A todos los miembros del semillero de recubrimientos multifuncionales.

Al laboratorio de Microscopia Electrónica y su microscopista por su colaboración en las tomas de micrográficas.

A todos los integrantes de la escuela de Ingeniería metalúrgica por sus conocimientos, enseñanzas y buenos valores.

Tabla de contenido

1. Introducción..... 12

2. Objetivos..... 14

 2.1 Objetivo General..... 14

 2.2 Objetivos Específicos 14

3. Fundamentación Teórica 15

 3.1 Pistia stratiotes 15

 3.2 Modelos matemáticos que describen la hidrofobicidad 16

 3.2.1 Wenzel: 16

 3.2.2 Cassie-Baxter: 17

 3.3 Materiales Bioinspirados 19

 3.4 Recubrimientos superhidrofóbicos 20

4. Metodología..... 20

 4.1 Revisión bibliográfica..... 21

 4.2 Análisis de los modelos matemáticos 21

 4.3 Caracterización superficial de la Pistia stratiotes 21

 4.4 Análisis de las imágenes SEM..... 22

 4.5 Adaptación de las fórmulas de hidrofobicidad 22

 4.6 Validación de la superficie simulada con datos experimentales tomados
anteriormente. 23

| | |
|--|----|
| MODELAMIENTO DE SUPERFICIES BIOINSPIRADAS | 7 |
| 5 Discusión y resultados..... | 24 |
| 5.1 Limitaciones de la ecuación Wenzel y Cassie-Baxter..... | 24 |
| 5.1.1 Wenzel..... | 24 |
| 5.1.2 Cassie- Baxter..... | 25 |
| 5.2 Adaptación de los modelos para diferentes geometrías superficiales | 25 |
| 5.3 Caracterización de la superficie de la Pistia stratiotes..... | 27 |
| 5.4 Ecuación para la Pistia stratiotes | 30 |
| 5.4.1 Ecuación de Wenzel para la Pistia stratiotes | 30 |
| 5.4.2 Ecuación de Cassie-Baxter para la Pistia stratiotes | 32 |
| 5.4.3 Tensiones superficiales..... | 33 |
| 5.5 Validación de la ecuación para la Pistia stratiotes con datos experimentales | 35 |
| 5.5.1 Fuerzas en una gota de agua | 35 |
| 5.5.2 Ángulos de contacto tomados experimentalmente | 36 |
| 5.6 Superficie simulada | 37 |
| 6. Conclusiones..... | 40 |
| 7. Recomendaciones | 42 |
| Bibliografía..... | 42 |

Lista de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1 Angulo de contacto Wenzel para diferentes superficies..... | 27 |
| Tabla 2 Angulo de contacto Cassie-Baxter para diferentes superficies | 26 |
| Tabla 3 Caracterización de la estructura octogonal..... | 29 |
| Tabla 4 Ángulos de contacto para la Pistia Stratiotes | 36 |
| Tabla 5 Resultados obtenidos de superficie bioinspirada en la Pistia Stratiotes | 39 |

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Pistia Stratiotes..... | 15 |
| Figura 2. Regímenes Wenzel y Cassie-Baxter | 19 |
| Figura 3. Programa Gatan Microscopy Suite | 22 |
| Figura 4 Diámetros Vs números de conos..... | 27 |
| Figura 5 Histograma de distribución de tamaños de conos | 28 |
| Figura 6. Geometría octogonal presentada por la Pistia Stratiotes..... | 29 |
| Figura 7 Limitaciones de la superficie | 32 |
| Figura 8. Fuerzas que actúan en la interfaz de la gota..... | 33 |
| Figura 9. Presiones que actúan en una gota estática..... | 36 |
| Figura 10 Superficie diseñada con patrón octogonal..... | 38 |
| Figura 11. Arreglo de conos en vista frontal | 38 |
| Figura 12. Gota sobre superficie de conos | 40 |

Resumen

Título: Modelamiento de la superficie de la hoja Pistia Stratiotes para el desarrollo de recubrimientos hidrofóbicos bioinspirados.*

Autoras: Arrieta Williams, Vivian Paola y Tarazona Zambrano, Paula Nicoll.**

Palabras Clave: Bioinspiración, hidrofobicidad, modelo matemático, recubrimiento, corrosión.

Descripción

El presente estudio se enfocó en el análisis de las ecuaciones matemáticas que describen el comportamiento de superficies hidrofóbicas, además de realizar caracterización superficial mediante SEM de la hoja de la planta Pistia stratiotes; con el fin de conocer su topografía.

De las ecuaciones matemáticas descritas por Wenzel y Cassie-Baxter se encontraron que éstas presentan limitaciones, las cuales se tuvieron en cuenta para realizar las modificaciones o adaptaciones de dichos modelos para definir matemáticamente la superficie de la Pistia, la cual presentó una configuración superficial de conos de diferentes tamaños. Adicional a esto se encontró que la hoja presenta un patrón de forma octogonal, donde un cono de tamaño mayor a 80 μm de diámetro, se encontraba rodeado de 8 conos de diferentes tamaños, generalmente menores a 80 μm .

Realizando medidas en las imágenes SEM mediante el programa Gatan Microscopy Suite (GSM) se obtuvieron los diámetros de los octágonos observados en la superficie de la hoja y además se caracterizaron los conos con el fin de conocer sus diámetros y coordenadas espaciales X Y. Finalmente se diseñó una superficie bioinspirada con los programas Geogebra y Solidworks. Se obtuvieron ángulos de contacto en el régimen de hidrofobicidad y superhidrofobicidad para las ecuaciones adaptadas de Wenzel y Cassie-Baxter respectivamente. Con esto se tiene un fundamento teórico para el posterior desarrollo de recubrimientos en pro de mitigar la corrosión de diferentes componentes en la industria.

Abstract

Title: Modeling of the Pistia Stratiotes leaf surface for the development of bioinspired hydrophobic coatings.*

Authors: Arrieta Williams, Vivian Paola y Tarazona Zambrano, Paula Nicoll.**

Keywords: Bioinspiration, hydrophobicity, mathematical model, coating, corrosion.

Description

The present study focused on the analysis of the mathematical equations that describe the behavior of hydrophobic surfaces, in addition to performing surface characterization by SEM of the Pistia stratiotes plant leaf; in order to know its topography.

From the mathematical equations described by Wenzel and Cassie-Baxter, it was found that they present limitations, which were taken into account to carry out the modifications or adaptations of said models to mathematically define the surface of the Pistia, which presented a superficial configuration of cones of different sizes. In addition to this, it was found that the leaf has an octagonal pattern, where a cone larger than 80 μm in diameter was surrounded by 8 cones of different sizes, generally smaller than 80 μm .

Carrying out measurements on the SEM images using the Gatan Microscopy Suite (GSM) program, the diameters of the octagons observed on the surface of the leaf were obtained and the cones were also characterized in order to know their diameters and X Y spatial coordinates. designed a bio-inspired surface with Geogebra and Solidworks programs. Contact angles in the hydrophobicity and superhydrophobicity regime were obtained for the adapted Wenzel and Cassie-Baxter equations, respectively. With this, there is a theoretical basis for the subsequent development of coatings in order to mitigate the corrosion of different components in the industry.

1. Introducción

La corrosión es el deterioro que sufren los materiales metálicos por la conjugación de los tres componentes principales que permiten que esta se dé, los cuales son ánodo, cátodo, y electrolito (Hernandez , 2017). A nivel industrial dicho fenómeno presenta alta relevancia, puesto que, de no ser tratada, sus afectaciones se extienden a grandes pérdidas económicas, hasta daños al medio ambiente y en el peor de los casos, puede causar la pérdida de vidas humanas (Sastri, 2015). Un estudio apoyado por NACE International calculó que el costo global de la corrosión fue de US \$ 2,5 billones en 2013, lo que equivale al 3,4% del PIB mundial (Shekari, Khan, & Ahmed, 2017).

Muchos métodos se emplean para mitigar el avance de los distintos tipos de corrosión, los más usados son protección catódica, inhibidores y recubrimientos. Éstos últimos presentan una gran versatilidad y disponibilidad. Dependiendo de la naturaleza del recubrimiento (polímero, metal, cerámico o material compuesto), éste presentará ciertas restricciones como, por ejemplo, la temperatura máxima a la que se puede usar, el pH del medio al que están expuestos y las condiciones mecánicas a las puede estar sometido. Además, a estos factores se le debe sumar la facilidad de aplicación y el costo por metro cuadrado recubierto. Por lo anterior es de suma importancia garantizar la estabilidad y la durabilidad del recubrimiento.

Un recubrimiento hidrofóbico resulta adecuado para mitigar la corrosión, ya que en comparación a otros métodos es económico y funciona como una capa protectora que evita la interacción del agua con la superficie, previniendo así la formación de un medio corrosivo. Por lo tanto, evita la acumulación de bacterias que, debido a sus actividades basadas en

metabolitos, causa biopelículas microbianas, donde sus procesos se reflejan en la degradación del material base (Yazdi, Khan, & Abbassi, 2021).

La hidrofobicidad es una propiedad que desarrollaron las plantas como método de autolimpieza y una forma de evitar que el agua pudra su follaje (Agustín Fernández Cañete, 2013). La planta más reconocida por esta habilidad es el *Nelumbo nucifera* o mejor conocido como Loto (Koch, Bhushanb , & Barth, 2008). Otra planta acuática con la misma característica es la *Pistia stratiotes* de la familia *Araceae*, o comúnmente conocida como lechuga de agua, la cual es nuestro objetivo de estudio.

Las peculiaridades que presenta la naturaleza son de gran estudio en la comunidad científica a la hora de innovar, pues qué mejor fuente de inspiración que la madre naturaleza, quien con millones de años de prueba y error ha dado resultados sorprendentes, un ejemplo, son los materiales naturales como el hueso, la madera y el nácar, los cuales poseen estructuras altamente sofisticadas con diseños jerárquicos complejos cuyas características presentan una buena combinación de propiedades mecánicas (Munch, y otros, 2008). Es por lo anterior, que los científicos replican este tipo de estructuras para crear materiales y componentes bioinspirados.

En este trabajo la *Pistia stratiotes* reveló mediante SEM que la fuente de su superhidrofobicidad, (a parte de la cera) se debe al arreglo micrométrico de conos de diferentes tamaños, distribuidos en forma octagonal alrededor de un cono principal. Haciendo el análisis de las ecuaciones de ángulo de contacto y replicando la superficie con el tamaño de los conos que más frecuencias obtuvieron, se logró modelar una superficie superhidrofóbica que podrá ser replicada en forma de recubrimiento para mitigar la problemática de la industria.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Modelar la topografía superficial de la hoja de la planta *Pistia stratiotes*, para el desarrollo de recubrimientos superhidrofóbicos bioinspirados.

2.2 Objetivos Específicos

Analizar los modelos matemáticos planteados para la evaluación de superficies hidrofóbicas.

Adaptar los modelos matemáticos a las superficies de recubrimientos bioinspirados.

Validar el modelo matemático con datos experimentales obtenidos previamente en el laboratorio.

3. Fundamentación Teórica

3.1 Pistia stratiotes

La planta *Pistia stratiotes* es la única especie del género monotípico *Pistia*. Esta planta acuática de la familia Araceae, también es el único miembro de la tribu Pistieae y se conoce comúnmente como lechuga de agua o helecho de agua (Tripathi, Kumar, , Sharma, , & Mishra, 2010). Las primeras descripciones de esta planta fueron realizadas por los antiguos egipcios y por los filósofos griegos Dioscórides y Teofrasto (Muniappan, Reddy, & Raman, 2009). Se cree que su principal origen es en África, cerca del lago Victoria, sin embargo, actualmente se encuentra en las zonas tropicales y subtropicales de todo el mundo (Naturalista, 2022).

A esta hierba se le atribuyen muchas propiedades medicinales, como ser antiséptica, antituberculosa y laxante, sus raíces son diuréticas y el sabor de las infusiones de sus hojas son amargas y picantes (Tripathi, Kumar, , Sharma, , & Mishra, 2010).

Figura 1

Pistia stratiotes



Sus hojas son gruesas, verdes y forman una roseta (ver **Figura 1**), llegan a medir 14 cm de largo y suelen tener ondulaciones (Naturalista, 2022). Entre sus propiedades llamativas, se encuentra la hidrofobicidad que presentan sus hojas, debido a sus características físico-químicas. Las hojas retienen una capa de aire relativamente gruesa entre los pelos hidrofóbicos cuando se sumergen en agua. Esto proporciona suficiente flotabilidad para evitar la inmersión a largo plazo. Aunque las hojas superhidrofóbicas retienen una capa de aire cuando se sumergen, no están diseñadas para vivir continuamente bajo el agua (Ensikat, Kuru, Neinhuis, & Barthlott, 2011).

3.2 Modelos matemáticos que describen la hidrofobicidad

En este caso revisados los modelos matemáticos de Wenzel y Cassie-Baxter teniendo en cuenta los avances y modificaciones sobre estos mismos, ya que son los más efectivos e importantes en el área. (Parvate, Dixit, & Chattopadhyay, 2020).

3.2.1 *Wenzel:*

La ecuación del régimen de humectabilidad Wenzel describe una superficie rugosa que presenta mojabilidad homogénea con una interfaz sólido-líquido (ver **Figura 2**). Wenzel en sus estudios postula que la rugosidad es una característica de la superficie, que actúa como magnificador de las propiedades hidrofóbica o hidrofílica. Lo anterior se define según la tendencia dada por la tensión de adherencia de la interfaz líquido-sólido (A) y la tensión superficial de la interfaz líquido-aire (γ_{LA}). Contemplando la rugosidad como el factor principal en la humectabilidad, se planteó la relación entre el área geométrica y el área real de la superficie (Nosonovsky & Bhushan, Roughness optimization for biomimetic superhydrophobic surfaces, 2005), que da como resultado un factor de rugosidad r :

$$r = \frac{\text{área real}}{\text{área geométrica}} \quad (1)$$

Donde el área real siempre será mayor que el área geométrica, si estas son iguales el factor de rugosidad será igual a 1 ($r=1$) indicando que la superficie es completamente lisa. La ecuación que describe este régimen se muestra a continuación (Wenzel, 1936):

$$rA = \gamma_{LA} \cos \theta \quad (2)$$

Adicional a lo mencionado anteriormente, Wenzel en su estudio relaciona que las telas con tejidos abiertos o muy lisos necesitan de productos químicos como emulsionantes o ceras, que ayuden por medio de las fuerzas de interacción a dar el carácter hidrofóbico al tejido ya que no cuenta con rugosidad. Posteriormente con los aportes de otros investigadores, esta ecuación fue modificada obteniendo la siguiente expresión:

$$\cos \theta_W = r \cos \theta_Y \quad (3)$$

Donde θ_W y θ_Y son los ángulos de contacto según el régimen Wenzel y la ecuación de Young respectivamente, este último mencionado, describe la interacción de las tensiones o fuerzas superficiales que presenta una superficie lisa mediante la siguiente ecuación (Young, 1805):

$$\cos \theta_Y = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad (4)$$

Donde γ_{SV} , γ_{SL} y γ_{LV} son las tensiones superficiales entre las interfaces sólido-vapor, sólido-líquido y líquido-vapor respectivamente; estas fuerzas son las indican que indican la tendencia de humectabilidad de la superficie.

3.2.2 *Cassie-Baxter:*

La ecuación del régimen de humectabilidad Cassie-Baxter describe una superficie rugosa que al entrar en contacto con una gota de agua presenta mojabilidad de tipo

heterogénea (ver **Figura 2**), esto dado a la formación de bolsas de aire entre los pilares que conforman la topografía de la superficie y una gota de agua, presentando así tres interfaces: sólido-líquido, líquido-aire y sólido-aire (Cassie & Baxter, 1944). Estas bolsas de aire se dan debido a la rugosidad y organización jerárquica micro y nano estructural de los pilares o diferentes estructuras que se pueden presentar en una superficie. Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, a mayor cantidad de espacios vacíos, mayor ángulo de contacto y mayor hidrofobicidad.

Cassie-Baxter proponen analizar el área de contacto presente entre interfaces y para ello determinan que f_{sl} y f_{lv} serán las fracciones de área entre el sólido-líquido y líquido-aire respectivamente, donde cabe aclarar la suma de estas dos es igual a uno ($f_{sl} + f_{lv} = 1$); del mismo modo que en el modelo matemático de Wenzel (3) se tiene en cuenta el ángulo de contacto de Young (4) para condiciones ideales. A continuación, se presenta el modelo matemático para el régimen Cassie-Baxter:

$$\cos \theta_{CB} = f_{sl} \cos \theta_Y - f_{la} \quad (5)$$

En estudios posteriores la ecuación planteada anteriormente (5) fue modificada, añadiendo el factor de rugosidad (r) (l) mencionado inicialmente por Wenzel, teniendo así la siguiente ecuación que de manera general permite describir y determinar el ángulo de contacto de determinada superficie y con esto su grado de hidrofobicidad.

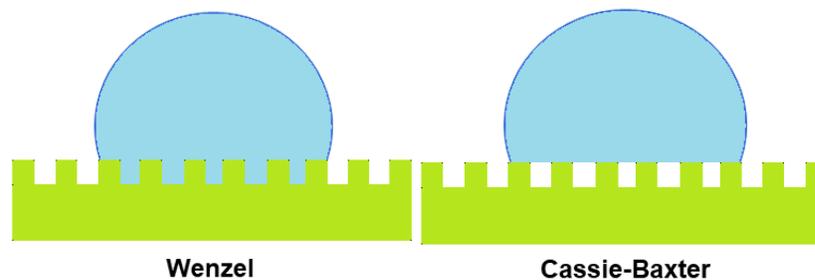
$$\cos \theta_{CB} = r f_{sl} \cos \theta_Y - f_{la} = (f_{sl}(r \cos \theta_Y + 1)) - 1 \quad (6)$$

Como variables principales en la ecuación (6) se tiene la fracción f_{sl} y para este modelo el factor de rugosidad (r) que bien sigue siendo un parámetro que aumenta la hidrofobicidad, para este caso será una constante ya determinada por el área establecida de

la superficie (Nosonovsky & Bhushan, 2007). En la siguiente imagen se puede ver de forma ilustrativa las diferencias planteadas anteriormente para cada uno de los regímenes.

Figura 2

Regímenes Wenzel y Cassie-Baxter



3.3 Materiales Bioinspirados

El hombre en sus distintas épocas evolutivas ha sobresalido por el uso de diferentes tipos de materiales. Lo anterior, se explica con los nombres que llevan las edades históricas debido al uso de cierto material en específico. Éstos pasaron de ser piedra, huesos y madera al descubrimiento y desarrollo de los metales, aleaciones, polímeros, nanomateriales y materiales bioinspirados. Estos últimos, han venido en incremento debido a la observación e identificación de las cualidades que presentan los materiales naturales. Estos poseen una combinación única de excelentes propiedades mecánicas con microestructuras exquisitas (Fu, Saiz, & Tomsia, 2011) lo que permite obtener un mayor desarrollo tecnológico.

La bioinspiración la encontramos en todas partes desde el arte, la moda, la arquitectura, y pasando por la medicina y la ingeniería. Su interés no es en vano, ya que la naturaleza ha desarrollado durante mucho tiempo la capacidad de combinar minerales frágiles con moléculas orgánicas y producir compuestos híbridos con una excelente resistencia a la fractura. De hecho, muchos materiales naturales como el hueso, la madera y el nácar poseen estructuras complejas, que superan fácilmente cualquier invención del

hombre (Munch, y otros, 2008). En el campo ingenieril los materiales bioinspirados permiten tecnologías atractivas que responde a necesidades que se presentan actualmente, como paneles solares que siguen la trayectoria del sol, hasta aleaciones metálicas con efecto de memoria de forma (Erb, Sander, & Gris, 2012) pasando hasta los recubrimientos superhidrofóbicos inspirados en el efecto loto (Koch, Bhushanb , & Barth, 2008).

3.4 Recubrimientos superhidrofóbicos

Los materiales y recubrimientos hidrofóbicos representan un gran uso hoy en día, van desde lo más cotidiano como un sartén de cocina, hasta recubrimientos que protegen tuberías de la corrosión. Su gran auge se debe a la alta repelencia que tienen con el agua y a la propiedad de auto limpieza. Esto es inspirado en la planta *Nelumbo nucifera* y se conoce como “*el efecto Loto*” (Koch, Bhushanb , & Barth, 2008).

La hidrofobicidad está completamente ligada a componentes físico-químicos como la rugosidad de las superficies y la tensión superficial. La mayoría de estudios referentes a este fenómeno están enfocados en determinar las variables superficiales. Es por esto que, por medio de procesos como la electrodeposición, tratamientos litográficos, grabado de iones reactivos, entre otros, se puede llegar a recrear superficies nanoestructuradas con diversas morfologías y alta rugosidad (Chen, Zhu, Cai, Yi, & Li, 2020), lo que permite tener superficies hidrofóbicas competentes para el mercado.

4. Metodología

A continuación, se describirá la metodología empleada durante el desarrollo del proyecto con el fin de desglosar paso a paso el proceso que se llevó a cabo.

4.1 Revisión bibliográfica

El material bibliográfico fue obtenido de fuentes como Google Académico y de las diferentes bases de datos que posee la Biblioteca de la Universidad Industrial de Santander. La información conseguida fue considerada relevante siempre y cuando las referencias bibliográficas tuvieran soporte de editoriales científicas o ingenieriles. Se inició buscando sobre hidrofobicidad y los modelos matemáticos que se habían venido desarrollando a lo largo de este tiempo. También, se buscaron diferentes artículos de materiales y diseños bioinspirados y luego, se indagó en el estudio de las plantas como el *Nelumbo nucifera* y su superhidrofobicidad para finalmente dedicar la revisión bibliográfica a la *Pistia stratiotes*.

4.2 Análisis de los modelos matemáticos

Para comprender como funciona matemáticamente la hidrofobicidad se estudió el desarrollo histórico de los modelos matemáticos publicados, empezando desde Wenzel (1936), hasta seguir con todos los estudios que realizaron Bhushan y Nosonovsky. Se entendieron y se demostraron matemáticamente los modelos que planteaban dichos autores y con base a ello se encontraron las limitaciones matemáticas que poseía cada ecuación.

4.3 Caracterización superficial de la *Pistia stratiotes*

En esta etapa se reveló la topografía superficial de la planta *Pistia stratiotes* mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM). Para ello se debió estudiar el procedimiento que mejor se adaptara a la planta.

La muestra fue recubierta con oro y se sometió a un voltaje de 25kV y a una presión de 409 Pa. Se capturaron diferentes imágenes con aumentos de 100x, 500x, 1000x, 2000x, 5000x, 10.000x y 40.000x en diferentes partes de la muestra, con el fin, de tener una mayor perspectiva de su topografía.

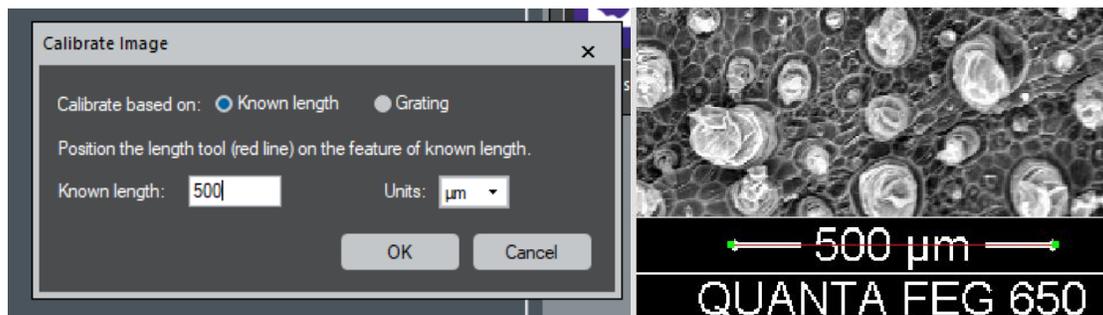
4.4 Análisis de las imágenes SEM.

Se estudiaron las imágenes SEM tomadas a la lechuga de agua, mediante el programa Gatan Microscopy Suite (GMS), el cual es un software que ayuda en el control y análisis experimental de imágenes tomadas en el microscopio electrónico de barrido y de transmisión (SEM) (TEM) (Gatan, 2022).

La magnificación de la imagen de trabajo fue 100x, para ellos se tuvo que calibrar el programa mediante la opción “Microscope” – Calibrate imagen- Known Length y se ingresó la medida (500) y se ajustaron las unidades (μm). En paralelo a este proceso aparece una línea de color rojo, la cual se debe ajustar a la medida que presenta la imagen en la parte inferior derecha (ver **Figura 3**). Una vez ajustada, se procedió a tomar el diámetro y las coordenadas de cada uno los montículos que se observaron en la imagen.

Figura 3

Programa Gatan Microscopy Suite



4.5 Adaptación de las fórmulas de hidrofobicidad

El factor de rugosidad del estado Welzel y la fracción de área de Cassie-Baxter dependen directamente de la topografía de la superficie, es por ello que se adaptaron diferentes tipos de geometría a estas ecuaciones para observar cómo variaba el ángulo de contacto según el diseño geométrico. Lo mismo se hizo con los datos tomados de la superficie de la *Pistia stratiotes*.

4.6 Validación de la superficie simulada con datos experimentales tomados anteriormente.

La planta *Pistia stratiotes* mostró un patrón octagonal formado de conos de diferentes tamaños, dicho modelo se replicó de una manera homogénea en el programa GeoGebra. Este software permitió tener una visión 2D y 3D de la superficie.

Los diámetros de los conos que se usaron para simular la superficie fueron de 90 μm para el central, de 75, 65, 40, 35 y 25 μm los laterales. Estos datos fueron los de mayor frecuencia en la imagen de 100x estudiada por el software GMS. Las alturas que se le proporcionaron a los conos se deben, a la relación que había entre el diámetro de la base del cono y la altura de estos. Dicha relación fue de 4 veces la altura con respecto al radio.

Para establecer la distancia que había de cada cono central a otro se tomaron medidas con el programa GMS y se sacó el promedio a los datos recopilados, el resultado fue de 232 μm . Esta distancia fue la base para diseñar un octágono en el programa SolidWorks donde se determinaron las distancias que habría entre cada uno de los conos que formaban la el arreglo estructural.

Finalmente, conociendo el área que ocupan los conos se procedió a hallar el ángulo de contacto Wenzel y Cassie-Baxter para la superficie simulada. También, se calculó el área de mojado para los ángulos de contacto tomados experimentalmente de la planta *Pistia stratiotes* por el semillero de recubrimientos multifuncionales.

5 Discusión y resultados

5.1 Limitaciones de la ecuación Wenzel y Cassie-Baxter.

Con el fin de comprender el comportamiento de los modelos matemáticos de Wenzel y Cassie-Baxter, se estudió y analizó cada una de las variables de las ecuaciones (3) (6) y se logró identificar las limitaciones matemáticas que estas poseen, las cuales son mencionadas a continuación:

5.1.1 Wenzel

I. $0 < r \cos \theta_y < 1$

La primera de ellas indica que para que la ecuación de Wenzel tenga un resultado congruente es necesario lograr un equilibrio entre el factor de rugosidad r y el $\cos \theta_y$, de modo que la multiplicación de estos dos parámetros resulte en el rango de $[0,1]$, de lo contrario la ecuación marcará error.

II. Si θ_y es 90° siempre se tendrá un θ_w igual a 90° , si $\theta_y < 90^\circ$ entonces θ_w será hidrofílico.

Desde el punto de vista matemático, ya que $\cos 90^\circ$ es igual a cero (0), por esto no importa que valor tome el factor de r el término dentro del \cos^{-1} será cero (0) y por lo tanto, siempre el resultado será $\theta_w = 90^\circ$; desde el punto de vista del fenómeno, un ángulo de contacto de 90° está en el límite entre dejar de ser hidrofílico a pasar a ser hidrofóbico, por esto se justifica que con un $\theta_y < 90^\circ$ la superficie tendrá una tendencia a ser hidrofílica, y como se mencionó anteriormente la rugosidad actúa como magnificador de las propiedades de mojado en una superficie.

III. $r \geq 1$

El factor de rugosidad es la relación entre el área real respecto al área geométrica de la superficie, donde la primera puede ser mayor o igual que la segunda, por esto el factor r solo puede ser igual 1 (dado el caso que las dos áreas sean iguales) o mayor que 1.

5.1.2 Cassie- BaxterI. $0 < f_{sl} < 1$

Realizando el análisis de este modelo se identificó que la fracción de contacto sólido-líquido (f_{sl}) en este caso es la variable principal que afecta el ángulo de contacto, que de forma fenomenológica esta fracción cambia en una misma superficie ya establecida, según las fuerzas que actúan en la interfaz sólido-líquido que dependen de las tensiones superficiales, el tamaño de la gota y su deformación. Como limitación se encuentra que al calcular esta fracción de contacto es necesario verificar que este en el rango de $[0,1]$ de lo contrario la ecuación marcará error.

5.2 Adaptación de los modelos para diferentes geometrías superficiales

Una forma de poner en práctica la teoría fue determinado los ángulos de contacto para diferentes tipos de geometrías superficiales como paralelepípedos, cubos, cilindros y cilindros huecos (ver **Tabla 1**). Para ellos se tomó un área de 9mm^2 en los cuales se plasmaron diferentes arreglos con las geometrías mencionadas anteriormente. Para los cubos y los paralelepípedos se usaron separación entre ellos de 0.5mm y alturas del mismo valor. Las dimensiones de los arreglos estaban limitadas por el área ya establecida para el plano.

Tabla 1

Angulo de contacto Wenzel para diferentes superficies

| Superficie | Área (mm²) | Factor r | θ_W ° |
|-------------------|------------------------------|-----------------|--------------------------------|
| Paralelepípedos | 17,00 | 1,89 | 109,15 |
| Cubos | 17,00 | 1,89 | 109,15 |
| Cilindros | 15,28 | 1,70 | 107,15 |
| Cilindros Huecos | 12,14 | 1,35 | 103,55 |
| Conos | 14,08 | 1,56 | 105,77 |

Los datos de ángulos de contacto encontrados para Cassie-Baxter para cubos y paralelepípedos presentaron una fracción de área de 1 (ver **Tabla 2**), lo que indica un mojado completo para estas superficies. Mientras que las otras geometrías presentaron valores en el rango de superhidrofobicidad.

Tabla 2

Angulo de contacto Cassie-Baxter para diferentes superficies

| Superficie | Fsl | θ_{CB} ° |
|-------------------|------------|-----------------------------------|
| Paralelepípedos | 1,00 | 100,00 |
| Cubos | 1,00 | 100,00 |
| Cilindros | 0,19 | 146,90 |
| Cilindros Huecos | 0,14 | 151,44 |

5.3 Caracterización de la superficie de la *Pistia stratiotes*

Haciendo uso del software GSM se determinaron los diámetros y coordenadas de los conos. En total se obtuvieron 570 datos de una imagen SEM a 100x. Los datos presentaron valores desde 20 μm hasta 130 μm , la distribución se observa a continuación en la **Figura 4**.

Los datos se agruparon de 10 en 10 para observar que rango tenía mayor frecuencia (ver **Figura 5**). Se encontró que el 24.4% de los datos estaban entre 20 y 30 μm de diámetro. Mientras que el 13% correspondió a diámetros de entre 30 y 40 μm ; otro grupo con más de 50 datos están en el rango de 40 a 50 μm y corresponde al 10,5%.

Figura 4

Diámetros Vs números de conos

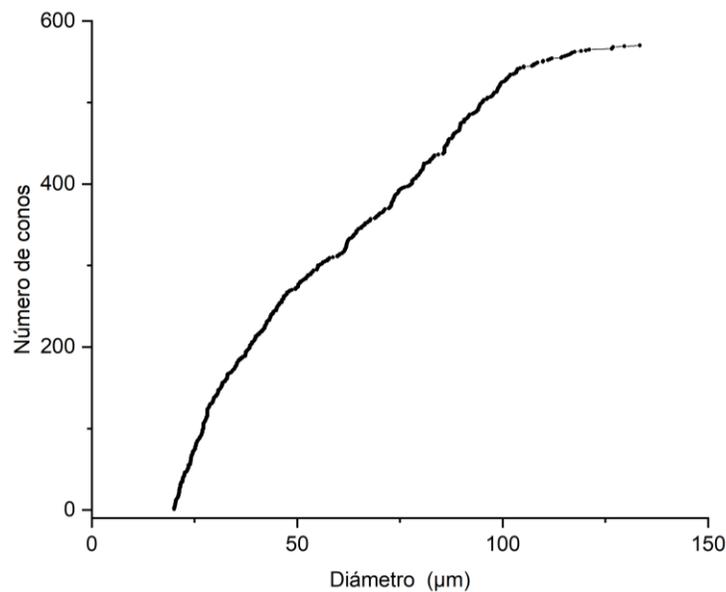
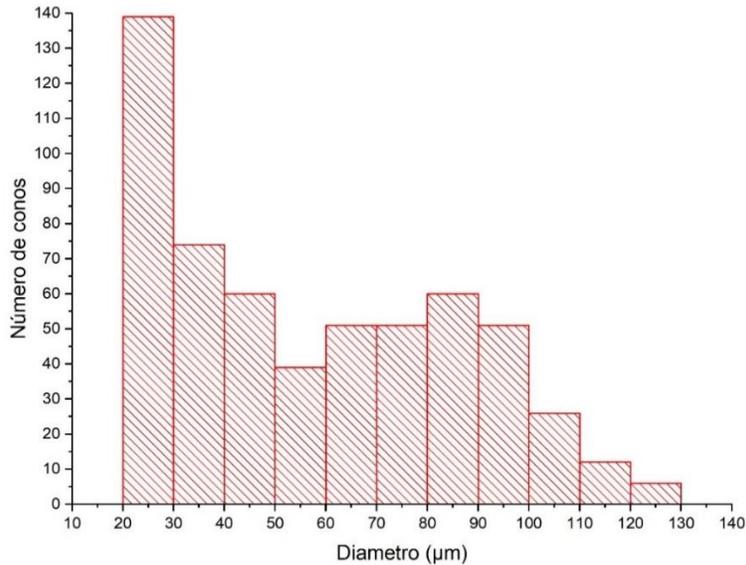


Figura 5

Histograma de distribución de tamaños de conos

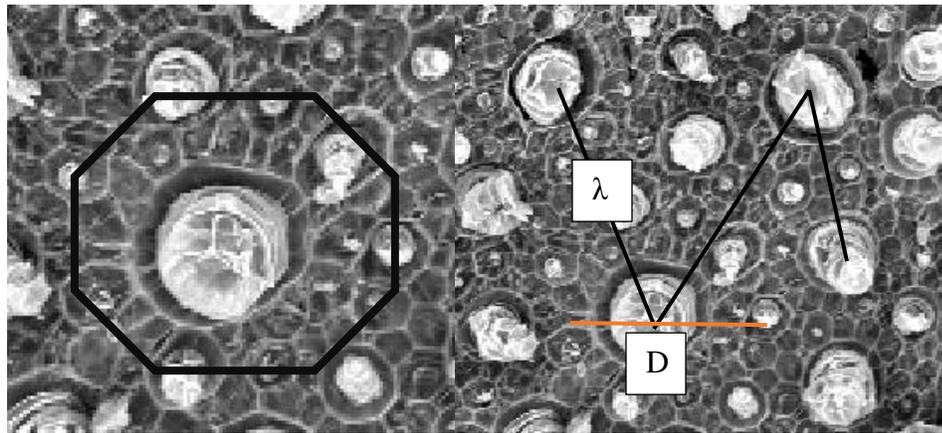


Detallando la superficie de la planta se observó un patrón repetitivo entre los conos, en primera instancia se le llamó “flor” puesto que tenía un cono grande en el centro, rodeado de conos más pequeños (ver

Figura 6). Los conos centrales presentaron diámetros mayores a 85μm, mientras que los de alrededor en su gran mayoría estaban por debajo de dicho valor, sin embargo, se encontraron centros con valor similar a conos laterales, lo que ocasionaba una perturbación en la superficie. Se determinó la cantidad de conos que se presentaban alrededor del núcleo y se halló que muchas de las “flores” estaban compuestas de 8 conos.

Figura 6

Geometría octogonal presentada por la Pistia stratiotes



Los octágonos que se observaron en la superficie de la Pistia compartían conos laterales con otros centros. Debido a esta distribución se tomaron medidas de centro a centro (λ) y de los diámetros de cada “flor” (D) (ver **Tabla 3**). Haciendo las mediciones de λ se obtuvieron distancias con un margen de error mayor a las mediciones de D, esto se debe a los pliegues que presenta la hoja, lo cual deforma la imagen y da resultados erróneos. Es por esto que para la simulación de la superficie se tomó la distancia D y no λ .

Tabla 3

Caracterización de la estructura octogonal

| $\lambda(\mu\text{m})$ | D (μm) |
|------------------------|----------------------------|
| | |

| | | |
|-----------------|---------------|---------------|
| | 215,16 | 228,42 |
| | 234,55 | 236,93 |
| | 222,20 | 235,42 |
| | 263,37 | 247,52 |
| | 224,33 | 236,72 |
| | 222,50 | 225,92 |
| | 235,74 | 222,25 |
| | 258,42 | 235,81 |
| | 260,48 | 223,22 |
| | 262,92 | 229,51 |
| Promedio | 239,96 | 232,17 |

5.4 Ecuación para la *Pistia stratiotes*

Considerando la morfología cónica de distribución que presenta la *Pistia*, se procedió primeramente a hallar el factor de rugosidad (r) y la fracción de área (fsl); una vez obtenidas las ecuaciones que permiten cuantificar estos dos valores en términos de las variables geométricas, se planteó las ecuaciones finales para calcular los ángulos de contacto de cada régimen.

5.4.1 Ecuación de Wenzel para la *Pistia stratiotes*

Como ya se ha mencionado, Wenzel describe superficies rugosas, donde la variable r dentro de su ecuación 1 puede actuar como magnificador tanto hidrofílico como hidrofóbico. El área geométrica está compuesta tanto del área plana como el área de los conos y para determinarla se hallaron primero las tres áreas que la conforman.

$$\text{Área geométrica} = A \text{ plana} - A \text{ del círculo proyectada} + A \text{ cono sin base} \quad (7)$$

El área plana se tomó con el programa GSM y corresponde a las dimensiones de la imagen a 100x, las cuales son 2942,43µm X y 2538,93µm Y, dando como resultado un área de 7.470.624 µm². Para las otras áreas se tuvo en cuenta la cantidad de conos que había en cada distribución de diámetros y se plantearon las siguientes ecuaciones.

$$A \text{ del círculo proyectada} = \pi r_1^2 + \pi r_2^2 + \pi r_3^2 \quad (8)$$

$$A \text{ cono sin base} = n\pi\sqrt{17}r_1^2 + m\pi\sqrt{17}r_2^2 + l\pi\sqrt{17}r_3^2 \quad (9)$$

Donde *n*, *m* y *l* es la cantidad de conos que hay para cada tipo de radio descrito. *r*₁, *r*₂ y *r*₃ corresponden a los radios de los diámetros de los diferentes conos encontrados. Teniendo en cuenta lo anterior, con las ecuaciones y los datos se determinó el área geométrica, la cual fue de 12.345.754 µm². Con las tres áreas se calculó el factor de rugosidad (10) dando como resultado 1,74. Finalmente la ecuación general para determinar el ángulo de Wenzel para la *Pistia stratiotes* queda expresada como se muestra en la ecuación (11):

$$\text{factor } r = \frac{xy - (\pi(r_1^2 + r_2^2 + \dots + r_n^2)) + (\pi\sqrt{17}(nr_1^2 + mr_2^2 + \dots + xr_x^2))}{xy} \quad (10)$$

$$\cos\theta_w = \frac{xy - (\pi(r_1^2 + r_2^2 + \dots + r_n^2)) + (\pi\sqrt{17}(nr_1^2 + mr_2^2 + \dots + xr_x^2))}{xy} \cos\theta_y \quad (11)$$

Donde X y Y corresponden a las medidas del área plana y θ_y es el ángulo de Young.

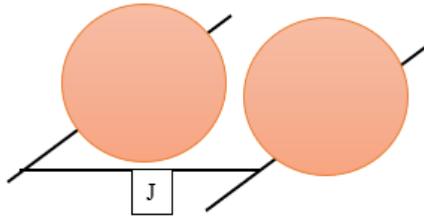
La principal restricción para esta ecuación radica en la distancia que hay de un cono a otro, es importante que radio no sea mayor a J para evitar el solapamiento entre conos (ver

Figura 7). Al igual, que el área total de la suma de las bases de los conos no puede ser mayor al área plana de la superficie.

$$J \geq 2rmax \quad A_p \geq A_{bc} \quad (12)$$

Figura 7

Limitaciones de la superficie



5.4.2 Ecuación de Cassie-Baxter para la Pistia stratiotes

Al contrario del factor de rugosidad, la fracción de área (*fsl*), presenta mayor complejidad pues se debe conocer el área de contacto entre el líquido y el sólido. Es por esto, que dicho valor cambiará según la gota vaya pasando de estado Cassie- Baxter a Wenzel.

$$A_T = A_{seca} - A_{mojada} \quad (13)$$

$$fsl = \frac{\text{Área de mojado}}{\text{A cono sin base}} \quad (14)$$

$$A \text{ de mojado} = \frac{n\pi R^2 \sqrt{17} h^2}{H^2} + \frac{m\pi R^2 \sqrt{17} h^2}{H^2} + \frac{l\pi R^2 \sqrt{17} h^2}{H^2} \dots \quad (15)$$

$$A \text{ cono sin base} = n\pi \sqrt{17} r_1^2 + m\pi \sqrt{17} r_2^2 + l\pi \sqrt{17} r_3^2 \dots \quad (16)$$

Para determinar el fsl es necesario conocer el área de mojado y el área del cono sin base, ver ecuación (13) (14), teniendo esto se procede a reemplazar estas ecuaciones en la ecuación para Cassie-Baxter (6) descrita por Bhushan, la cual incluye el factor de rugosidad (10), con esto, cuando el área de mojado sea de 100% el ángulo de contacto obtenido será el mismo para Wenzel.

$$fsl = \frac{\frac{nR_1^2 h_1^2}{H_1^2} + \frac{nR_2^2 h_2^2}{H_2^2} + \dots + \frac{xR_x^2 h_x^2}{H_x^2}}{nr_1^2 + nr_2^2 + \dots + xr_x^2} \quad (17)$$

$$\cos\theta_{CB} = \left(\left(\frac{\frac{nR_1^2 h_1^2}{H_1^2} + \frac{nR_2^2 h_2^2}{H_2^2} + \dots + \frac{xR_x^2 h_x^2}{H_x^2}}{nr_1^2 + nr_2^2 + \dots + xr_x^2} \right) \left(\frac{xy - (\pi(r_1^2 + r_2^2 + \dots + r_n^2)) + (\pi\sqrt{17}(nr_1^2 + mr_2^2 + \dots + xr_x^2))}{xy} \right) \cos\theta_y \right. \\ \left. + 1 \right) - 1 \quad (18)$$

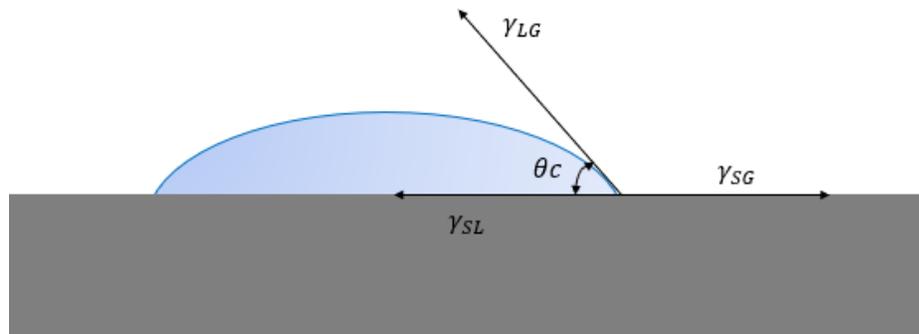
5.4.3 Tensiones superficiales

El ángulo de Young θ_y (4) requiere de las tensiones superficiales de cada fase (ver

Figura 8). Es por esto que se deben establecer para cada interfaz.

Figura 8

Fuerzas que actúan en la interfaz de la gota



La tensión superficial para la interfaz entre el agua y el aire es de 72.86 mN.m^{-1} (Speight, 2019). Mientras que, la tensión superficial entre el líquido y el sólido depende de la cera presente en la planta. Este estudio no cuenta con el valor de tensión superficial para la cera entre la Pistia y el agua, es por esto que se realizaron búsquedas de tensiones superficiales con respecto a la cera de las plantas.

El Mirto chileno es un árbol que presentó un ángulo de contacto de 100.48° , lo que lo categoriza dentro de un régimen hidrofóbico, sin embargo, sus hojas presentaron una superficie completamente lisa, mientras que el Eucalipto de goma azul posee tanto rugosidad micrométrica, como nanométrica, por lo tanto, su ángulo de contacto es de 142.58° (Fernández & Khaye, 2015). Dado lo anterior se escogió el valor de tensión superficial del Mirto chileno, para que la rugosidad del Eucalipto no inflara el resultado. Entonces, la tensión superficial entre la interfaz sólido líquido usada es 38.13 mN.m^{-1} (Fernández & Khaye, 2015).

Finalmente, la tensión superficial de la interfaz cera-aire se obtuvo reemplazando el trabajo de adhesión de la ecuación de Young-Dupre (17) en la ecuación de Dupre (16). Para esto, se ingresó el ángulo de contacto que tuvo la hoja del Mirlo con el agua y se despejó el trabajo, luego en la ecuación (16) se despejó γ_s y se colocaron los valores correspondientes

a la tensión superficial del agua y de la interfaz líquido-sólido. Obteniendo así una tensión de adhesión de 24.88 mN.m^{-1} .

$$w_{sl} = \gamma_s + \gamma_l - \gamma_{sl} \quad (19)$$

$$w_{sl} = \gamma_l(\cos\theta + 1) \quad (20)$$

Sin embargo, este método no es adecuado para la ecuación de Wenzel, puesto que comienza a presentar limitaciones matemáticas para ángulos de contacto Young mayores a $126,48^\circ$.

5.5 Validación de la ecuación para la *Pistia stratiotes* con datos experimentales

5.5.1 Fuerzas en una gota de agua

Para una gota en reposo actúan dos fuerzas importantes:

- 1) La presión capilar (pc) que ayuda a la conservación de la forma esférica de la gota y es mayor para gotas pequeñas y está descrita por la ecuación de Laplace:

$$pc = \Delta p = \frac{2\gamma}{R} \quad (21)$$

- 2) La presión hidrostática (ph) por el contrario influye en la deformación de la gota.

Esta es mayor para gotas grandes y está descrita por la siguiente ecuación:

$$ph = \rho gh \quad (22)$$

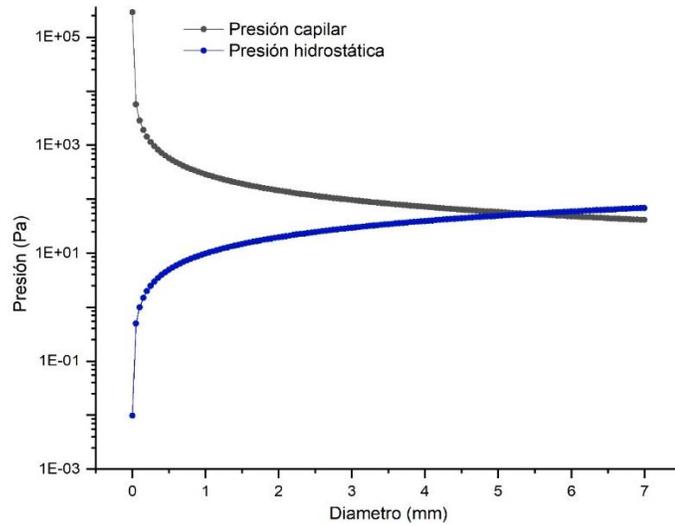
Teniendo en cuenta que estas dos presiones actúan de forma dual y constante en la gota se deduce que para $pc > ph$ no hay deformación de la gota.

Realizando la gráfica de las curvas (ver Figura 9) descritas por las anteriores ecuaciones se determinó, la existencia de un diámetro crítico ($D \approx 2.81$) para toda gota de agua y está dado por la zona en que las presiones actuantes tienen un mismo orden de magnitud y

empiezan a ser iguales. El volumen estándar de una gota de agua es de 0.05 cm^3 (ThoughtCo., 2006). Lo que indica que es una gota deformable ($D = 4.57$).

Figura 9

Presiones que actúan en una gota estática



5.5.2 Ángulos de contacto tomados experimentalmente

En los ensayos de ángulo de contacto para la Pistia obtenidos por el Semillero de Recubrimientos Multifuncionales se tomaron medidas con gotas de diferentes tamaños como muestra a continuación.

Tabla 4

Ángulos de contacto para la Pistia stratiotes

| Volumen de gota (μL) | Promedio de Ángulos (grados $^\circ$) |
|-----------------------------------|--|
| 1 | 155,43 |
| 2 | 153,13 |
| 3 | 151,10 |
| 4 | 149,07 |

| | |
|----|--------|
| 5 | 145,00 |
| 10 | 137,10 |

Los valores de ángulos de contacto para los diferentes volúmenes corresponden al promedio de datos registrados en el laboratorio (ver Tabla 4). Se observa que a medida que aumenta el volumen disminuye el ángulo de contacto. Lo anterior se debe a que la presión hidrostática altera la esfericidad de las gotas más grandes.

La superficie estudiada de la imagen SEM a 100x poseía un área de $7.470.624 \mu\text{m}^2$, la cual solo es suficiente para una gota del tamaño de un micro litro. Dicha gota ocuparía un 16% de la superficie y debido al tamaño ($D = 1,24\text{mm}$) sería completamente esférica.

Ahora, para validar los valores de ángulos de contacto teóricos obtenidos con las ecuaciones planteadas, nos basamos en los datos experimentales y en cómo varía teóricamente el porcentaje de mojado el cono de mayor tamaño. Se seleccionaron los ángulos en el rango de la superhidrofobicidad ($>150^\circ$) obtenidos experimentalmente; seguido de esto se revisó en la hoja de cálculos realizada qué valores de porcentaje de mojado corresponden a esos ángulos de contacto según las ecuaciones planteadas. Se obtuvo para 155.43° , 153.13° y 151.10° los siguientes porcentajes de mojado para el cono de mayor longitud 47.22%, 50.00% y 53.33 % respectivamente. Con base en el anterior análisis podemos corroborar que las ecuaciones planteadas son válidas para expresar y determinar la hidrofobicidad de la superficie en estudio.

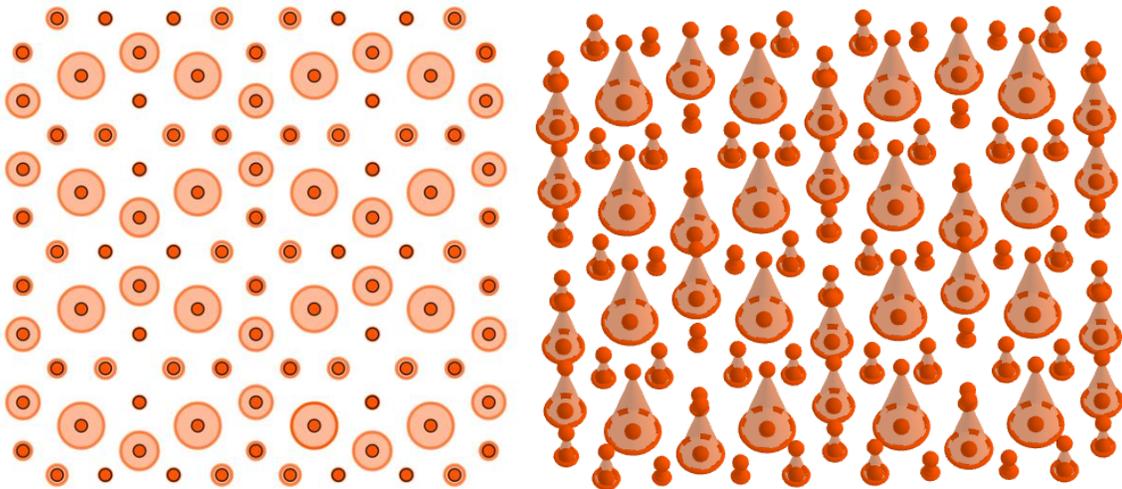
5.6 Superficie simulada

Una vez identificado el patrón que presenta la superficie de la Pistia se realizó una simulación gráfica en el programa GeoGebra (ver Figura 10 y Figura 11) éste permite

observar el modelado en 2D y 3D. Los diámetros usados corresponden a los datos que se encontraron en mayor frecuencia en la superficie la planta. Para lograr una mejor distribución se colocaron los conos de radios mayores rodeados de los menores.

Figura 10

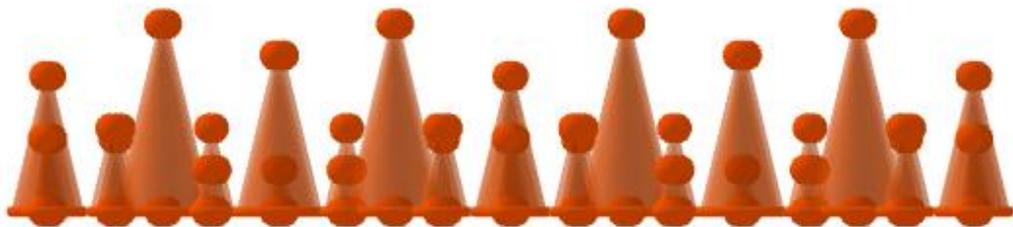
Superficie diseñada con patrón octogonal



El programa muestra gráficamente el área ocupada por los conos, con base a ello y conociendo cuantos conos hay de cada tipo de radio, se aplicaron las ecuaciones de ángulo de contacto descritas (11) y (18) para la *Pistia stratiotes*.

Figura 11

Arreglo de conos en vista frontal



Para un área plana de $1458 \mu\text{m} \times 1432 \mu\text{m}$, se obtuvo un ángulo de contacto Wenzel de 108.43° y para un área de mojado de 100% para todos los conos, en Cassie-Baxter se

obtuvo el mismo ángulo de Wenzel, pues esta ecuación contempla el factor de rugosidad. Mientras que, para un mojado del 50% con respecto al cono 180 μm de alto se presentó un ángulo de 153.13° y obteniendo así un mojado del 40.00% para conos de 150 μm de alto y para conos de 130 μm , el mojado correspondió al 30.77%; el resto de los conos más pequeños no alcanzan a ser mojados (ver Tabla 5).

Tabla 5

Resultados obtenidos de superficie bioinspirada en la Pistia stratiotes

| Tipo de R | Wenzel $\theta_w = 108.43^\circ$ Factor $r = 1.7$ | | Cassie-Baxter $\theta_{CB} = 153.13^\circ$ $fsl=0.16$ | |
|-----------|--|--------------------------|--|----------|
| | Radio (μm) | Altura (μm) | Cant. Conos | % Mojado |
| R1 | 45.00 | 180 | 36 | 50.00 |
| R2 | 37.50 | 150 | 18 | 40.00 |
| R3 | 32.50 | 130 | 24 | 30.77 |
| R4 | 20.00 | 80 | 42 | 0.00 |
| R5 | 15.00 | 60 | 48 | 0.00 |
| R6 | 12.50 | 50 | 36 | 0.00 |

Autores como Jung expresan la importancia del aire atrapado entre las microestructuras (Jung & Bhushan, 2007), esto ayuda a la gota a permanecer en régimen Cassie-Baxter; por consiguiente, los conos de menor tamaño no logran ser mojados (ver

Figura 12).

Figura 12

Gota sobre superficie de conos



6. Conclusiones

Dentro del análisis expuesto se logró identificar y analizar los principales modelos que describen el grado de humectabilidad de las superficies, Wenzel y Cassie-Baxter. Comprobando así que las variables y parámetros geométricos estructurales que presentan las morfologías de las superficies, son de vital importancia para determinar su grado de hidrofobicidad; del mismo modo se encontró que los modelos en correlación con la superficie en estudio presentan limitaciones que deben ser identificadas y evaluadas en el análisis matemático.

Las limitaciones mencionadas en el presente estudio matemáticamente hablando fueron parámetros que necesitan ser estipulados para evitar resultados erróneos; adicional a

esto se identificó que no hay en la literatura valores de tensiones superficiales para las tres interfaces involucradas en un mismo sistema.

Así mismo, se logró adaptar los modelos estudiados a la morfología estructural de la superficie de la *Pistia Stratiotes*, teniendo en cuenta las variables, parámetros y limitaciones calculadas en el estudio topográfico. Para lo anterior se hizo uso del programa Gatan Microscopy Suite e imágenes SEM, donde fue posible medir y caracterizar las estructuras cónicas observadas, lo que permitió identificar el patrón de distribución octogonal y junto con el análisis de distribución de tamaño de conos finalmente diseñar la superficie bioinspirada.

Como criterio de validación se encontró que a medida que aumentaba el ángulo de contacto para Cassie-Baxter, el porcentaje de mojado disminuía. Este régimen tiene muchos factores en juego, como la tensión superficial y los espacios de aire, los cuales magnifican la tendencia al régimen Cassie-Baxter y lo que ratifica el porqué los conos pequeños no alcanzan a ser mojados. Mientras que en Wenzel el ángulo permanece constante, el resultado obtenido está sujeto a varias limitaciones matemáticas, sin embargo, alcanza el rango de hidrofobicidad.

En conclusión, la hidrofobicidad de una superficie está delimitada por el arreglo geométrico estructural que pueda presentar la zona y por la interacción de las tensiones superficiales de interfaz que dictan la tendencia de mojado; Una superficie heterogénea presenta un mayor ángulo de contacto ya que existe una capa de aire que separa el líquido del sólido y esto se evidenció con las ecuaciones planteadas ya que cuando se presentan ángulos de contacto mayores, los conos más pequeños del arreglo cónico no presentan porcentaje de mojado, lo que indica que por fuerzas de interacción la gota queda suspendida

en los conos de mayor altura y por lo tanto se tiene una superficie menos mojada y más hidrofóbica.

7. Recomendaciones

Finalmente se recomienda sintetizar recubrimientos copiando la morfología de la Pistia Stratiotes.

Bibliografía

- Agustín Fernández Cañete, G. G. (2013). *Estudio de la Hidrofobicidad y Autolimpieza en Materiales con Nano tratamientos Superficiales*. Barcelona: Universidad Autónoma de Barcelona.
- Arciniegas, J., & Bruges, P. (2019). *Estudio del carácter hidrofóbico de recubrimientos de níquel modificados químicamente*. Bucaramanga: UIS.
- Bormashenko, E., Bormashenko, Y., Stein, T., Whyman, G., & Bormashenko, E. (2007). Why do pigeon feathers repel water ? Hydrophobicity of pennaes , Cassie – Baxter wetting hypothesis and Cassie – Wenzel capillarity-induced wetting transition. *Journal of Colloid and Interface Science*, 212-216.
- Cassie, A. (1948). Contact Angles. *Discusiones de la Sociedad Faraday*, 2-16.
- Cassie, A. B., & Baxter, S. (1944). Wettability of Porous Surfaces. *Discusiones de la Sociedad Faraday*, 546-551.
- Chen, Z., Zhu, C., Cai, M., Yi, X., & Li, J. (2020). Growth and morphology tuning of ordered nickel nanocones routed by onestep. *Applied Surface Science*, 10.

- Dra' bik, M., Polonskyi, O., Kylia, O., C'echvala, J., Artemenko, A., Gordeev, I., . . .
Biederman, H. (2010). Super-Hydrophobic Coatings Prepared by RF Magnetron Sputtering of PTFE. *Macromolecules Journal*, 8.
- Ensikat, H., Kuru, P., Neinhuis, C., & Barthlott, W. (2011). Superhydrophobicity in perfection: the outstanding properties of the lotus leaf. *NBCI*, 20.
- Erb, R., Sander, J., & Gris, R. (2012). Self-shaping composites with programmable bioinspired microstructures. *Nature communications*, 8.
- Fernández, V., & Khaye, M. (2015). Evaluation of the surface free energy of plant surfaces: toward standardizing the procedure. *Frontiers in Plant Science*.
- Fu, Q., Saiz , E., & Tomsia, A. (2011). Bioinspired Strong and Highly Porous Glass Scaffolds. *Advanced Functional Materials*, 6.
- Gatan, I. (2022). *Gatan AMETEK*. Obtenido de <https://www.gatan.com/products/tem-analysis/gatan-microscopy-suite-software>
- Hernandez , J. (2017). *Obtención mediante técnicas electroquímicas de recubrimientos compuestos de cobre nano estructurados de carácter hidrofóbico* . Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Jung, Y., & Bhushan, B. (2007). Wetting transition of water droplets on superhydrophobic patterned surfaces. *Scripta Materialia*, 1057-1060.
- Koch, K., Bhushanb , B., & Barth, W. (2008). Diversity of structure, morphology and wetting of plant surfaces. *Soft Matter*, 21.
- Marmur, A. (2006). Soft contact: Measurement and interpretation of contact angles. *Soft Matter*, 12-17.
- Munch, E., Launey, M., Alsem , D., Saiz , E., Tomsia, A., & Ritchie, R. (2008). Tough, Bio-Inspired Hybrid Materials . *sciencemag*, 5.

- Muniappan, R., Reddy, G., & Raman, A. (2009). *Biological Control of Tropical Weeds Using Arthropods*. Cambridge.
- Naturalista. (2022). *Naturalista*. Obtenido de <https://colombia.inaturalist.org/taxa/78589-Pistia-stratiotes>
- Nosonovsky, M., & Bhushan, B. (2005). Roughness optimization for biomimetic superhydrophobic surfaces. *Microsyst Technol*, 535-549.
- Nosonovsky, M., & Bhushan, B. (2007). Hierarchical roughness optimization for biomimetic superhydrophobic surfaces. *Ultramicroscopy*, 969-979.
- Parvate, S., Dixit, P., & Chattopadhyay, S. (2020). Superhydrophobic Surfaces: Insights from Theory and Experiment. *The Journal of Physical Chemistry B*, 1323-1360.
- Pathan, A., Bond, J., & Gaskin, R. (2009). Sample preparation for SEM of plant surfaces. *Elsevier*, 21.
- Piscitelli, F., Tescione, F., Mazzola, L., & Bruno, G. (2019). On a simplified method to produce hydrophobic coatings for aeronautical applications. *Surface Science*, 71.
- Roberge, P. (2008). *Corrosion Engineering Principles and practice*. United States of America: The McGraw-Hill.
- Sastri, V. (2015). *Challenges in corrosion: Costs, Causes, Consequences and Control*. Estados Unidos: John Wiley & Sons Inc.
- Shekari, E., Khan, F., & Ahmed, S. (2017). Economic risk analysis of pitting corrosion in process facilities. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 62.
- Speight, J. (2019). *Natural Water Remediation Chemistry and Technology*. Oxford: Butterworth Heinemann.

- ThoughtCo. (2006). *ThoughtCo*. Obtenido de Calculating the Number of Atoms and Molecules in a Drop of Water: <https://www.thoughtco.com/atoms-in-a-drop-of-water-609425>
- Tripathi, P., Kumar, R., Sharma, A., & Mishra, A. (2010). *Pistia stratiotes* (Jalkumbhi). *NCBI*, 20.
- Vilche, O. R. (2008). *Tiempo Geológico*. Chile: Universidad de concepción.
- Wenzel, R. (1936). Resistance of Solid Surfaces to Wetting by Water. *Industrial and Engineering Chemistry*, 988-994.
- Whyman, G., Bormashenko, E., & Stein, T. (2008). The rigorous derivation of Young, Cassie-Baxter and Wenzel equations and the analysis of the contact angle hysteresis phenomenon. *Chemical Physics Letters*, 355-359.
- Yazdi, M., Khan, F., & Abbassi, R. (2021). Microbiologically influenced corrosion (MIC) management using Bayesian inference. *Ocean Engineering*, 16.
- Young, T. (1805). *III. An essay on the cohesion of fluids*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London.
- Zhang, L., Zhou, A., Sun, B., Chen, K., & Yu, H.-Z. (2021). Functional and versatile superhydrophobic coatings via stoichiometric silanization. *Nature Communications*, 7.