

Determinación del ángulo de contacto en superficies de lentes oftálmicos con recubrimientos superhidrofóbicos e hidrofóbicos a través del método óptico de detección de bordes

Anyeli Yulieth Padilla Rodríguez, Nelly Tatiana Niño Camelo, Danna Catalina Sarmiento Romero, Brandon Parada Toro

Trabajo de grado para optar el título de Optómetras

Director

Juan José Barrios Arlante

Magíster en Física

Codirector

Luis Alejandro Sepúlveda Ortega

Esp. Segmento anterior & lentes de contacto USTA

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ciencias de la Salud

Facultad de Optometría

2022

Contenido

Introducción 12

1. Objetivo general 18

 1.1 Objetivos específicos..... 18

2. Marco teórico 19

 2.1 Ángulo de contacto..... 19

 2.2 Método de detección de bordes 21

 2.3 Lentes oftálmicos 24

 2.4 Materiales de los lentes oftálmicos 28

 2.5 Filtros o recubrimientos..... 30

 2.6 Hidrofóbico y Superhidrofóbico 31

 2.7 Tipos de agua..... 34

 2.8 Marco legal..... 37

3. Metodología 38

 3.1 Población..... 38

 3.2 Técnica de muestreo 39

 3.3 Tamaño de muestra 39

 3.4 Procedimiento..... 43

 3.4.1 Prueba piloto..... 44

 3.4.2 Adquisición y procesamiento digital de la imagen..... 45

 3.4.2.1 Calibración del sistema óptico 45

 3.5 Sesgos 56

4. Resultados 56

4.1 Discusión	63
5. Conclusiones	68
5.1 Recomendaciones	68
Referencias.....	70
Apéndices.....	77

Lista de tablas

Tabla 1. Operacionalización de variables 39

Tabla 2. Clasificación de variables 41

Tabla 3. Análisis univariado 41

Tabla 4. Cruces de variables 42

Tabla 5. Propiedades físicas de aguas recolectadas 43

Tabla 6. Caracterización de lentes oftálmicos y agua empleada..... 62

Tabla 7. Análisis bivariado 63

Lista de figuras

Figura 1. Morfología superficial del ala de la libélula..... 14

Figura 2. Esquema representativo del montaje experimental a implementar. 15

Figura 3. Ángulos de contacto en superficies estructuradas en los estados clásicos de Wenzel (W) y Cassie – Baxter (C – B), respectivamente, donde r es la amplificación física del área superficial debido a la rugosidad y f_S es el área fraccional en contacto con el aire..... 16

Figura 4. Estado de Wenzel 17

Figura 5. Estado de Cassie-Baxter 17

Figura 6. Ecuación de Young 19

Figura 7. Fenómeno de humectación ideal de la fase líquida (p) y la fase fluida (q) en una fase sólida (s)..... 19

Figura 8. Ecuación de Wenzel 20

Figura 9. Ecuación de Cassie..... 20

Figura 10. Ecuación de Cassie-Baxter 20

Figura 11. Humedecimiento sobre superficies rugosas: (a) el modelo de Wenzel que muestra la fase líquida llenando completamente los valles, (b, c) El modelo de Cassie-Baxter que muestra la fase líquida sobre los picos de la superficie sólida y el llenado de líquido parte del valle con aire queda atrapado debajo..... 21

Figura 12. Operador de Sobel y Roberts..... 22

Figura 13. Detector de bordes de Canny. (a) imagen original, (b) orientación, (c) supresión no máxima, (d) histéresis de umbral 23

Figura 14. Los algoritmos de detección de bordes existentes detectan los resultados en cómics, pinturas al óleo y grabados. (a) Las imágenes artísticas originales. (b) Los resultados obtenidos por el operador de Canny. (c) Los resultados obtenidos por los operados de Sobel..... 24

Figura 15. Tipos de lentes oftálmicos según su superficie 25

Figura 16. Tipos de lentes graduados monofocales, bifocales y progresivos..... 27

Figura 17. Lente oftálmico con antirreflejo 31

Figura 18. Manifestaciones de la interacción y efecto hidrofóbicos 32

Figura 19. Hidrofobicidad en plantas 32

Figura 20. Representación del anti-reflejo hidrofóbico y superhidrofóbico..... 34

Figura 21. Proceso fabricación del agua destilada, montaje rudimentario de destilador..... 35

Figura 22. Gotas agua de lluvia 36

Figura 23. Agua de grifo..... 37

Figura 24. Tablero tipo ajedrez, 2,0 mm de lado y área de 4,0 mm² 45

Figura 25. Esquema del montaje experimental..... 46

Figura 26. Lectura de las 20 imágenes para la calibración..... 47

Figura 27. Detección de las esquinas en cada una de las imágenes..... 47

Figura 28. Gráfico de las cuadrículas en un plano en perspectiva tridimensional..... 48

Figura 29. A la izquierda imágenes originales sin corrección y a la derecha imágenes corregidas 50

Figura 30. Imagen de la gota sobre la superficie del lente oftálmico, adquirida con la cámara CMOS, sin corregir las aberraciones de distorsión (a) y corrigiendo dichas aberraciones (b)..... 51

Figura 31. Gota sobre la superficie del lente 52

Figura 32. a) Imagen filtrada de la adquisición realizada con la cámara. b) Región o zona de estudio para procesar digitalmente..... 52

Figura 33. Binarización y métodos de detección de bordes utilizados para el estudio..... 53

Figura 34. Puntos determinados con el método de Roberts sobre la curvatura de uno de los lentes oftálmicos..... 54

Figura 35. Detección del ángulo de contacto..... 55

Figura 36. a) Lentes oftálmicos clasificados según la casa comercial, material y recubrimiento. b) Adquisición de imágenes 57

Figura 38. Casa comercial Megalens lente con recubrimiento hidrofóbico y material policarbonato. Ángulos de contacto determinado entre la superficie del lente y las gotas de agua de lluvia, grifo y agua destilada 58

Figura 37. Casa comercial Megalens lente con recubrimiento hidrofóbico y material Cr-39. Ángulos de contacto determinados en la superficie del lente y las gotas de los tres tipos de agua a, b, c..... 57

Figura 39. Casa comercial Megalens lente con recubrimiento superhidrofóbico y material Cr-39. Medida del ángulo de contacto en la superficie del lente para los tres tipos de agua utilizadas en la investigación 58

Figura 40. Casa comercial Megalens lente con recubrimiento superhidrofóbico policarbonato. Medida del ángulo de contacto entre la superficie del lente y las gotas de agua utilizadas en el estudio 59

Figura 41. Casa comercial Unilentes lente con recubrimiento hidrofóbico Cr-39. Medida del ángulo de contacto entre la superficie del lente y las gotas de agua utilizadas en el estudio 59

Figura 42. Casa comercial Unilentes lente con recubrimiento hidrofóbico Policarbonato. Medida del ángulo de contacto entre la superficie del lente y las gotas de agua utilizadas en el estudio . 60

Figura 43. Casa comercial Unilentes lente con recubrimiento superhidrofóbico Cr-39. Medida del ángulo de contacto entre la superficie del lente y las gotas de agua utilizadas en el estudio . 60

Figura 44. Casa comercial Unilentes lente con recubrimiento superhidrofóbico Policarbonato. Medida del ángulo de contacto entre la superficie del lente y las gotas de agua utilizadas en el estudio 60

Figura 45. Distribución de la frecuencia de lentes y tipos de aguas empleadas 61

Figura 46. Hojas de loto y canna indica superhidrofóbicas 64

Figura 47. Ángulo de contacto en lente con superficie superhidrofóbica. 66

Figura 48. Ángulo de contacto para superficies hidrofóbicas que no cumplen la condición de hidrofobicidad. 67

Figura 49. Detección del ángulo de contacto con error en la iluminación. 69

Lista de apéndices

Apéndice A. Prueba piloto 77

Apéndice B. Base de datos..... 82

Resumen

Objetivo: Analizar el ángulo de contacto de los lentes de oftálmicos con recubrimiento superhidrofóbico e hidrofóbico que son expuestos a diferentes sustancias líquidas.

Metodología: Es un estudio cuantitativo tipo ensayo de laboratorio donde se realizaron 52 montajes y se llevaron a cabo las pruebas con los diferentes tipos de agua (agua destilada, de grifo, de lluvia), comprobando la efectividad de los recubrimientos hidrofóbicos y superhidrofóbicos en lentes oftálmicos de materiales CR-39 y Policarbonato. La medición se realizó por medio del método de detección de bordes y las imágenes fueron procesadas utilizando el software MATLAB R2021a. Se tuvo en cuenta las siguientes variables: Casas comerciales (X, Y), recubrimiento de los lentes oftálmicos, el material de los lentes, los diferentes tipos de agua, la medida del ángulo de contacto y el método de detección de bordes. Para las variables cualitativas se realizó un análisis de distribución por frecuencia y para las variables cuantitativas un análisis del tipo de distribución (Coeficiente de asimetría y curtosis), cálculo medidas de tendencia central (Media-mediana-moda) y cálculo de medidas de dispersión.

Resultados: Se realizó un proyecto de grado donde se evidenció la efectividad y variación del ángulo de contacto en recubrimiento superhidrofóbicos e hidrofóbicos al estar en contacto con diferentes tipos de agua, presentando resultados que oscilaron entre $34,8^\circ$ y $81,7^\circ$ respectivamente, obtenidos durante los montajes experimentales, los cuales sirven como base para dar una recomendación y un buen tratamiento óptico a los pacientes.

Palabras clave: Hidrofóbico, Superhidrofóbico, Lentes oftálmicos, Detección de bordes, Ángulo de contacto.

Abstract

Objetivo: Analyze the wetting angle of ophthalmic lenses with superhydrophobic and hydrophobic coating that are exposed to different liquid substances.

Methodology: It is a quantitative laboratory test type study where 52 assemblies were made and tests were carried out with different types of water (distilled water, tap water, rainwater), testing the effectiveness of hydrophobic and superhydrophobic coatings on ophthalmic lenses made of CR-39 and Polycarbonate materials. The measurement was performed by means of the edge detection method and the images will be processed using MATLAB R2021a software. The following variables were considered: commercial houses (X, Y), ophthalmic lens coating, lens material, different types of water, contact angle measurement and edge detection method. For qualitative variables a frequency distribution analysis was performed and for quantitative variables an analysis of the type of distribution (coefficient of asymmetry and kurtosis), calculation of measures of central tendency (mean-median-mode) and calculation of measures of dispersion.

Results: A degree project was carried out where the effectiveness and variation of the contact angle in superhydrophobic and hydrophobic coating was evidenced when in contact with different types of water, presenting results that ranged between $34,8^{\circ}$ and $81,7^{\circ}$ respectively, obtained during the experimental assemblies, which serve as the basis for giving a recommendation and a good optical treatment to patients.

Keywords: Hydrophobic, Superhydrophobic, Ophthalmic lenses, Edge detection, Contact angle.

Introducción

Dentro de las labores del optómetra se encuentra principalmente el cuidado primario visual, evaluando y determinando las disfunciones refractivas, acomodativas y motoras. Una vez identificadas estas disfunciones deben ser tratadas para mejorar el rendimiento visual según lo requerido por el paciente. Dentro de los dispositivos más empleados se encuentran, los lentes oftálmicos, los cuales son diseñados para corregir los defectos refractivos y responder a las necesidades tales como la protección de rayos UV, prevenir la radiación luminosa azul (ciertas longitudes de onda en este rango espectral), mejoras en el deslumbramiento, entre otras.

Los fabricantes y/o laboratorios de lentes en todo momento están a la vanguardia de mejorar la calidad de estos lentes, sin modificar las propiedades ópticas necesarias para la corrección. Entre las modificaciones realizadas a los lentes está el colocar y/o aplicar recubrimientos fotocromáticos, películas delgadas denominadas antirreflejos, en la parte frontal y posterior de dichos lentes oftálmicos, además de capas para proteger la superficie del lente al estar en contacto con sustancias líquidas o fluidos.

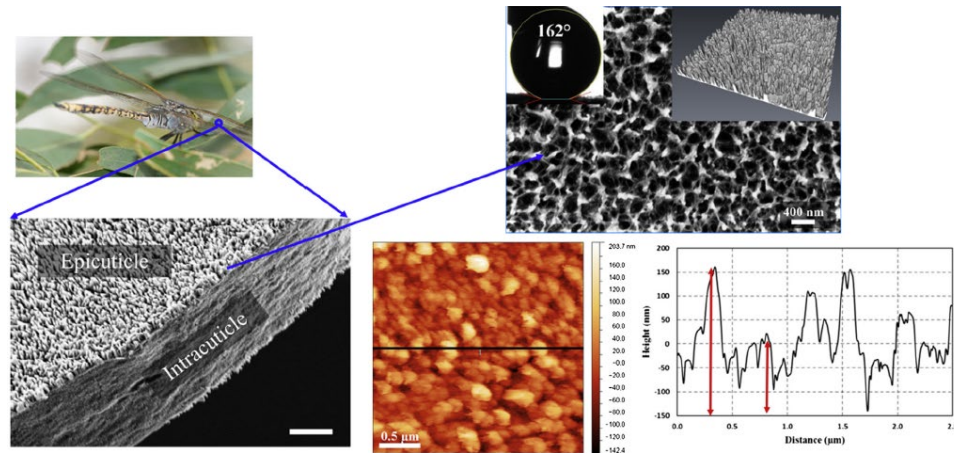
Respecto al contacto de fluidos con la superficie de los lentes, cabe precisar que esa acción genera un ángulo de contacto, producto de la relación interfacial entre las dos superficies, las interacciones químicas o físicas, y a su vez proporciona información de como formar un equilibrio entre estas dos fases. Por otra parte, la hidrofobicidad es una barrera invisible que fácilmente deja resbalar agua de los lentes, manteniendo altos niveles de visión y claridad (1). Dando así los datos para la determinación del ángulo de contacto y la hidrofobicidad que hay entre la sustancia y el recubrimiento (2). Un ángulo de contacto bajo permite que la gota líquida se esparza más uniforme sobre la superficie sólida y un ángulo de contacto alto no permite que la gota de agua se esparza (3).

La hidrofobicidad y superhidrofobicidad en superficies sólidas ha sido un tema de varios años de investigación, y corresponde a la medida de la mojabilidad de un sólido o un líquido (4), (por ejemplo, en e.g Ma and Hill, 2006; Quéré, 2002; shirtcliffe et al., 2010) (4-7), de donde se obtiene que la superhidrofobicidad como fenómeno presenta aspectos fundamentales tales como la química de las superficies, la física-química y la biología celular.

Además, “su importancia para el comportamiento de los sistemas naturales, la dinámica de fluidos interfaciales y la biotecnología representa un área que está ganando rápidamente una importancia potencial.” (8). La superhidrofobicidad puede llegar a desenlazar otros fenómenos como la autolimpieza, en donde una gota de agua al entrar en contacto con una superficie sólida y atravesar esta, se apoya y va reuniendo el polvo u otras partículas a través de una absorción. Mediante el ángulo de contacto se pueden identificar las propiedades de una superficie sólida que tan hidrofóbica o hidrofílica puede llegar a ser, y cuantificar su tendencia entre las fases sólidas y líquidas (9), (por ejemplo, en Bico et al., 2001; Quéré, 2008) (10, 11), señalan que la rugosidad de la superficie tiene un efecto profundo en el comportamiento de humectación, en especial a través de ángulos de contacto aparentes y la histéresis posterior del ángulo de contacto.

Uno de los ejemplos en los que se puede evidenciar el comportamiento del fenómeno de superhidrofobicidad es el que se observa en la figura 1, propuesto por (Ivanova et al., 2013b; Nishimoto Y Bhushan, 2013) (12, 13) en el cual se puede ver la superficie del ala de la libélula, la cual está cubierta por una serie de nanopilares que forman una estructura fractal, dicha estructura permite que la superficie retenga bolsas de aire cuando entra en contacto con el agua, dando la capacidad de autolimpieza de las alas de la libélula por el ángulo de contacto bajo que forma.

Figura 1. *Morfología superficial del ala de la libélula*



Adaptado de 3er congreso internacional de Tecnología Informática Electrónica (12).

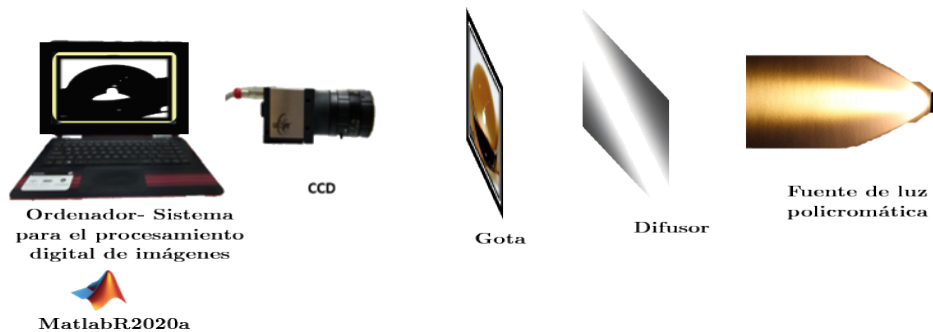
La interpretación que se debe tener en cuenta al momento de medir el ángulo de contacto es, cuando $\theta < 90^\circ$, debido que la tensión sólido gas γ_{SG} es mayor que la tensión sólido líquido γ_{SL} o ($\gamma_{SG} > \gamma_{SL}$), se dice que el líquido moja al sólido o que el sistema moja. El sistema no moja cuando $\theta > 90^\circ$, en este caso, el líquido no moja al sólido. Un caso extremo ocurre cuando θ se aproxima a cero, entonces el líquido se expande sobre el sólido y se dice que el mojado es perfecto (14).

El grado hasta el cual se desarrollan estas reacciones depende de la naturaleza de las sustancias que participan en el mojado, así como de factores cinéticos. Si θ es aparentemente independiente del tiempo o alcanza rápidamente un valor constante, se concluye que en el sistema investigado se produce un mojado no reactivo (14).

Existen varios métodos y/o formas de realizar la medida aproximada del ángulo de contacto, como el método de la gota sésil, método fotográfico, método de detección de bordes, entre otros. En esta investigación para la medición del ángulo de contacto se empleó la del método óptico de detección de bordes, el cual es uno de los procedimientos más aplicados en el

procesamiento de imágenes digitales, la mayoría de los algoritmos de detección de bordes son métodos binarios. Este funciona según la cantidad de bordes en un área específica de la imagen (15), con este método se realizó la medición de los bordes de los diferentes lentes utilizados, para realizar las respectivas mediciones se utilizó los operadores más empleados en dicho método, que fue el operador de Roberts, el cual ofrece buena respuesta ante bordes diagonales y el operador de Prewitt, Sobel y Frei-Chen, este operador es menos sensible al ruido y tiene buena respuesta a la mayoría de los bordes existentes (16). También se implementó un sistema óptico para la adquisición de las imágenes, compuesto por una cámara CMOS marca Edmund Optics con resolución de $1600 \text{ píxeles} \times 1200 \text{ píxeles}$, posteriormente las imágenes fueron procesadas utilizando el software MATLAB R2021a. En la figura 2 se muestra el esquema representativo del montaje experimental que se implementará.

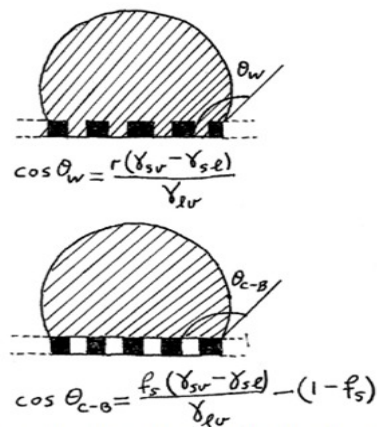
Figura 2. Esquema representativo del montaje experimental a implementar



Teniendo en cuenta lo anterior, surge la pregunta de investigación ¿Cuál es la medida del ángulo de contacto en recubrimientos superhidrofóbicos e hidrofóbicos de lentes oftálmicos ante diferentes sustancias líquidas a través del método óptico de detección de bordes?

Para comprender conceptos como hidrofobicidad y el ángulo de contacto el cual está relacionado con las tensiones, representadas por la letra gamma γ , tensión-sólido/gas γ_{SG} , tensión-sólido/líquido γ_{SL} y tensión-líquido/gas γ_{LG} , respectivamente, a través de la ecuación de Young, Wenzel y Cassie-Baxter, ecuaciones [1] y [2] (7), donde en la ecuación [1] (figura 4) hace referencia un aumento puramente geométrico en el área de la superficie real con respecto a su área proyectada generalmente denominada estado de Wenzel (7) y en la ecuación [2] (figura 5) un efecto interfacial compuesto que surge de un aire –interfaz de agua cuando el aire queda atrapado entre las características microestructurales de la superficie por delante del frente húmedo que avanza formando un estado de Cassie-Baxter (7), ya que con base en estos modelos se puede entender como la energía y la estructura superficial pueden influenciar el ángulo de contacto que tiene una gota de líquido sobre una superficie sólida. Un ejemplo grafico se muestra en la figura 3, donde se encuentran los estados clásicos de los 3 autores anteriormente mencionados.

Figura 3. *Ángulos de contacto en superficies estructuradas en los estados clásicos de Wenzel (W) y Cassie – Baxter (C – B), respectivamente, donde r es la amplificación física del área superficial debido a la rugosidad y fS es el área fraccional en contacto con el aire*



Adaptado de introducción a la superhidrofobicidad (7).

Figura 4. *Estado de Wenzel*

$$\cos\theta_w = \frac{r(r_{sv}-r_{sl})}{r_{lv}} \quad [1]$$

Adaptado de introducción a la superhidrofobicidad (7).

Figura 5. *Estado de Cassie-Baxter*

$$\cos\theta_{C-B} = \frac{f_s(r_{sv}-r_{sl})}{r_{lv}} - (1 - f_s) \quad [2]$$

Adaptado de introducción a la superhidrofobicidad (7).

En este caso las superficies sólidas que se utilizaron fueron las de lentes oftálmicos con recubrimiento superhidrofóbico, el cual es un tratamiento utilizado en las lentes oftálmicas cuya capa es la que facilita la limpieza del lente, ya que este revestimiento permite el rechazo del agua y la grasa (17). Existen diferentes tipos de revestimiento superhidrofóbico como puede ser el antirreflejo hidrofóbico, AR clean superhidrofóbico y AR uniclear superhidrofóbico.

Los lentes que fueron objeto de interés en el presente proyecto corresponden a las siguientes casas comerciales: Unilentes, Megalens, las cuales son utilizadas en la clínica de optometría seccional Bucaramanga, de cada casa comercial se emplearon 2 tipos de lentes de materiales: CR-39 y Policarbonato, teniendo así dos lentes con filtro hidrofóbico y dos lentes con filtro superhidrofóbico. Se centró el estudio en los materiales más utilizados y recomendados frecuentemente en la clínica de Optometría.

Actualmente, en la Facultad de Optometría no se han realizado investigaciones respecto a la medida de las superficies y/o recubrimientos en los lentes oftálmicos, aportando así esta investigación información relevante para los académicos respecto a la medida del ángulo de contacto en lentes oftálmicos que presentan características de recubrimientos superhidrofóbicos e hidrofóbicos, los cuales se recetan a los pacientes (usuarios) para que estos los utilicen gran parte del tiempo, dando a los estudiantes de la Facultad de optometría el conocimiento respecto a este tipo de películas antirreflejo para poder realizar la mejor prescripción de las fórmulas para cada uno de los potenciales pacientes que tendrían en un futuro.

Por otra parte, este conocimiento permitirá, posiblemente, generar ideas en los optómetras para mejorar y/o realizar indicaciones a los fabricantes, que sirvan para perfeccionar la calidad de los lentes y así generar en los usuarios mayor protección y comodidad al momento de utilizarlos y satisfacer las necesidades ópticas del paciente.

1. Objetivo general

Analizar el ángulo de contacto de los lentes de oftálmicos con recubrimiento superhidrofóbico e hidrofóbico que son expuestos a diferentes sustancias líquidas en Bucaramanga en el año 2021.

1.1 Objetivos específicos

- Describir las características del recubrimiento superhidrofóbico e hidrofóbico de los lentes oftálmicos.
- Identificar las diferentes características físicas entre el agua del grifo, el agua destilada y el agua lluvia.

2. Marco teórico

2.1 Ángulo de contacto

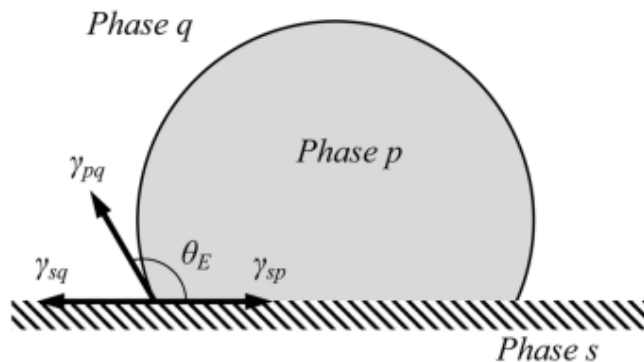
El ángulo de contacto se considera importante debido a que gracias a este se sabrá el valor entre el plano de una superficie sólida y la tangente de una superficie líquida, dicho ángulo se puede hallar con cuatro ecuaciones claves las cuales son: la ecuación de Young [3] (figura 6) para superficies solidas ideales, es decir, un sistema fluido-líquido-sólido a escala macroscópica y sobre una superficie lisa, tal como se muestra en la figura 7.

Figura 6. Ecuación de Young

$$\cos\theta^Y = \frac{\sigma_{SV} - \sigma_{SL}}{\sigma_L} \quad [3]$$

Adaptado de humectación y aspereza (11).

Figura 7. Fenómeno de humectación ideal de la fase líquida (p) y la fase fluida (q) en una fase sólida (s)



Adaptado de estudio científico sobre el ángulo de contacto de una gota líquida sobre una superficie rugosa, Revista Scopus (19).

El problema de la ecuación de Young es que no tiene en cuenta la rugosidad de una superficie, pues en la realidad las superficies no son del todo lisas, debido a esto nace la ecuación de Wenzel [4] (figura 8), que tiene en cuenta la rugosidad de la superficie sólida, la ecuación de Cassie [5] (figura 9), que describe el caso de una superficie solida heterogénea (lisa) y por último la ecuación de Cassie-Baxter [6] (figura 10), la cual es utilizada cuando un líquido sentado encima de una superficie solida texturizada con aire atrapado debajo (10). En la figura 11 se muestra una representación gráfica de los modelos de Wenzel y Cassie-Baxter.

Figura 8. *Ecuación de Wenzel*

$$\cos\theta^W = r\cos\theta^Y$$

[4]

Adaptado de humectación y aspereza (11).

Figura 9. *Ecuación de Cassie*

$$\cos\theta^C = f_1\cos\theta_1^Y + f_2\cos\theta_2^Y$$

[5]

Adaptado de humectación y aspereza (11).

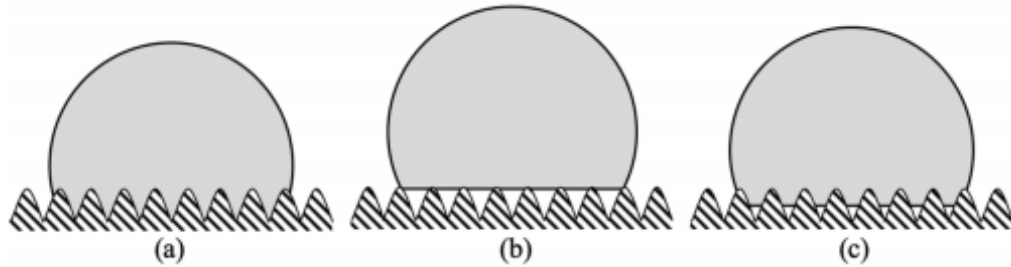
Figura 10. *Ecuación de Cassie-Baxter*

$$\cos\theta^{CB} = f_1\cos\theta^Y - f_2$$

[6]

Adaptado de humectación y aspereza (11).

Figura 11. *Humedecimiento sobre superficies rugosas: (a) el modelo de Wenzel que muestra la fase líquida llenando completamente los valles, (b, c) El modelo de Cassie-Baxter que muestra la fase líquida sobre los picos de la superficie sólida y el llenado de líquido parte del valle con aire queda atrapado debajo*



Adaptado de estudio científico sobre el ángulo de contacto de una gota líquida sobre una superficie rugosa, Revista Scopus (19).

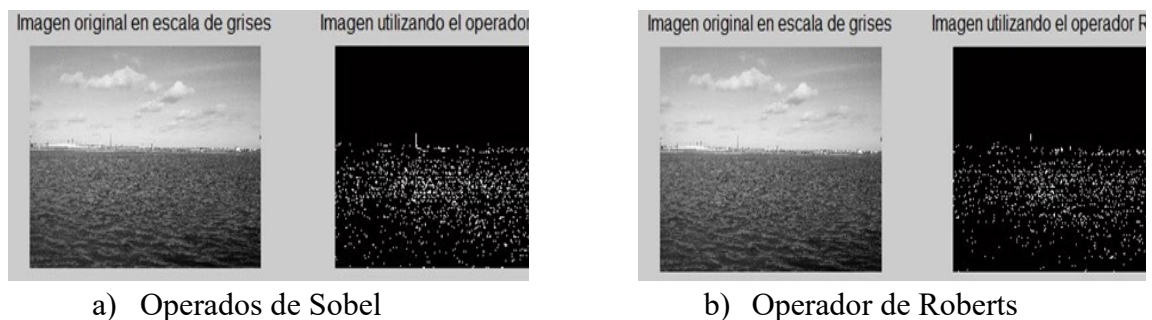
Los ángulos de contacto se miden a través de la fase más densa y pueden asumir cualquier valor entre 0° y 180° (18), el comportamiento de este ángulo va a depender de la humectabilidad implícita del sólido y las propiedades espaciales de la rugosidad de la superficie, es decir, están implicados datos como las composiciones de sólidos (propiedades fisicoquímicas de la superficie), líquidos y fluidos reflejados por las energías superficiales de las interfaces y sólido (19).

2.2 Método de detección de bordes

La detección de bordes es un elemento clave que se implementa para la visión artificial, debido a que es un proceso de alta importancia en el reconocimiento de la imagen, esta debe ser procesada para transformarse en un conjunto de curvas conectadas que separan objetos (12), es decir, son píxeles con alta variación en la escala de grises que se encuentran en la imagen a procesar y cuentan con una variación causa de ruido (7). Enfoques convencionales como el operador de Sobel, Prewitt y Roberts, son operadores de primera derivada que según el tamaño de la imagen el tiempo del cálculo aumenta.

Los operadores de Sobel al igual que los operadores de gradiente suavizan la imagen de tal manera que se elimina un poco de ruido de la imagen, es decir, puede desvanecer los falsos bordes que aparezcan. El operador de Prewitt es similar al de Sobel, es decir, pero su máscara es diferente, estos dos operadores son los más precisos y completos. El operador de Roberts a diferencia de los dos anteriores, solo marca dos puntos en cada máscara, es más simple y funciona bastante bien para imágenes binarias (7). La desventaja de este es que fácilmente se puede perder información sobre los bordes, lo que resulta en bordes discontinuos y no lisos. Otro punto es que es difícil suprimir el ruido, una clara representación del operador Sobel y Roberts se muestra en la figura 12.

Figura 12. *Operador de Sobel y Roberts*

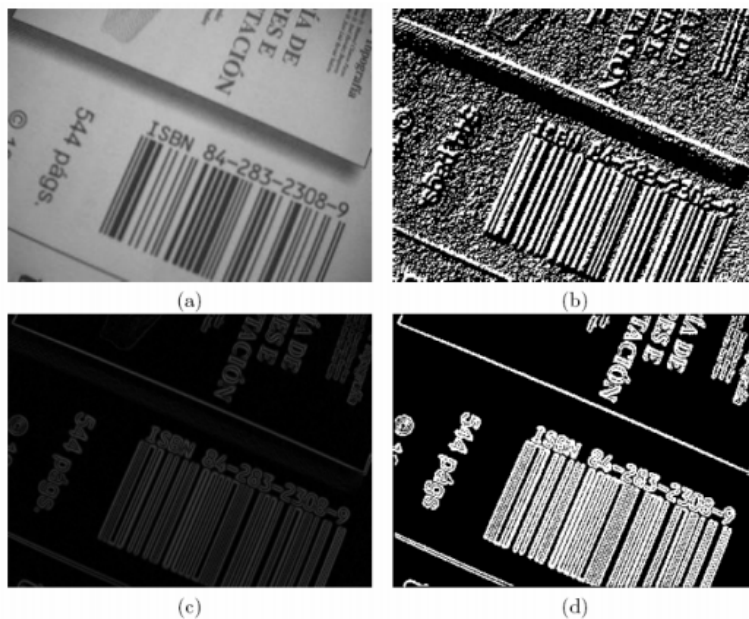


Adaptado de ICECT 2011 - 2011 3er Congreso Internacional de Tecnología Informática Electrónica (12).

La idea principal de estos métodos es utilizar un operador diferencial para calcular una expresión derivada de primer orden, como la magnitud del gradiente, y luego buscar el máximo direccional local de la magnitud del gradiente. No existe un algoritmo de detección universal presente en la literatura que puede detectar todas las escalas de bordes, independientemente de su forma, tipo de imagen, etc. Los métodos de detección de bordes dependen de la imagen y su propósito es encontrar las discontinuidades presentes en la escala de grises (20).

El método principal para desarrollar el rendimiento de los algoritmos del operador universal es para reducir el ruido mediante filtros. El operador Canny ha mejorado la capacidad de suprimir el ruido y suavizar los bordes con filtro gaussiano, este puede equilibrar la supresión de ruido y detección del borde y tiene un buen rendimiento para la detección de bordes, como se observa en la figura 13.

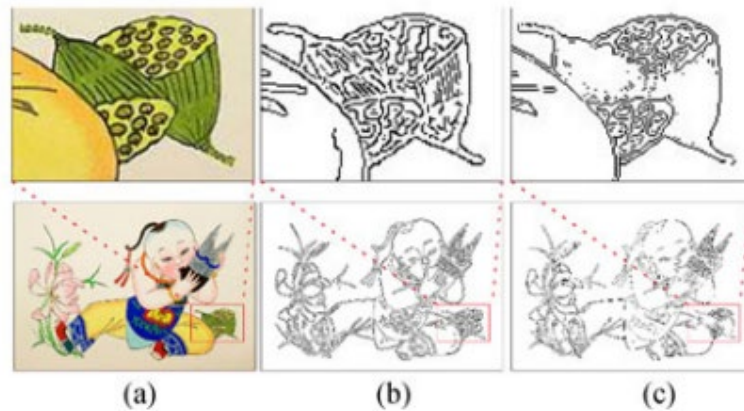
Figura 13. *Detector de bordes de Canny. (a) imagen original, (b) orientación, (c) supresión no máxima, (d) histéresis de umbral*



Adaptado de Detección de bordes mediante el algoritmo de Canny (55).

Sin embargo, para reducir el ruido con algún filtro hará que la imagen sea borrosa. Además, el operador de Canny no puede mantener buenos resultados en el espacio multiescala, es decir, si cambiamos la escala de las imágenes, los bordes de su resultado no mantendrán una buena continuidad y suavidad (21), tal como se muestra en la figura 14.

Figura 14. *Los algoritmos de detección de bordes existentes detectan los resultados en cómics, pinturas al óleo y grabados. (a) Las imágenes artísticas originales. (b) Los resultados obtenidos por el operador de Canny. (c) Los resultados obtenidos por los operados de Sobel*



Adaptado de la revista IEEE Photonics J (21).

Este último operador consiste en un algoritmo, el cual se desarrolla a través de tres pasos:

- Obtención del gradiente: En este paso se calcula la magnitud y orientación del vector gradiente en cada píxel (54).
- Supresión no máxima: En este paso se logra el adelgazamiento del ancho de los bordes, obtenidos con el gradiente, hasta lograr bordes de un píxel de ancho (54).
- Histéresis de umbral: En este paso se aplica una función de histéresis basada en dos umbrales; con este proceso se pretende reducir la posibilidad de aparición de contornos falsos (54).

2.3 Lentes oftálmicos

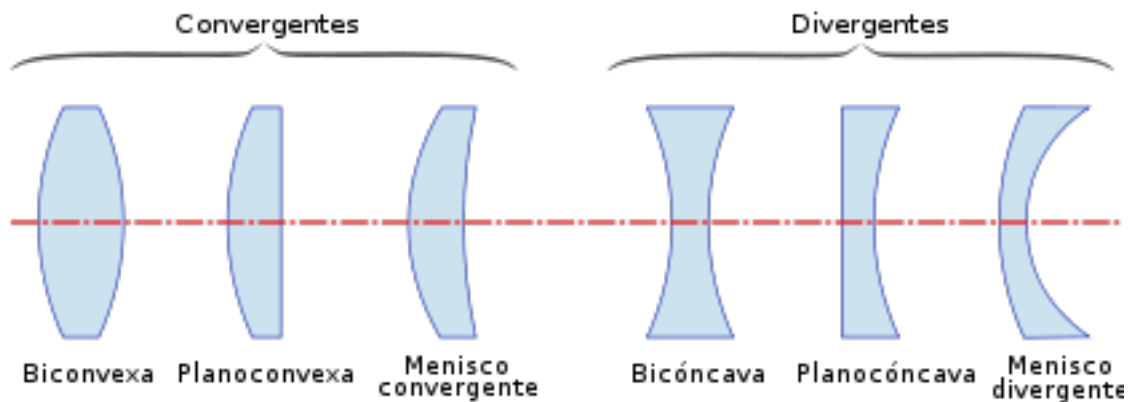
Los lentes oftálmicos están destinados a corregir defectos refractivos como lo son la miopía, hipermetropía, astigmatismo y presbicia (14), pero los lentes oftálmicos no se utilizan solamente para corregir los defectos refractivos sino también para proteger los ojos contra exposiciones peligrosas (15).

Es muy importante conocer las características de los lentes oftálmicos para poder trabajar y emplearlos de una manera correcta; ya que la lente oftálmica puede ser de contacto, una lente intraocular fáquica o afáquica, una lente comprende una zona óptica, la cual tiene una primera superficie y una segunda superficie opuesta las cuales incluyen una aberración de frente de onda similar a una coma vertical, desde la parte inferior a la parte superior de la lente (16), la lente oftálmica puede ser:

- **Cóncava:** La cual es más fina en el centro que en los bordes, es decir, que los rayos de luz divergen y se puede corregir la miopía (14).
- **Convexa:** La cual es más gruesa en el centro que en los bordes, es decir, que los rayos de luz convergen y se puede corregir la hipermetropía (14).
- **Tórica:** La cual es cuando la curvatura del lente no es esférica, tiene distintos radios de curvatura, este tipo de lente corrige el astigmatismo (14).

Un ejemplo gráfico de los diferentes tipos de lentes oftálmicas según su superficie se puede observar en la figura 15.

Figura 15. Tipos de lentes oftálmicos según su superficie



Adaptado de óptica Rosales (22).

Se debe conocer los tipos de lentes que se podrán encontrar en el mercado primeramente se encuentra uno de los más utilizados, el cual es el lente monofocal, que cuenta con la misma potencia en la parte principal de la lente está caracterizado porque comprende un cambio continuo de curvatura decreciente de la lente, este tipo de lente está alineado entre sí para que la potencia efectiva de la parte superior de la lente sea constante (17).

Otro gran grupo de lentes que se puede encontrar en el mercado es la lente bifocal los cuales tienen dos graduaciones diferentes que corrigen errores o defectos refractivos en la visión cercana y lejana, colocando la graduación de cerca en la parte inferior del cristal y la de lejos en la superior. En el caso de las bifocales hay solo una pequeña zona abajo dedicada a la visión de cerca, y todo el resto a visión lejana.

Hay bifocales que solo cuentan con la corrección en la parte de abajo y la de arriba se mantiene sin graduar, para personas que no tienen más necesidades visuales. Aunque cuenta con un campo de visión de cerca y de lejos no cuenta con visión intermedia, es decir, salta de un campo de visión a otro de una manera abrupta. Es una lente que no ofrece una visión natural y cuesta bastante adaptarse (23).

Una nueva tecnología con características similares que el lente bifocal pero más moderno es la lente multifocal las cuales están compuestas por lentes que varían la frecuencia dependiendo de la posición focal del ojo ya que cuenta con enfoques múltiples, la parte que ve la distancia y la parte que ve de cerca, esta tecnología se emplea para que el paciente pueda ver bien independientemente de la distancia (24). Estas lentes están diseñadas para corregir distintos problemas como la vista cansada, la miopía, la hipermetropía y el astigmatismo, tiene tres focos de visión que aumentan gradualmente y que permiten:

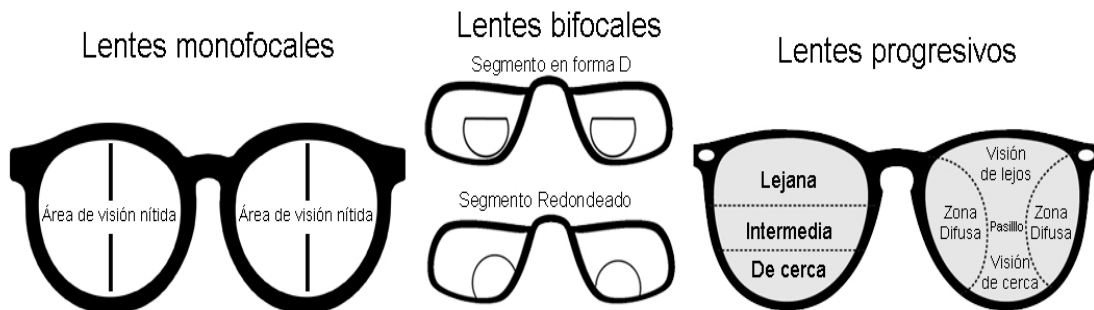
- Ver bien de lejos por la parte superior del cristal o lente (25).

- Ver bien a distancias intermedias por la parte media del cristal (25).
- Ver bien de cerca por la parte inferior de la lente (25).

Hay una gran variedad de lentes multifocales, pero principalmente podemos diferenciar entre progresivo convencional y de alta gama o tallado digital. En las lentes convencionales la progresión se talla en la cara externa de las lentes y no se tienen en cuenta parámetros individuales para su fabricación (25).

En las lentes de tecnología digital, en cambio, el tallado se realiza punto a punto mediante un avanzado software que calcula ambas caras de la lente, con la progresión en la interna. Esta técnica permite tener un campo visual más amplio, una visión más nítida y menos aberraciones laterales (25), tal como se muestra en la figura 16.

Figura 16. Tipos de lentes graduados monofocales, bifocales y progresivos



Adaptado de Meditegic (27).

Pero las gafas con lentes multifocales afectan negativamente la visión, ya que aumentan el riesgo de caída y contribuye a los cambios en la marcha. Los usuarios nuevos a este tipo de lente manifiestan un desafío importante para adaptarse a este tipo de lente ya que no se comprende bien las instrucciones dadas por el profesional (26).

2.4 Materiales de los lentes oftálmicos

El mercado actualmente ofrece una amplia gama de materiales para la creación de los lentes oftálmicos, con características específicas, propiedades y demás para ofrecer al público una excelente calidad óptica y mejores resultados estéticamente. Dentro de los aspectos que se deben tener en cuenta de los materiales oftálmicos se encuentra en índice de refracción, donde se pueden encontrar altos, medios y bajos, también el número Abbe, su densidad, el espesor, la resistencia a los impactos y la protección UV, entre otros.

En la producción de los lentes oftálmicos se pueden encontrar diversos materiales primeramente el CR-39, el cual es un polímero termoestable muy común y se puede encontrar fácilmente en el mercado, es reconocido por ser el primer material orgánico del mercado, muestra un índice de refracción más bajo en el mercado (1,49 a 1,523) (28). Es un material estable, duro, no se raya tan fácil, cuenta con un número Abbe de 58-59, tiene buena calidad óptica, baja dispersión cromática y se deja colorear muy bien de 0,25 a 3. Sus desventajas radican en que es más pesado, grueso, no incluye protección UV, tiene baja resistencia al impacto y limitación en las monturas (29).

Luego encontramos el policarbonato que se caracteriza por su peso liviano, por ser orgánico (plástico), es un material que incluye protección a los rayos UV (30), es una buena opción para niños por su resistencia a roturas (31). Es un termoplástico que se inicia como un material sólido en forma de pequeñas bolitas y en un proceso llamado moldeo por inyección, los gránulos se calientan hasta que se funden. El material líquido se inyecta rápidamente en moldes de lentes, se comprime a alta presión y se enfría para formar un lente acabado. Su nombre se debe a que se trata de polímeros que presentan grupos funcionales unidos por grupos carbonato en una larga cadena molecular. Tiene un índice de refracción 1,59. Son más livianos que el CR 39, tiene buen

aislamiento térmico, buena resistencia a los impactos y estabilidad dimensional, cuentan con una baja resistencia química, no son tenteables, son susceptibles al rayado en comparación a otros lentes y presentan una alta dispersión de la luz, debido a que su número Abbe es de 32.

Uno de los materiales que más se destaca es el trivex, ya que es supremamente liviano cuenta con un índice de refracción de 1,53 es un polímero de poliuretano que se obtiene a través de la copolimerización de disotiocianato y monómeros de politol (32). Esto le da la ventaja al material ya que ofrece una óptica más nítida que las lentes de policarbonato, cuenta con un número Abbe de 45. Es el material más liviano del mercado y su resistencia se puede comparar con la del policarbonato, este tipo de material cuenta con la norma Z87,1 (lentes para uso industrial) de la American National Standards Institute, la cual define la importancia y requisitos en seguridad industrial de todas las labores y oficios. También tienen mayor resistencia química al contacto con alcohol, acetona y disolventes (29).

Dentro del mercado, encontramos otro material orgánico de índice medio (1,56/1,57), es un polímero de índice medio, buena calidad óptica, cuenta con un número Abbe de 43, liviano, tiene filtro UV, diseño esférico, cuenta con una capa de protección al rayado y su resistencia al impacto es bajo, pero mejor que el CR 39 (33).

Entre los materiales con un número de índice de refracción alto se encuentra: Alto índice 1,67, el cual es un polímero de poliuretano que se obtiene a través de la copolimerización de disotiocianato y monómeros de politol. Su densidad es de 1,35 g/cm³ y presenta menor calidad óptica debido a la dispersión cromática, ya que tiene un número Abbe de 34. Tiene una mayor flexión que los lentes con índice de refracción de 1.498, pero menor que el policarbonato. Se logra que sea más plano, delgado y liviano que los convencionales con diseños esféricos para mayor comodidad y estética (33).

Por otro lado, se encuentra: Alto índice 1,70 a 1,74, estos normalmente se generan a partir de polímeros de politiosulfuro. Uno de sus principales inconvenientes es que presentan una alta dispersión cromática ($Abbe = 32$), dando lugar a una menor calidad óptica. La principal ventaja es que son lentes estéticamente favorables, por su espesor central, con independencia de si la fórmula es negativa o positiva. Otra característica de estos lentes es que generalmente se hacen con diseños esféricos, requieren tratamiento de antirreflejo y ofrece baja protección al impacto (33).

2.5 Filtros o recubrimientos

Hoy en día hay una variedad de tecnologías disponibles para recubrir sustratos como vidrio o polímero con películas delgadas de varias capas para crear filtros ópticos, los recubrimientos ópticos fabricados con tecnologías de película fina se utilizan ampliamente para una variedad de aplicaciones que incluyen lentes oftálmicos y anteojos para corregir la visión y con fines terapéuticos. Los sustratos poliméricos en combinación con tecnologías de recubrimiento brindan una variedad de beneficios que incluyen resistencia al rayado, protección UV, estabilidad de temperatura y permeación controlada (34).

El uso de filtros y recubrimientos en los lentes oftálmicos es de suma importancia, ya que son los que nos van a ayudar a proteger la salud visual del paciente, tal como se muestra en la figura 17. Entre los diferentes filtros encontramos: el antirreflejo (AR), el cual es uno de los más utilizados ya que aumenta la transparencia del lente, elimina los reflejos, disminuye el deslumbramiento, la fatiga visual, entre otras. El filtro Anti-rayas es otro de los recubrimientos, este ofrece una mayor protección de los lentes y dureza (33).

Figura 17. *Lente oftálmico con antirreflejo*



Existen varios tipos de filtros y recubrimientos, pero en el que se trabajara para encontrar el ángulo de contacto con ayuda del método de detección de bordes será con el AR hidrofóbico y superhidrofóbico, este tratamiento último permite a la lente repeler impurezas de cualquier tipo, ya que esta tecnología crea una barrera invisible que fácilmente deja resbalar agua, aceites, grasa, polvo, etc. (33).

2.6 Hidrofóbico y Superhidrofóbico

El efecto hidrofóbico puede observarse en películas delgadas de agua que deshumedecen sustratos hidrófobos, lo que da como resultado una gota con un gran ángulo de contacto, la interacción hidrofóbica es responsable del importante trabajo de adhesión entre superficies sólidas hidrofóbicas, como se muestra en la figura 18 (35).

Figura 18. Manifestaciones de la interacción y efecto hidrofóbicos



Fuerte adhesión entre sólidos hidrófobos superficies (b)
Adaptado de Proc Natl Acad Sci U S A (35).

Fenómeno de deshumectación que conduce a un gran ángulo de contacto (c)

Por muchos años de investigación sobre cómo las interacciones hidrofóbicas afectan las propiedades termodinámicas de procesos como la formación de micelas (autoensamblaje), entre otras. Un claro ejemplo que se demuestra diariamente está en la naturaleza, tal como se muestra en la figura 19.

Figura 19. Hidrofobicidad en plantas



Adaptada de inaturalist (40).

El concepto de superhidrofóbico está integrado en la superficie y permite observar el comportamiento de los sistemas naturales, la dinámica de los fluidos interfaciales y la biotecnología. Las superficies superhidrofóbicas repelentes al agua se determinan mediante un ángulo de contacto con el agua $> 150^\circ$ y una histéresis del ángulo de contacto o ángulo de deslizamiento $< 10^\circ$ (36). Es un fenómeno que ha tenido un foco creciente de investigación y de actividad tecnológica (4, 6, 37). Durante mucho tiempo se ha reconocido que la rugosidad de la superficie tiene efecto profundo sobre el comportamiento de humectación, en particular a través de ángulos de contacto aparente y la histéresis posterior del ángulo de contacto (38, 39).

La dificultad de limpiar (y mantener limpias) las lentes con tratamiento antirreflejante es uno de los principales y más antiguos motivos de queja de los usuarios de lentes. El agua se adhiere con facilidad a los materiales relativamente porosos del tratamiento antirreflejante. Además, los tratamientos antirreflejantes pueden generar electricidad estática durante su limpieza debido al efecto triboeléctrico. Esta electricidad estática puede atraer polvo y partículas de suciedad a la lente que ensucian la superficie e incrementan el riesgo de abrasión (41).

Las capas integradas del tratamiento antirreflejante superhidrofóbico se sellan con una capa de recubrimiento superior final que sirve de barrera protectora contra el entorno y genera a la vez una superficie extremadamente lisa muy fácil de limpiar y de mantener limpia. Este recubrimiento superior ha sido diseñado con un alto contenido en flúor, que concede a la lente unas propiedades hidrorrepelentes (resistentes al agua) extraordinarias obtenidas reduciendo la energía en la superficie de la lente que causa la atracción entre los fluidos y la lente (41).

Los fluidos forman gotas en la superficie, en lugar de adherirse a ella. Este efecto es descrito por el ángulo de contacto de la lente o de la superficie del recubrimiento, que es el ángulo que el borde de una gota de agua forma respecto a la superficie. Como el ángulo de contacto del

tratamiento antirreflejante superhidrofóbico es superior, el tratamiento repele manchas, agua mejor que los tratamientos antirreflejantes hidrofóbicos, como se muestra en la figura 20 (41).

Figura 20. Representación del anti-reflejo hidrofóbico y superhidrofóbico



Adaptado de Características del agua potable. Unidad temática N° 3. 2005 (41).

El antirreflejante superhidrofóbico mantiene sus propiedades hidrorrepelentes durante la vida útil de la lente. Por el contrario, el hidrofóbico pierde sus propiedades hidrorrepelentes a lo largo del tiempo (41).

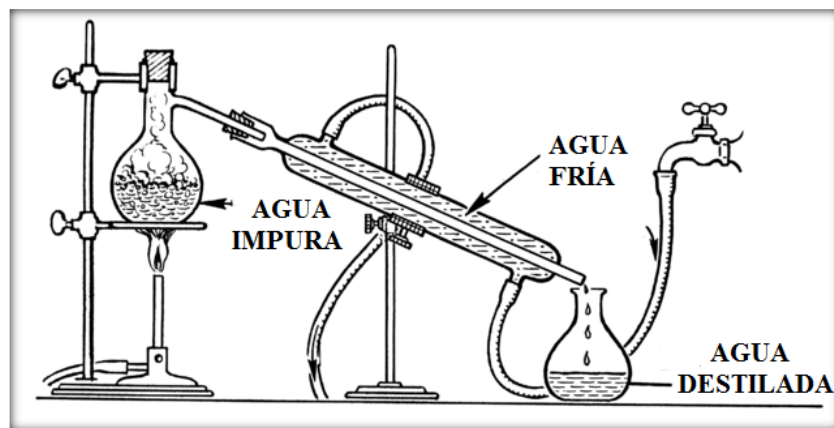
La resina dura sin recubrimiento y los hidrofóbicos pueden acumular una carga considerable de electricidad estática. Sin embargo, gracias a esta tecnología antiestática patentada, el superhidrofóbico genera hasta un 90% menos de electricidad estática. En comparación con el hidrofóbico. El superhidrofóbico mantiene la lente con mucho menos polvo y suciedad que pueden manchar y dañar el tratamiento (41).

2.7 Tipos de agua

Para poder comprobar la efectividad del recubrimiento se utilizarán 3 tipos de agua ya mencionadas en la introducción, pero es importante conocer las propiedades de esta, iniciando por el agua destilada que no es distinta molecularmente del agua ordinaria, sin embargo, este tipo de

agua ha sido despojada de sales minerales que usualmente acompañan el agua común. Dependiendo de su grado de destilación, muchas de las propiedades ordinarias del agua (como su conducción eléctrica) se ven reducidas al salir de la destiladora, por la eliminación de los iones metálicos disueltos en ella, una demostración gráfica del proceso que se utiliza para obtener el agua destilada se muestra en la figura 15. Por eso, además de ser aislante, el agua destilada actúa diamagnéticamente (repele el magnetismo). Contando este tipo de agua con un pH a 20 °C 6,0-7,5, una densidad 20°C 0,998- 1,002 Kg /L, y una conductividad a 20 °C < 10,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (42).

Figura 21. *Proceso fabricación del agua destilada, montaje rudimentario de destilador*



Adaptado de Lifeder, Blog de ciencia (43).

Otro tipo de agua a utilizar es el agua de lluvia como se muestra en la figura 16, el comportamiento de las características químicas de esta agua se determina a partir del seguimiento del pH, conductividad, nitratos y sulfatos, producto del análisis químico. Las lluvias se caracterizan por un pH ácido, entre 4,4 y 5,7. El valor medio de la conductividad eléctrica varía entre 10 y 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$. El contenido de oxígeno disuelto oscila entre 2,8 y 5,4 mg/L. El dióxido de carbono disuelto varía entre 1,0 y 3,2 mg/L. El contenido medio de sales disueltas (TSD) en el agua de lluvia oscila entre 4,9 y 12,9 mg/L (44).

Figura 22. Gotas agua de lluvia



Y por último se utilizó el agua de grifo o agua común que es el agua que tiene la mayoría de las personas en sus casas tal como se muestra en la figura 23, las características físicas del agua de grifo que está más a interés será la turbidez ya que puede tener agentes patógenos adheridos a las partículas en suspensión. Las fuentes de agua superficial varían desde 10 hasta 1.000 unidades de turbidez, Las mediciones de turbidez se basan en las propiedades ópticas de la suspensión que causan que la luz se disperse o se absorba. Este tipo de agua cuenta con un pH 6,5 a 8,5. Estando acompañada de otros componentes como el arsénico, el flúor, mercurio, aluminio, cloruro, cobre, hierro, dato dado según la OMS (45).

Figura 23. *Agua de grifo*

2.8 Marco legal

Se tendrá como base la ley 650 del 2001 por la cual está el reglamento en el artículo 1 que la actividad de la optometría incluye acciones de prevención y corrección de las enfermedades oculares y del sistema visual a través del examen rutinario. Las acciones deberán estar acompañadas de todo el amor, respeto y buena atención que requiere el paciente, el optómetra también como servidor de la sociedad tiene como exigencia del público la atención primaria, dando los servicios de salud de calidad con privacidad y de manera oportuna, de esta misma forma el optómetra no podrá emplear sus conocimientos de manera ilegal, o inmoralmemente y en ningún caso se utilizaran procedimientos que menoscaben el bienestar de los pacientes o de la comunidad (46).

Además, se tendrá en cuenta como base la ley 1915 del 12 de julio de 2018 del artículo 2 en donde los derechos de autor recaen sobre las obras científicas, literarias y artísticas que son comprendidas por toda la creación de espíritu en el campo científico (47).

3. Metodología

El trabajo de grado titulado Determinación del ángulo de contacto en superficies de lentes oftálmicos con recubrimiento superhidrofóbico e hidrofóbico a través del método óptico de detección de bordes, que se encuentra inmerso en el área de investigación de cuidado primario de la salud visual y ocular desde el desarrollo de la optometría basada en evidencia. Teniendo en cuenta las líneas de investigación del Grupo Interdisciplinario de Investigaciones Epidemiológicas en el Sistema Visual GIESVI de la Facultad de Optometría, corresponde a la línea 3, evaluar la efectividad de los tratamientos aplicados con lentes de contacto y lentes oftálmicos, tratamientos sensoriomotores y farmacológicos, utilizados en el manejo de las alteraciones visuales y oculares, que conduzcan a la aplicación de mejores tratamientos para la intervención oportuna y eficaz. Al determinar la eficacia del recubrimiento hidrofóbico y superhidrofóbico de los lentes oftálmicos, estamos evaluando la efectividad que este recubrimiento tiene al momento de ser puesto en el lente oftálmico y ser usado por el paciente, al hacer esta evaluación estamos dando confianza al paciente de usar el lente con este recubrimiento por su efectividad y al optómetra de recomendarlo.

Esta investigación, es un tipo de estudio cuantitativo (ensayo de laboratorio), ya que este proyecto se basó en mayor parte en datos específicos matemáticos para obtener como resultado la efectividad de los lentes hidrofóbicos y superhidrofóbicos, empleando montajes experimentales en un laboratorio para así poder llegar a evaluar los lentes y obtener los datos solicitados.

3.1 Población

- Criterios de inclusión: Lentes oftálmicos con recubrimiento o filtro superhidrofóbico e hidrofóbico que provengan de las 2 casas comerciales utilizadas en Clínica de

Optometría de la Universidad Santo Tomas de Bucaramanga (Unilentes, Megalens) cuyo material sea Cr-39 y policarbonato.

- Criterios de exclusión: Agua o cualquier otro líquido con un pH menor a 4,4 y mayor a 8,5, lentes de contacto.

3.2 Técnica de muestreo

La técnica de muestreo a emplear en este trabajo de grado fue no probabilística por conveniencia, ya que los lentes oftálmicos se seleccionaron a conveniencia teniendo en cuenta la disponibilidad para el acceso.

3.3 Tamaño de muestra

El tamaño de muestra son 52 montajes ya que se realizó un montaje por cada material y cada tipo de agua, usando los recubrimientos a evaluar.

Tabla 1. Operacionalización de variables

Objetivo	Variable	Def. Conceptual	Def. Operacional
Analizar el ángulo de contacto de los lentes de oftálmicos con recubrimiento superhidrofóbico e hidrofóbico que son expuestos a diferentes sustancias líquidas.	Casas comerciales X, Y	Lugar de donde provienen los lentes oftálmicos.	Unilentes, Megalens.
	Materiales lentes oftálmicos	Materiales con los que son fabricados los lentes oftálmicos.	CR-39 y Policarbonato.
	Índice de refracción del material	El índice de refracción se determina a través de la razón	El índice de refracción y el número Abbe

Objetivo	Variable	Def. Conceptual	Def. Operacional
		fisicomatemática de la velocidad de la luz en el medio refringente y la velocidad de la luz en el vacío.	representan unidades adimensionales.
	Número Abbe	El número Abbe representa la transparencia de un material refractivo y la dispersión luminosa de este.	
Describir las características del recubrimiento superhidrofóbico e hidrofóbico de los lentes oftálmicos.	Recubrimiento	Cubrimiento del lente oftálmico para mejorar su calidad.	Superhidrofóbicos, Hidrofóbico.
	Medida de ángulo de contacto	Es el valor entre el plano de una superficie sólida y la tangente de una superficie líquida.	A mayor ángulo mejor efectividad del recubrimiento.
	Índice de refracción del agua	Es el coeficiente de la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en el agua.	
	BRIX	Es una medida de la cantidad de sólidos disueltos que hay en un líquido.	
Identificar las diferentes características físicas entre el agua del grifo, el agua destilada y el agua lluvia.	pH del agua	Es una medida que indica la acidez o la alcalinidad del agua.	Agua destilada, agua de grifo, agua de lluvia.
	Turbidez del agua	Es una medida del grado en el cual el agua pierde su transparencia debido a la presencia de partículas.	
	Conductividad del agua	Es la capacidad del agua para conducir una corriente eléctrica a través de los iones disueltos.	

Tabla 2. *Clasificación de variables*

Variable	Clasificación naturaleza	Clasificación según escala de medición
Casas comerciales Unilentes, Megalens	Cualitativa	Politómica
Recubrimiento	Cualitativa	Dicotómica
Tipos de materiales	Cualitativa	Dicotómica
Agua	Cualitativa	Ordinal
Medida de ángulo de contacto	Cuantitativa	Razón continua
Índice de refracción del material	Cuantitativa	Razón continua
Numero ABBE	Cuantitativa	Razón continua
Índice de reacción de los tipos de agua	Cuantitativa	Razón continua
BRIX	Cuantitativa	Razón continua
pH del agua	Cuantitativa	Razón continua
Turbidez del agua	Cuantitativa	Razón continua
Conductividad del agua	Cuantitativa	Razón continua

Tabla 3. *Análisis univariado*

Variable	Análisis univariado	Gráfica
Casas comerciales (Unilentes, Megalens)	Al ser variables cualitativas se debe realizar un análisis de distribución por frecuencia.	Diagrama de barra
Recubrimiento		
Tipos de materiales		
Agua de grifo		
Agua de lluvia		
Agua destilada	Al ser variables cuantitativas se debe realizar un análisis de 3 pasos.	Histograma
Medida de ángulo de contacto		

Variable	Análisis univariado	Gráfica
Índice de refracción del material Número Abbe		
Índice de reacción de los tipos de agua	1. Análisis del tipo de distribución (Coeficiente de asimetría y curtosis)	
BRIX	2. Cálculo medidas de tendencia central. (Media-mediana-moda)	
pH del agua	3. Cálculo de medidas de dispersión (Shapiro Wilk)	
Turbidez del agua		
Conductividad del agua		

Tabla 4. Cruces de variables

Análisis bivariado	Nombre
Medida ángulo de contacto – Casas comerciales Unilentes, Megalens	Dist. Normal: coeficiente de correlación de pearson Dist. No normal: coeficiente se spearman
Medida ángulo de contacto – Recubrimiento	Dist. Normal: coeficiente de correlación de pearson Dist. No normal: coeficiente se spearman
Medida ángulo de contacto – Tipos de materiales	Dist. Normal: coeficiente de correlación de pearson Dist. No normal: coeficiente se spearman
Medida ángulo de contacto – Agua de grifo	Dist. Normal: coeficiente de correlacion de pearson Dist. No normal: coeficiente se spearman
Medida de Ángulo de contacto- Agua de lluvia	Dist. Normal: coeficiente de correlación de pearson Dist. No normal: coeficiente se spearman
Medida de ángulo de contacto- Agua destilada	Dist. Normal: coeficiente de correlacion de pearson Dist. No normal: coeficiente se spearman

3.4 Procedimiento

Para analizar las variaciones en la medida del ángulo de contacto en los lentes oftálmicos expuestos a los diferentes tipos de agua, se realizó el siguiente procedimiento:

1. Carta de explicación del proyecto y solicitud de los lentes oftálmicos a las casas comerciales anteriormente mencionadas.
2. Recolección de los diferentes tipos de agua.

Para la recolección de las diferentes aguas, solo se tuvo en cuenta las fechas de adquisición de cada tipo y conservar su estado por medio de botellas plásticas bajo temperatura ambiente, donde no tuviesen contacto con humedad o sol directo y así no alterar sus propiedades físicas.

2.1 Descripción y caracterización de las muestras de agua de cómo se adquieren los tipos de agua.

Las medidas de turbidez, potencial de hidrógeno, índice de refracción, entre otros, para cada una de las soluciones de agua utilizadas, las cuales se registran en la tabla 5, se realizaron en el laboratorio de química de la Universidad Santo Tomás. Todo esto se logró implementando los equipos mencionados anteriormente. Las aguas de lluvia fueron recolectadas entre el 6 y 7 de marzo de 2021 la temperatura mínima, en este periodo, en la ciudad de Bucaramanga fue de 19°C y máxima de 27°C, con una precipitación de 275 mm para el mes de marzo y una humedad del 87% (48).

Tabla 5. *Propiedades físicas de aguas recolectadas*

	Agua lluvia 06/03/21	Agua lluvia 07/03/21	Agua destilada	Agua grifo
Ph	7,37	7,41	6,42	6,94
Turbidez (nvt)	20,1	4,12	0,52	0,74

	Agua lluvia 06/03/21	Agua lluvia 07/03/21	Agua destilada	Agua grifo
Conductividad (us/cm)	690	26,1	3,71	90,4
Índice de refracción	1,33313	1,33304	1,33304	1,33305
BRIX	0,10%	0,03%	0,03%	0,04%

3. Carta de solicitud hacia decanatura de la Facultad de Optometría para poder ingresar voluntariamente al laboratorio de física y óptica fisiológica y el laboratorio de química, localizado en el cuarto piso en el edificio Santander de la Universidad Santo Tomás sede Floridablanca, donde se realizó la parte experimental de este trabajo de grado. Para cada ingreso los investigadores tuvieron en cuenta las medidas de bioseguridad exigidas por la USTA debido a la crisis sanitaria derivada del COVID-19.
4. Diseño del montaje experimental a implementar.
5. Se implementó un sistema óptico para la adquisición de las imágenes, compuesto por una cámara CMOS marca Edmund Optics con resolución de 1600 *píxeles* × 1200 *píxeles*, posteriormente las imágenes fueron procesadas utilizando el software MATLAB R2021a.
6. Ensayo para la toma de la medida del ángulo de contacto (prueba piloto).
7. Registro y organización de las medidas obtenidas.
8. Análisis de resultados.

3.4.1 Prueba piloto

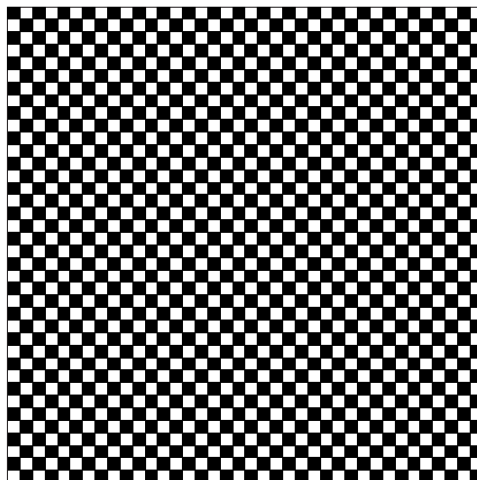
Se realizó la prueba piloto (Apéndice A) con el objetivo de evaluar la pertinencia de la logística, la adquisición de las imágenes para la toma del ángulo de contacto, el diligenciamiento de los formatos de recolección y el nivel de entrenamiento del personal de campo. De igual manera se evaluó las variables a medir planteadas en el análisis y tipo de muestreo.

3.4.2 *Adquisición y procesamiento digital de la imagen*

Las imágenes de la gota de líquido sobre cada uno de los lentes fueron adquiridas a través de un sistema óptico compuesto por una cámara CMOS marca Edmund Optics con resolución de $1600 \text{ píxeles} \times 1200 \text{ píxeles}$ y un sistema de procesamiento de estas imágenes. Antes de adquisición fue necesario realizar la calibración del sistema como sigue.

3.4.2.1 Calibración del sistema óptico. Para corregir las posibles aberraciones presentes en el sistema de adquisición de las imágenes a través de la cámara CMOS, se realizó un proceso de calibración del sistema implementando el método de Zhang (51), el cual consiste en utilizar un patrón plano tipo tablero de ajedrez. En esta investigación se implementaron cuadrículas realizadas con cuadrados blancos y negros de **2,0mm** de lado y **4,0mm²** de área. En la figura 24 se muestra la imagen del tablero utilizado.

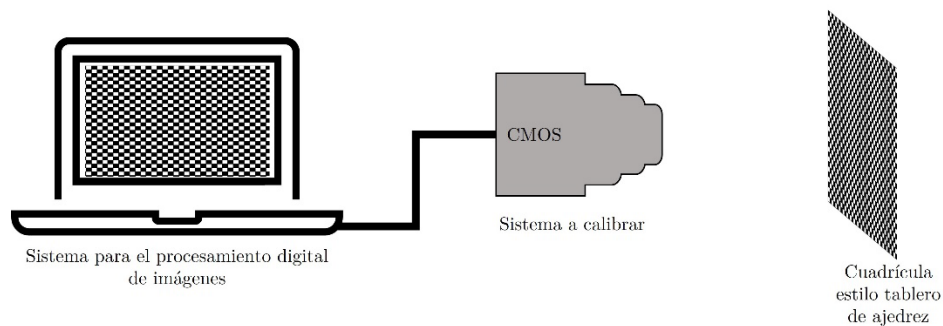
Figura 24. Tablero tipo ajedrez, 2,0 mm de lado y área de 4,0 mm²



Este se ubicó en el espacio de trabajo que estaba comprendido entre 11,0cm y 11,5cm de distancia del objetivo de microscopio hasta las muestras en estudio.

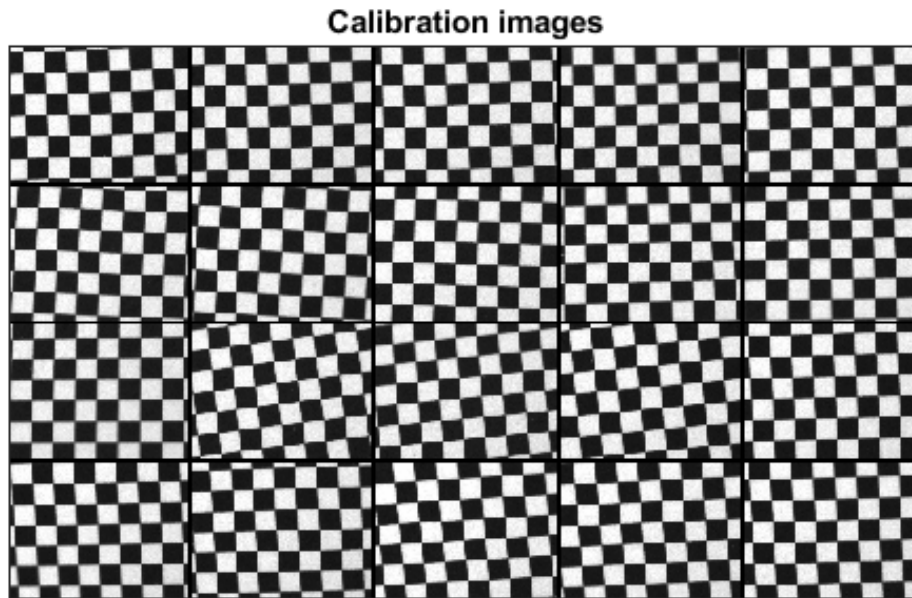
Luego se realizó la adquisición de 20 imágenes de la cuadrícula orientadas de diferentes maneras, con la precaución que en estas posiciones siempre se tuviera la imagen más nítida de dichas cuadrículas. Todo el proceso se realizó a través de la conexión de un pc a la cámara. En la figura 25 se muestra el esquema representativo del montaje experimental implementado para dicho propósito.

Figura 25. Esquema del montaje experimental



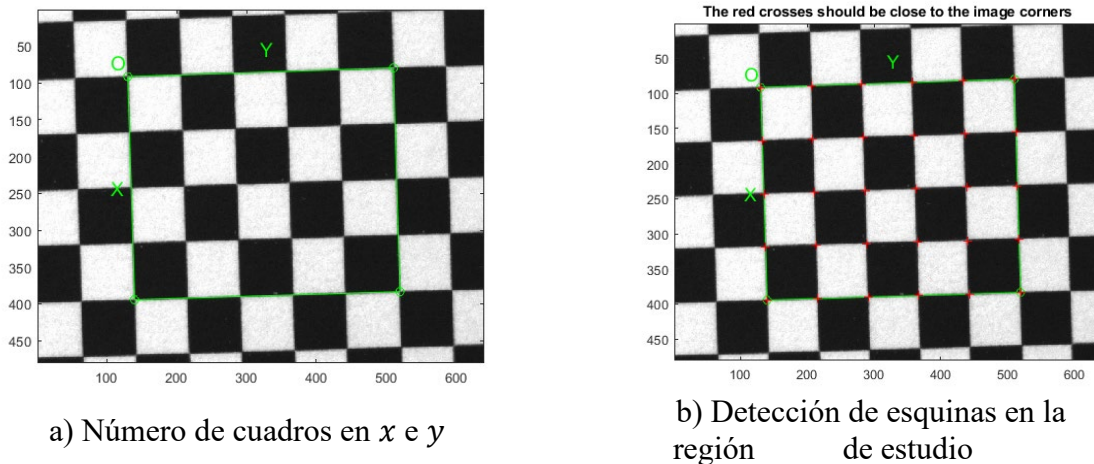
Para el procesamiento y respectiva calibración de la cámara y objetivo de microscopio se utilizó la herramienta TOOLBOX el cual se puede adquirir a través del enlace http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/download/index.html en el cual se implementó el método Zhang. A través de esta herramienta se realizó la lectura de las 20 imágenes del tablero dispuesto de formas diferentes, como se muestra en la figura 26.

Figura 26. Lectura de las 20 imágenes para la calibración



Posteriormente se detectaron las esquinas en cada una de las imágenes, se seleccionó un área compuesta por cinco cuadrículas a lo largo del eje y y cuatro en el eje x . Este proceso se muestra en la figura 27.

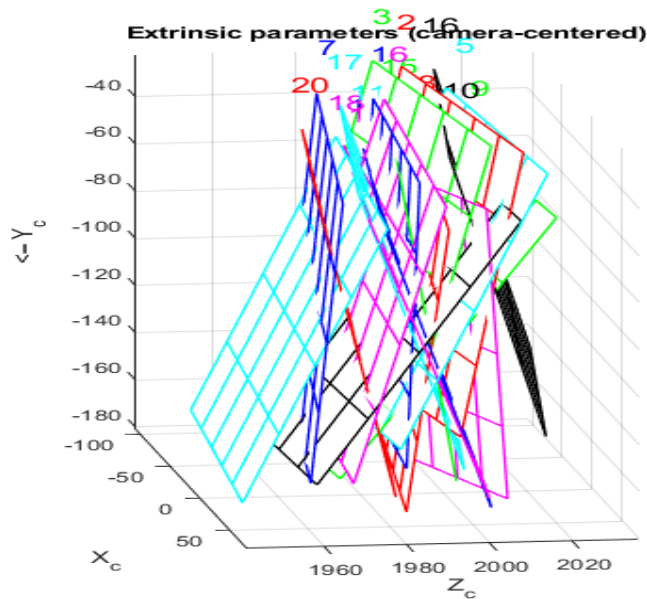
Figura 27. Detección de las esquinas en cada una de las imágenes



Este proceso se aplicó de forma similar para las 20 imágenes, luego se procedió a calibrar el sistema determinando los “parámetros intrínsecos, entre los cuales se tiene la distancia focal, que es la distancia entre el centro de perspectiva en el centro de la imagen y el punto principal, el tamaño de los píxeles y el punto principal que es definido como el punto de intersección del rayo principal en el lado de la imagen con el plano imagen. Y los extrínsecos que están representados por la posición y orientación de la cámara en tres dimensiones tomando una referencia coordenada” (49 - 51).

Para los parámetros extrínsecos se obtuvo la posición y orientación de las cuadrículas en un plano tridimensional como el que se muestra en la figura 28.

Figura 28. Gráfico de las cuadrículas en un plano en perspectiva tridimensional



Para los intrínsecos se obtuvo como resultado de procesamiento que:

Focal Length: $fc = [5054,93103 \quad 5012,52014] \pm [406,52092 \quad 404,25799]$

Principal point: $cc = [359,13394 \quad -4,79501] \pm [0,00000 \quad 0,00000]$

Skew: $\alpha_c = [0,00000] \pm [0,00000] \Rightarrow \text{angle of pixel axes} = 90,00000 \pm 0,00000 \text{ degrees}$

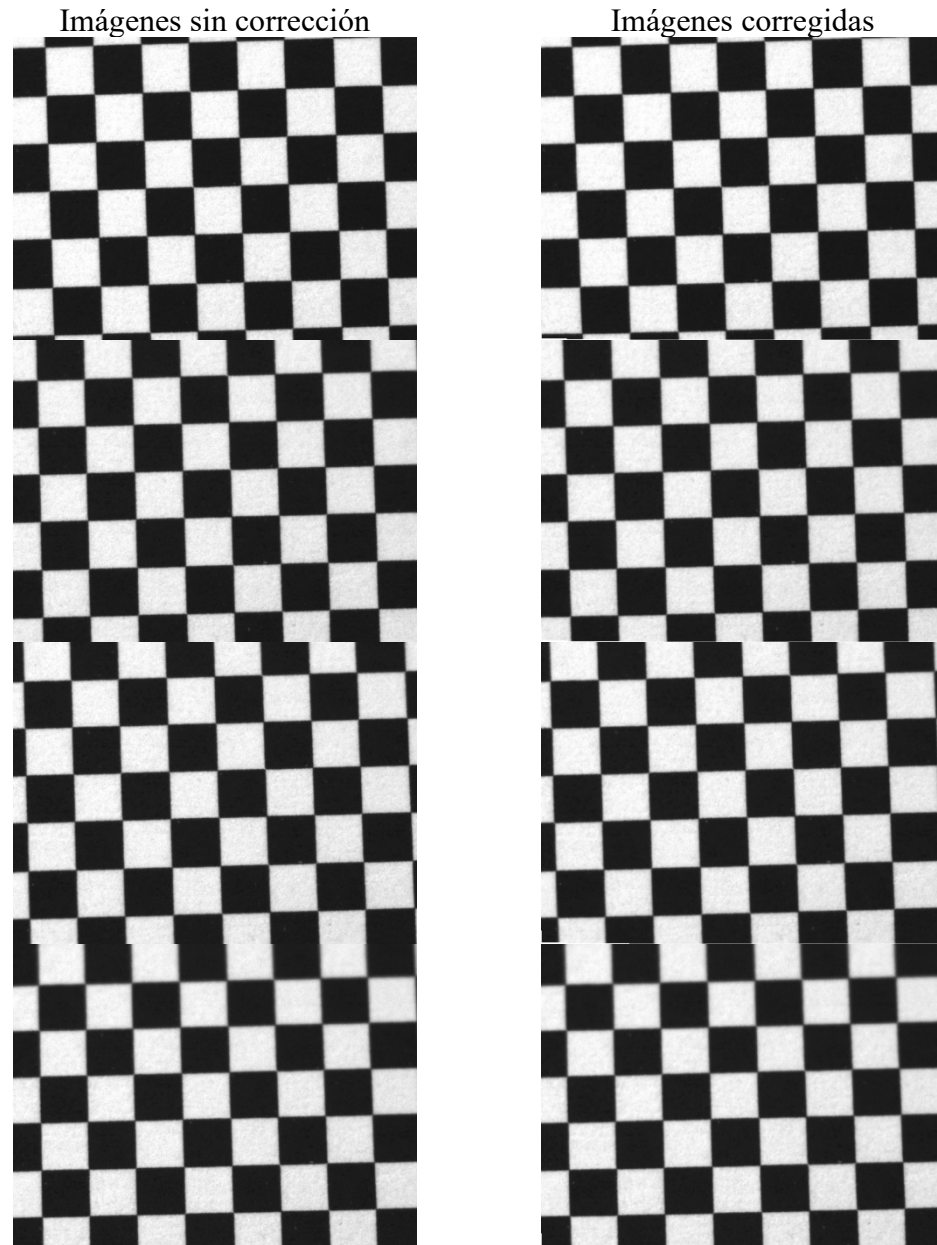
Distortion: $k_c = [-2,33356 \quad 113,06774 \quad 0,05108 \quad -0,00442 \quad 0,00000] \pm [0,98560 \quad 60,53339 \quad 0,02990 \quad 0,00627 \quad 0,00000]$

Pixel error: $\text{err} = [0,44986 \quad 0,44243]$

El error de píxel estuvo en el rango de -1 y 1 como se muestra en los valores anteriores, esto implica un resultado aceptable para el rango de medidas (49 - 51).

Teniendo en cuenta los resultados de calibración que se obtuvieron se aplicó la corrección a cada una de las imágenes de las cuadrículas, inicialmente, para apreciar posibles variaciones en estas. En la figura 29 se muestra la imagen de cuatro de las cuadrículas en las cuales se presenta la imagen sin corregir aberraciones del tipo distorsión y frente a esta la imagen corregida.

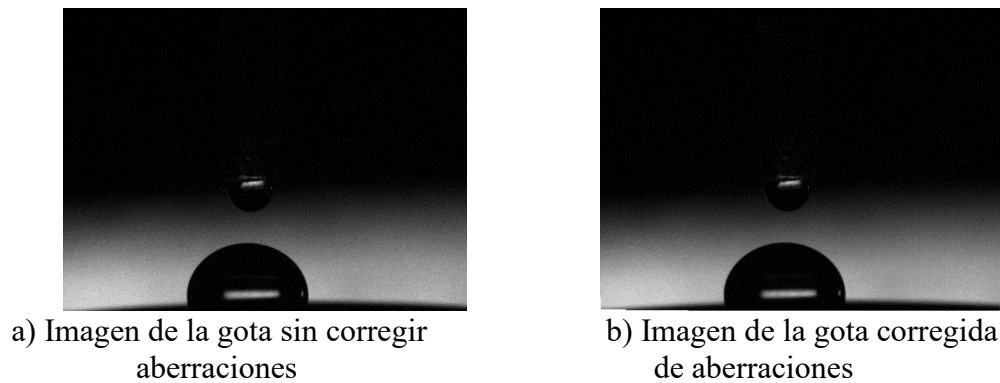
Figura 29. *A la izquierda imágenes originales sin corrección y a la derecha imágenes corregidas*



El sistema implementado fue prácticamente telecéntrico teniendo en cuenta que los objetos de estudio estuvieron frente el objetivo de la cámara y además a una distancia relativamente cerca, por lo tanto, las aberraciones de distorsión fueron relativamente mínimas.

Sin embargo se aplicó la corrección a cada imagen de las gotas de agua utilizadas en el estudio, en la figura 30 a) imagen, de una de las gotas sobre uno de los lentes, adquirida sin corregir aberraciones y en b) se muestra la imagen corregida de aberraciones.

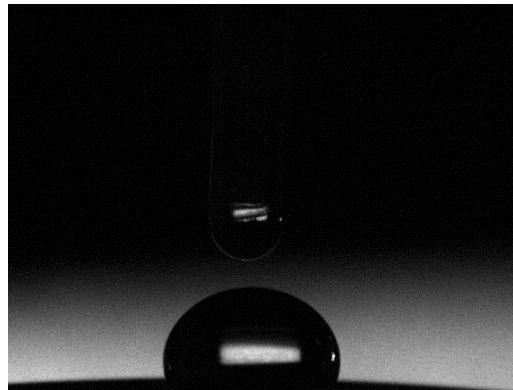
Figura 30. *Imagen de la gota sobre la superficie del lente oftálmico, adquirida con la cámara CMOS, sin corregir las aberraciones de distorsión (a) y corrigiendo dichas aberraciones (b)*



Como se puede apreciar en la figura anterior las variaciones fueron muy sutiles, debido a lo comentado anteriormente. Luego de todo este ejercicio de calibración y ajuste de imágenes se realizó el procesamiento digital de las imágenes de las gotas de agua sobre el lente oftálmico para determinar el ángulo de contacto implementado Matlab.

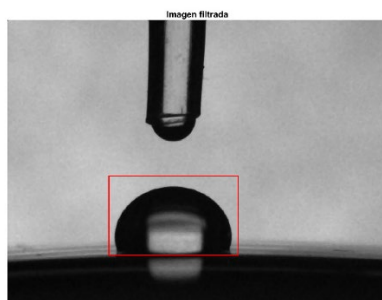
Todo el montaje experimental necesario para el desarrollo de la investigación se muestra y se explica en la prueba piloto (Apéndice A). Con la cámara se hizo la captura digital de la imagen cuando la gota cayó sobre el lente (Figura 31).

Figura 31. *Gota sobre la superficie del lente*

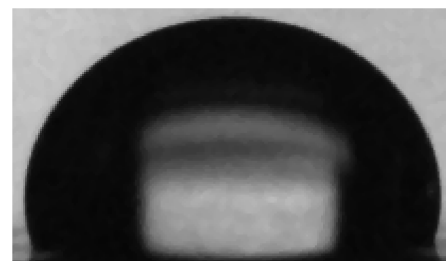


Posteriormente para evitar el ruido digital que se produjo en la imagen a cada una de estas se les aplicó el filtro (medfilt2), se realizó el recorte de la imagen teniendo en cuenta la región de interés que estaba representada por la gota y la superficie del lente, sin perder las coordenadas de la ubicación de esta región en la imagen, como se muestra en la figura 32.

Figura 32. *a) Imagen filtrada de la adquisición realizada con la cámara. b) Región o zona de estudio para procesar digitalmente*



a)



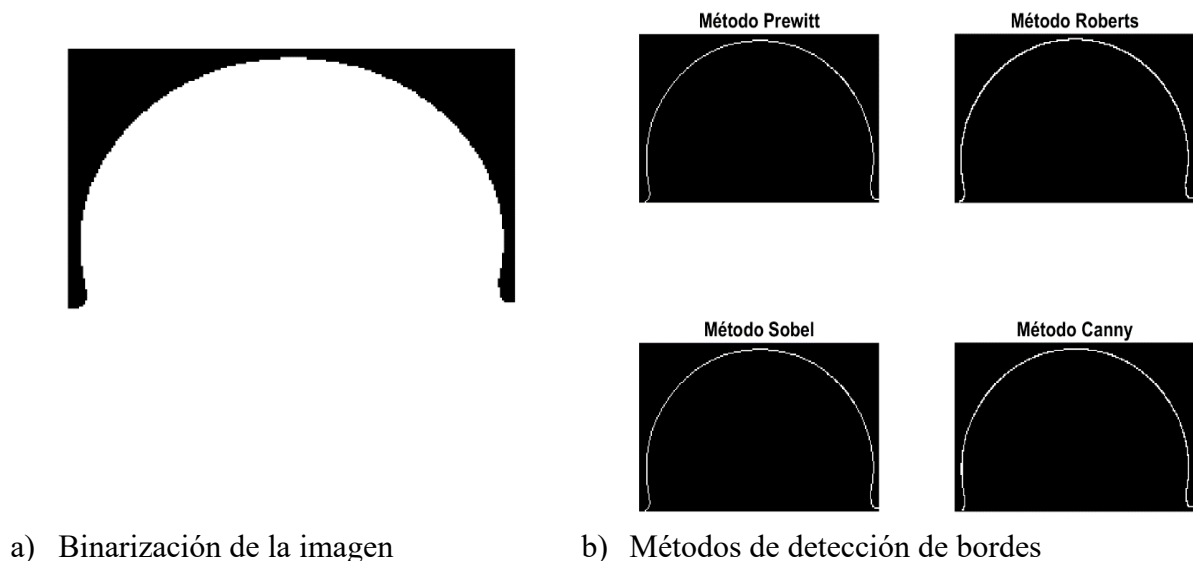
b)

Se aplicó el mismo método de binarización a todas las imágenes para poder determinar la curvatura de la gota, la cual tiene como función realizar un recorte manual de la zona en estudio

de la gota, para que sea mucho más sencillo procesarla y tomar las coordenadas de referencia en la imagen para hallar el ángulo de contacto como se muestra en la figura 32(a).

Después se inició la binarización donde ya se deben tener en cuenta las coordenadas las cuales permitieron medir en la imagen el ángulo de contacto y trazar la curvatura de la gota, utilizando métodos como el método de Roberts, el método de Prewitt, el método de Canny y el método de Sobel, los cuales logran determinar el borde de la imagen en estudio ya que están enfocados en la detección de bordes, como se muestra en la figura 32(b), luego de binarizar la imagen se observó que cualquiera de los métodos puede ser aplicado para la detección de bordes, pero se tomó la decisión de utilizar el método de Roberts como se muestra en la figura 33, ya que con este se evidencia un mejor perfil y se logran obtener datos de las coordenadas de la gota de una manera más sencilla para poder llegar a la medición del ángulo de contacto.

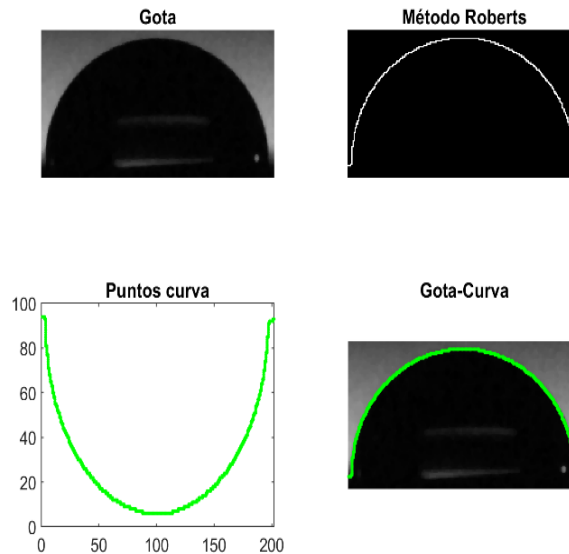
Figura 33. *Binarización y métodos de detección de bordes utilizados para el estudio*



En la figura 33 se muestra el ajuste que se obtiene a través del método de Roberts elegido para el desarrollo de la presente investigación, en esta figura se puede apreciar el acople entre los

puntos determinados y la curvatura de la gota del tipo de agua aplicada sobre la superficie de uno de los lentes oftálmicos utilizados.

Figura 34. *Puntos determinados con el método de Roberts sobre la curvatura de uno de los lentes oftálmicos*

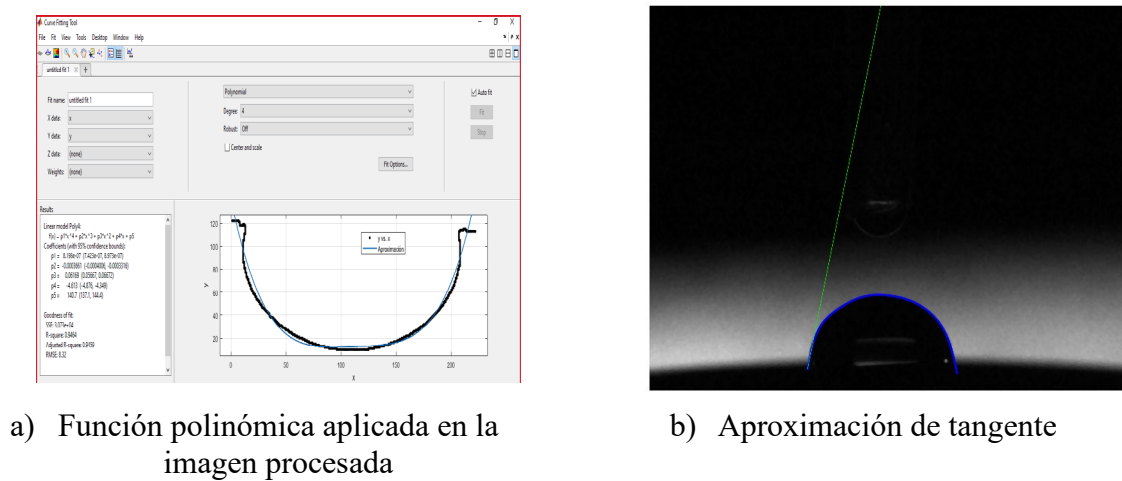


Al encontrar los bordes de cada una de las imágenes de las gotas con el método de Roberts se procedió a determinar la función polinómica que mejor se ajustara a los puntos de la curva en estudio, esto se hizo para garantizar la ubicación de la curvatura de la gota y para tener la información matemática de dicha curva, las mejores aproximaciones se obtuvieron para un polinomio de grado 4. En la figura 35(a) se muestra la función polinómica ajustada a la curva de una de las gotas utilizadas en el presente estudio, determinar la función polinómica brindó la información matemática correspondiente a la curvatura que se estaba estudiando lo cual hizo posible que se determinara el ángulo de humectación con resultados confiables. Este procedimiento se realizó de forma análoga para todas las imágenes procesadas, a través de los

comandos de MATLAB se utilizó la función “polyfit”, para lograr la determinación de la función polinómica.

Para cada gota se encontraron los puntos y las funciones polinómicas correspondientes, como se indicó anteriormente, luego se derivó cada una de dichas funciones y teniendo en cuenta que la derivada representa la pendiente de la recta tangente a la curva en un punto determinado de la función en estudio, entonces, se determinó el ángulo de contacto de la recta tangente a la curva en el punto de interés. Resaltando que la región o punto de interés siempre fue el contacto entre la gota y la superficie del lente. Para corroborar que la recta tangente pasaba por el punto donde se determinaría el ángulo se graficaba en dicho punto, garantizando que evidentemente se estaba en el lugar de la región de contacto entre la gota de la sustancia líquida y la superficie del lente, como se muestra en la figura 35(b). Los valores numéricos de los ángulos de contacto se almacenaron uno por uno en la base de datos que se tenía para tales efectos, parte de esta base se presenta en el apéndice B. De esta forma se logró determinar el ángulo de contacto que hubo entre la gota de los diferentes tipos de agua y la superficie de cada uno de los 36 lentes oftálmicos utilizados.

Figura 35. Detección del ángulo de contacto



3.5 Sesgos

Sesgo de información: Para la correcta recolección de datos y elaboración de los montajes experimentales, fue necesario el conocimiento previo y entrenamiento al personal de campo para evitar errores en la recolección de los datos.

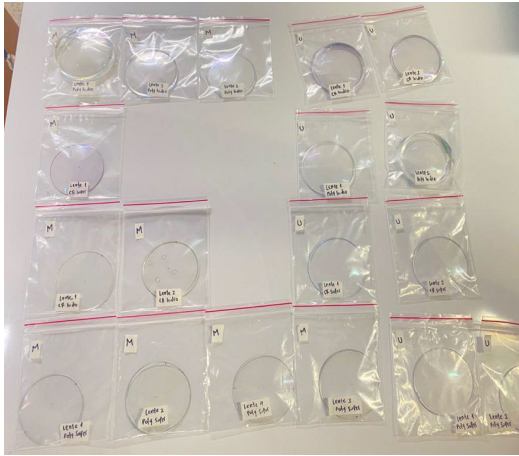
Sesgo de selección: Hubo probabilidad que se presentara debido a que los lentes a evaluados fueron seleccionados por conveniencia guiándose por criterios de calidad y eso no es lo que siempre pasa en la vida real.

Sesgo de confusión: En base a la revisión de la literatura e investigación en casas comerciales, existen dos variables de confusión, la del recubrimiento ya que está sujeto a características específicas de cada casa comercial, y por otro lado el agua de lluvia ya que el pH puede encontrarse diferente al de las literaturas encontradas por la ubicación territorial donde se realizará la investigación.

4. Resultados

Se realizó el montaje experimental empleando 22 lentes de material CR-39 y 33 lentes de material policarbonato con dos tipos de recubrimientos 27 hidrofóbicos y 28 superhidrofóbicos provenientes de dos casas comerciales Megalens (denominada X), y Unilentes (denominada Y), tal como se muestra en la figura 36. Como fluidos se emplearon diferentes tipos de agua (Grifo, lluvia y destilada).

Figura 36. a) Lentes oftálmicos clasificados según la casa comercial, material y recubrimiento. b) Adquisición de imágenes



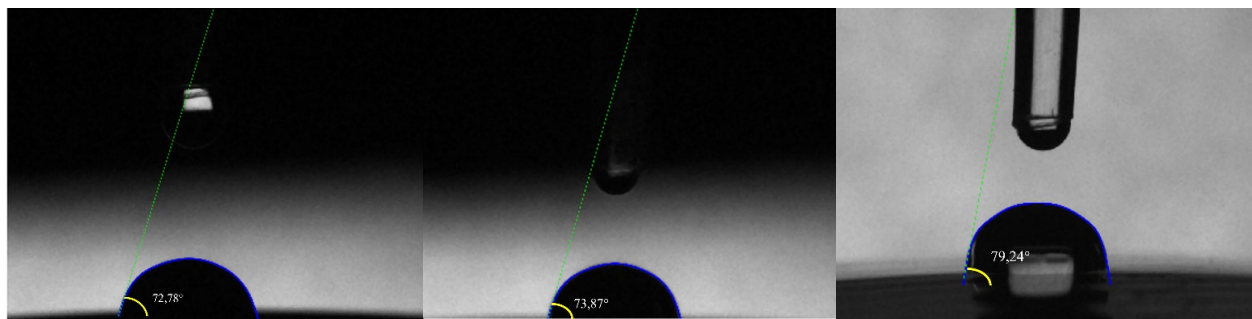
a) Lentes oftálmicos con los respectivos recubrimientos utilizados en el estudio



b) Adquisición de imágenes a través del montaje experimental implementado en el estudio

Con la estrategia óptica implementada y el tratamiento digital de las imágenes se determinó el ángulo de contacto generado entre las superficies de los lentes y las sustancias líquidas. En la figura 37 se muestra parte de los resultados obtenidos en el estudio para la casa comercial Megalens con recubrimiento hidrofóbico y material Cr-39.

Figura 37. Casa comercial Megalens lente con recubrimiento hidrofóbico y material Cr-39. Ángulos de contacto determinados en la superficie del lente y las gotas de los tres tipos de agua a, b, c



a) Agua lluvia (72,78°)

b) Agua grifo (73,87°)

c) Agua destilada (79,24°)

Para esta misma casa se obtuvo las medidas para el ángulo de contacto para los lentes de policarbonato y recubrimiento hidrofóbico como se muestra en la figura 38. Análogamente, en las figuras 39 y 40 se muestra parte algunos de los resultados para la medida en los materiales Cr-39 y policarbonato con recubrimiento superhidrofóbico.

Figura 38. Casa comercial Megalens lente con recubrimiento hidrofóbico y material policarbonato. Ángulos de contacto determinado entre la superficie del lente y las gotas de agua de lluvia, grifo y agua destilada

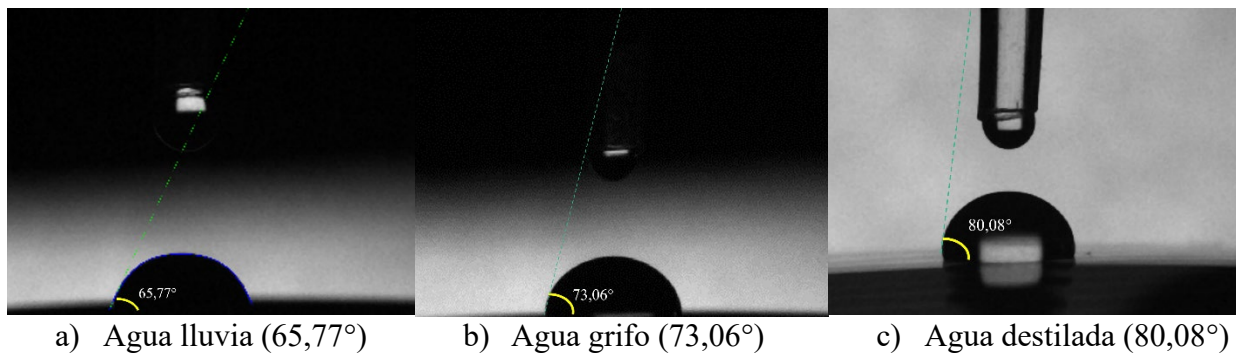


Figura 39. Casa comercial Megalens lente con recubrimiento superhidrofóbico y material Cr-39. Medida del ángulo de contacto en la superficie del lente para los tres tipos de agua utilizadas en la investigación

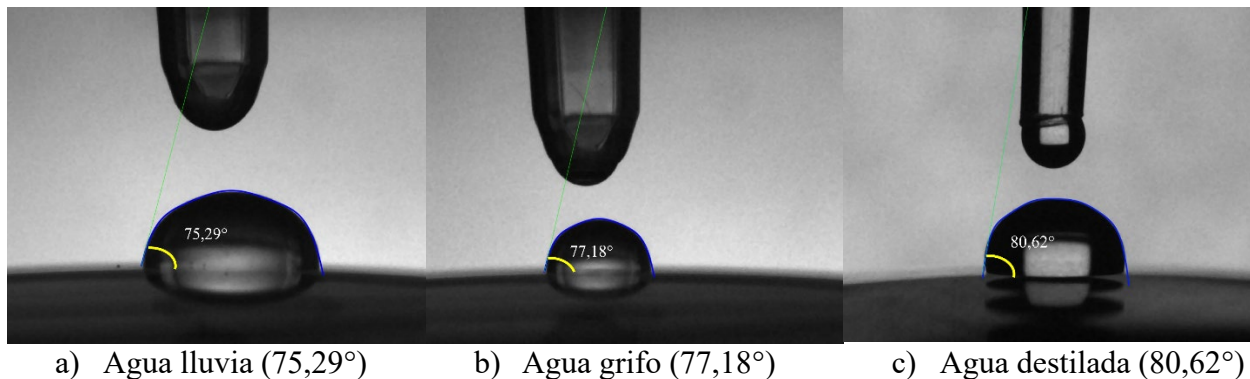
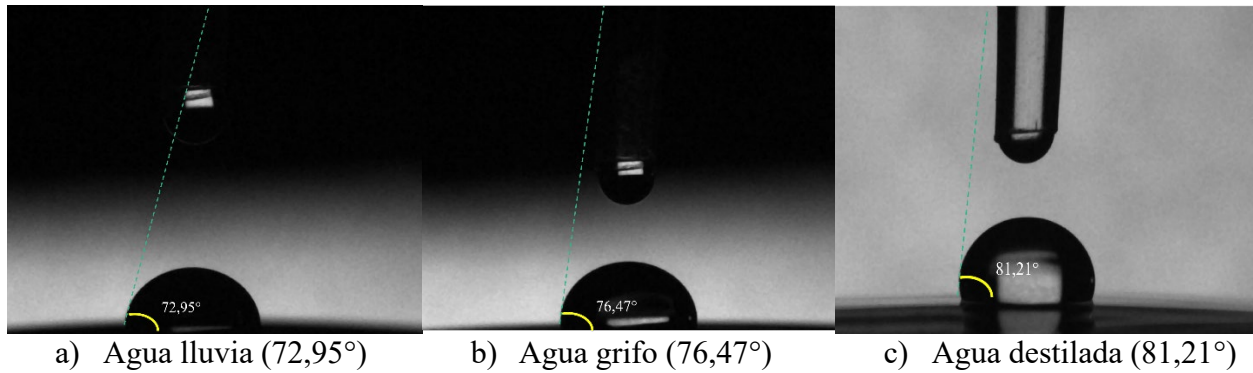


Figura 40. Casa comercial Megalens lente con recubrimiento superhidrofóbico policarbonato. Medida del ángulo de contacto entre la superficie del lente y las gotas de agua utilizadas en el estudio



Análogamente, se realizó un procedimiento similar para los lentes con material Cr-39 y policarbonato, con recubrimientos hidrofóbicos y superhidrofóbicos respectivamente, tal como se muestra en la figura 41, 42, 43 y 44.

Figura 41. Casa comercial Unilentes lente con recubrimiento hidrofóbico Cr-39. Medida del ángulo de contacto entre la superficie del lente y las gotas de agua utilizadas en el estudio

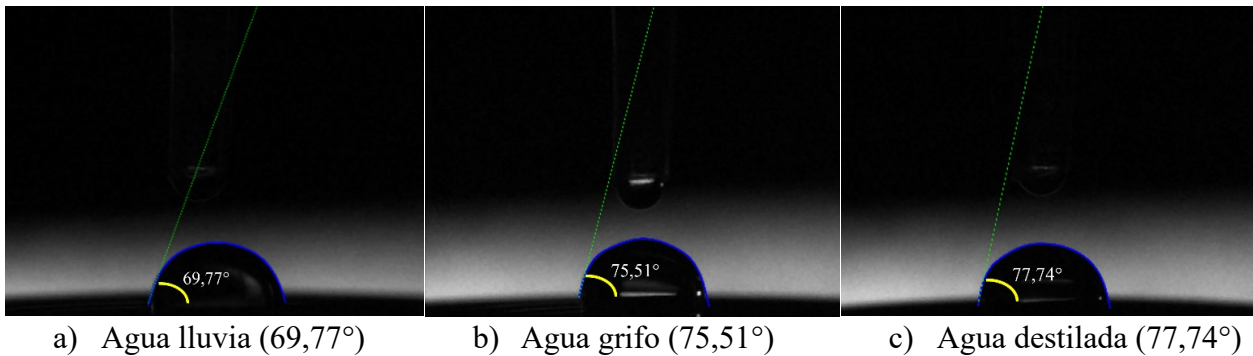


Figura 42. Casa comercial Unilentes lente con recubrimiento hidrofóbico Policarbonato. Medida del ángulo de contacto entre la superficie del lente y las gotas de agua utilizadas en el estudio

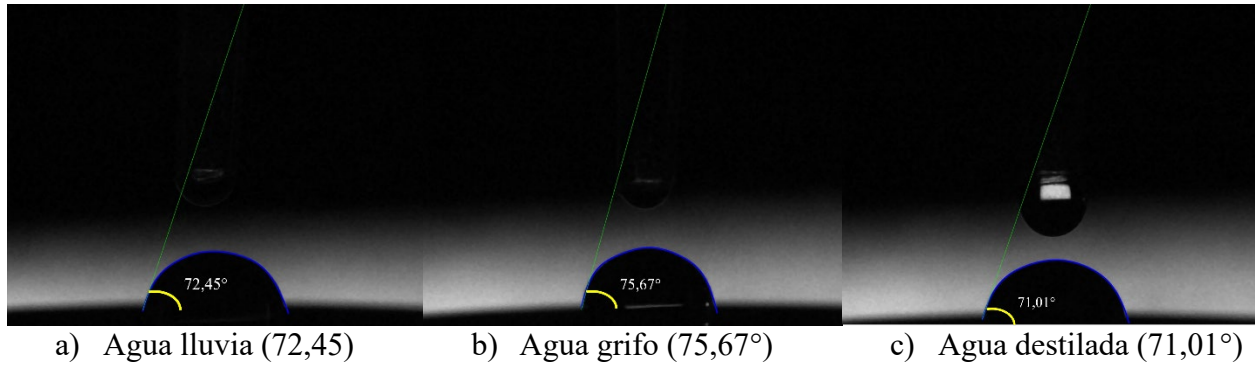


Figura 43. Casa comercial Unilentes lente con recubrimiento superhidrofóbico Cr-39. Medida del ángulo de contacto entre la superficie del lente y las gotas de agua utilizadas en el estudio

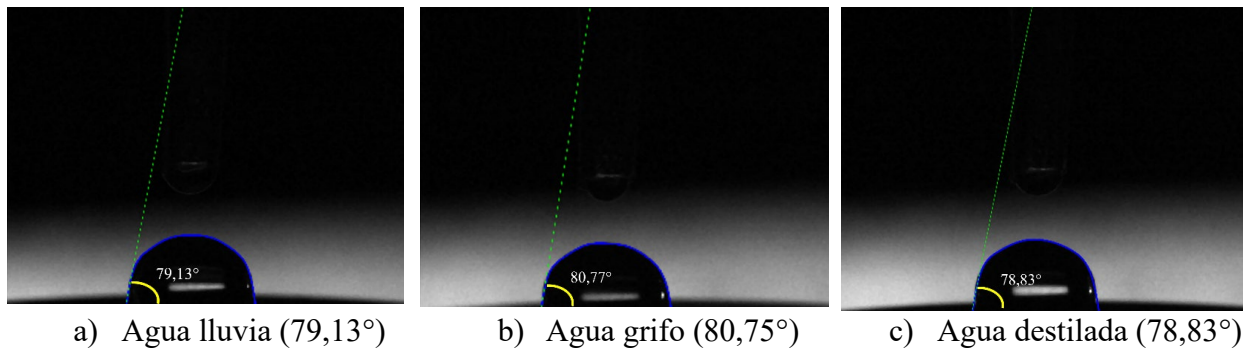
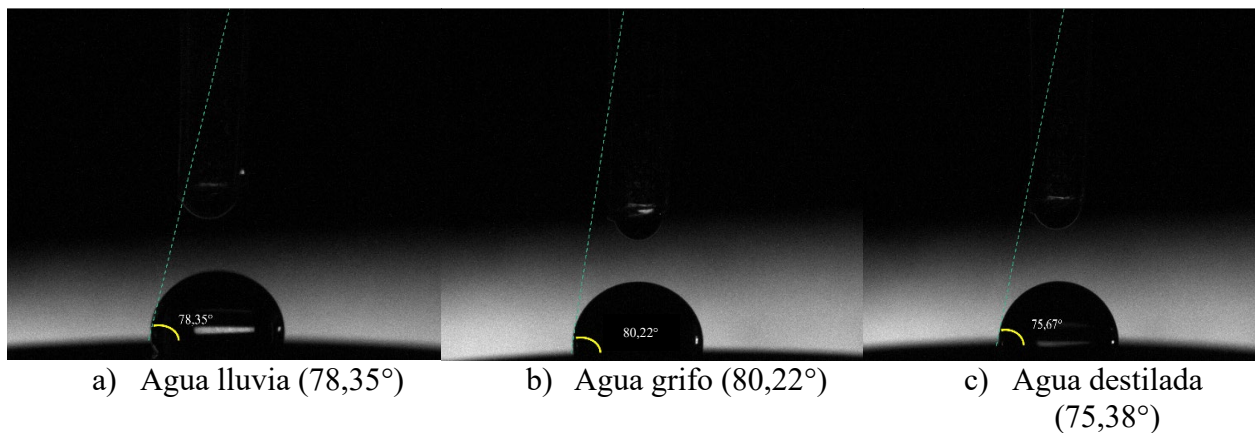
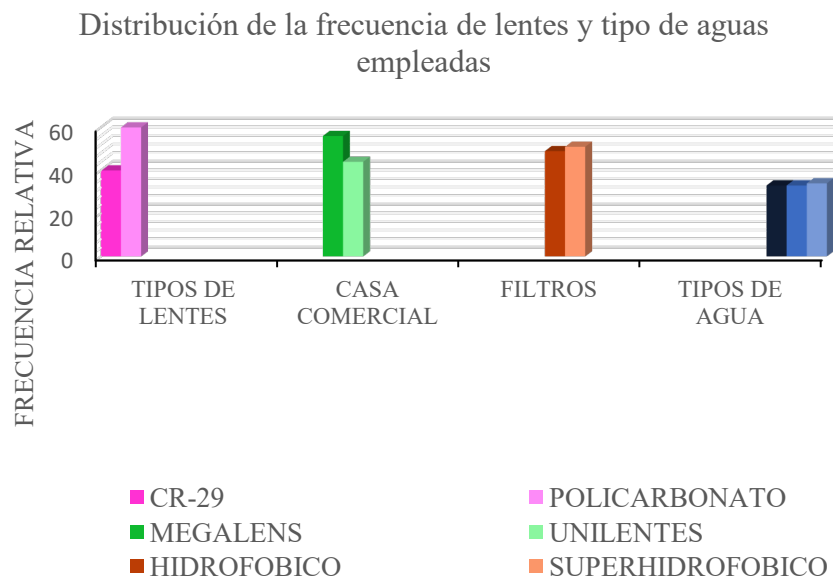


Figura 44. Casa comercial Unilentes lente con recubrimiento superhidrofóbico Policarbonato. Medida del ángulo de contacto entre la superficie del lente y las gotas de agua utilizadas en el estudio



Respecto al tipo de material el 60% (33) de los lentes eran en policarbonato, el 56% (21) fueron suministrados por la casa comercial Megalens y el 51% (12) tenían recubrimientos superhidrofóbicos. En relación con los tipos de agua se observa una frecuencia de alrededor del 33% para cada tipo (Ver figura 45).

Figura 45. *Distribución de la frecuencia de lentes y tipos de aguas empleadas*



En las variables mencionadas en la tabla 6, se puede evidenciar distribución no normal teniendo en cuenta los datos obtenidos en los coeficientes de asimetría y curtosis, por lo tanto, se reporta como mediana un resultado de 1,58 en el caso del índice de refracción, 30 en el número ABBE, 1,33 en el índice del agua, 0,0004 en el caso del BRIX (%), 6,94 en el pH, 0,74 en la turbidez, en las cuatro tomas del ángulo se pudo encontrar una mediana 76,82 / 76,95 / 78 / 76,17 respectivamente. Adicionalmente, respecto a la conductividad del agua se encontró una mediana de 90,4.

Tabla 6. *Caracterización de lentes oftálmicos y agua empleada*

	Curtosis	Coefficiente de asimetría	Mediana	Min-Max
Índice del material	-1,72	-0,58	1,58	1,49 - 1,58
Numero ABBE	-1,89	0,41	30	30 - 58
Índice del agua	0,79	1,62	1,33	1,33 – 1,33
BRIX (%)	0,71	1,58	0,0004	0,0003 – 0,001
pH	-1,54	-0,53	6,94	6,42 – 7,41
Turbidez (nvt)	0,64	1,43	0,74	0,52 – 4,2
Conductividad (us/cm)	0,77	1,61	90,4	3,71 - 690
Ángulo de contacto 1	8,85	-2,85	76,82	42,79 – 82,22
Ángulo de contacto 2	11,70	-3,21	76,95	31,91 – 81,82
Ángulo de contacto 3	11,72	-3,23	78	31,58 – 82,20
Ángulo de contacto 4	11,7	-3,23	76,17	32 – 81,92

Con los datos obtenidos se evidencia que no hay diferencias en el promedio del ángulo de contacto según la casa fabricante del lente (Valor p:0,6477), además al analizar la relación entre tipo de filtro (Hidrofóbico, Superhidrofóbico) y promedio del ángulo de contacto, se concluye que los datos permiten evidenciar que hay diferencias en el valor promedio obtenido del ángulo de contacto dependiendo del tipo de filtro o recubrimiento que contengan los lentes oftálmicos (Valor de p 0,0009) (Ver Tabla 7).

Tabla 7. *Análisis bivariado*

Variable	Mínima/Mediana / Máxima	Promedio ángulo de contacto	Rango intercuartil	P ^a
Casa comercial Unilentes	31,72 / 76,38 / 80,95	5,97		0,6477
Casa comercial Megalens	62,61 / 77,47 / 81,76	5,57		
Filtro Hidrofóbico	31,72 / 73,20 / 79,62	7,56		0,0009
Filtro Superhidrofóbico	62,61 / 77,84 / 81,76	4,69		
Agua de grifo	42,20 / 76,38 / 81,76	3,96		
Agua de lluvia	31,72 / 74,55 / 79,62	6,57		
Agua destilada	51,64 / 77,515 / 80,95	6,90		

Nota: No se tiene disponible valor de P para la relación del promedio del ángulo con el tipo de agua. a. Prueba de Rangos de Wilcoxon.

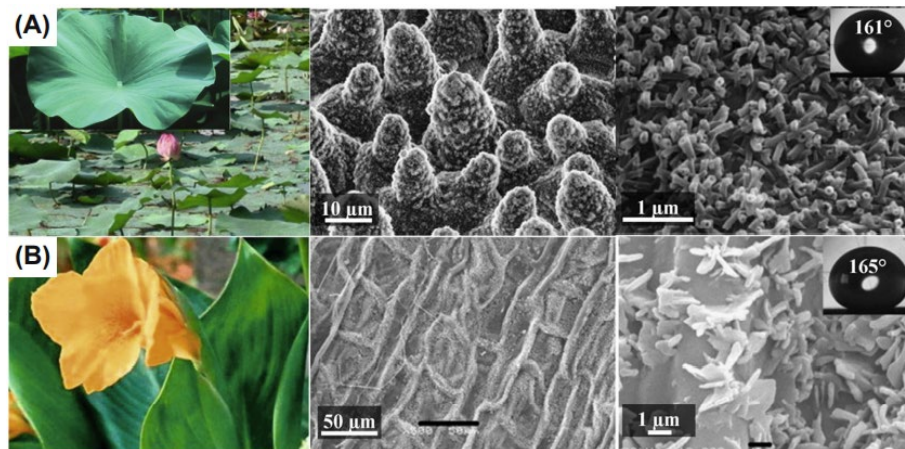
4.1 Discusión

Los lentes oftálmicos son usados por gran parte de la población mundial, se suelen anteponer filtros en ellos para una mejor eficacia en la calidad visual de las personas, ya que estos filtros eliminan reflejos, disminuyen la fatiga visual, el deslumbramiento y repelen la humedad para así evitar que el lente se empañe o produzca algún tipo de marca o rasgadura.

Debido a esto se tomó la decisión de realizar un estudio experimental respecto la característica que presentan los filtros oftálmicos de las casas comerciales más utilizadas en las Clínicas de Optometría de la Universidad Santo Tomás de Bucaramanga en el año 2021; teniendo como objetivo analizar el ángulo de contacto de los lentes oftálmicos con recubrimiento hidrofóbico y superhidrofóbico que son expuestos a diferentes tipos de agua. Por lo tanto, se analizó que en estudios para determinar el ángulo de contacto los resultados dependen mucho de las características geométricas, físicas, químicas, entre otras, de las superficies y de las sustancias que hagan contacto con dichas superficies, por ejemplo, Guo, Z., Liu, W., 2007. Biomimic from

the superhydrophobic plant leaves in nature: binary structure and unitary structure. Plant Sci. Determinaron que algunas plantas muestran características de ser superhidrofóbicas, teniendo en cuenta la superficie de cada una de estas en la figura 46 (A) las hojas del loto y (B) la hoja de la canna india, y sus correspondientes imágenes adquiridas a través de un microscopio electrónico de barrido de alta resolución, en esta se puede apreciar que la microestructura de las hojas de las plantas es diferente, pero cada una de esas hojas muestra su característica de ser superhidrofóbicas.

Figura 46. Hojas de loto y canna indica superhidrofóbicas



Adaptado de Europhys. Lett. Revista científica (57).

Los estudios de superficies y/o recubrimientos hidrofóbicos han sido desarrollados en diferentes investigaciones, los cuales han permitido determinar “la inestabilidad del estado de humectación” de Cassie-Baxter y su transformación en humectación de Wenzel, caracterizándose la humectación a través del ángulo de contacto o ángulo de humectación, para lo cual, la hidrofobicidad ya sea en superficies naturales o sintéticas implica que el ángulo de contacto debe ser moderadamente grande tomando valores aproximados a 90° (58, 59). Si bien la teoría de Wenzel propuesta en 1936, explica la relación entre la hidrofobicidad de la superficie (60), es la

teoría de Cassie y Baxter formulada en 1944 (61), la que se aplica con mayor frecuencia a superficies superhidrofóbicas, ya que se basa en la observación de una superficie natural (la planta *Triticum*) que poseía ángulos de contacto con el agua por encima de 150° , resultado que fue promulgado por primera vez por Fogg, en su estudio “Fluctuación diurna en una propiedad física de la cutícula de la hoja” (62) donde hace referencia que el valor del ángulo de contacto varía según la especie, la edad, estado y la posición de la planta.

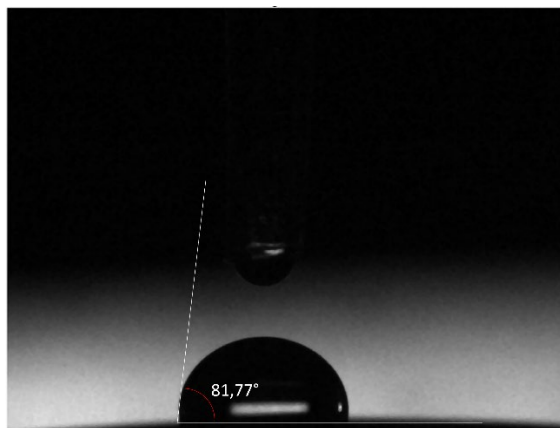
En otro estudio desarrollado por Love et al en 2002 “propiedades de fabricación y humectación de medias carcassas metálicas con diámetros submicrónicos” (63), en el cual se utilizan superficies nanométricas de metal con superficies superhidrofóbicas, y utilizando métodos impartidos por Li et al en el 2006 (64), y Sun et al en 2007 (65), se podrían fabricar plantillas con características superhidrofóbicas recubriendo microesferas con nanoesferas, o construyendo un sólido cristalino de nanoesferas mediante la plantilla de una matriz de microesferas en PDMS (polidimetilsiloxano o dimeticona), es posible obtener ángulos de contacto de 160° .

Así mismo, en el estudio realizado por Sun et al en el 2011 “Superhidrofobicidad de nanopartículas de sílice modificadas con poliesterireno” han informado sobre la efectividad de superficies nanoestructuradas fabricadas con plantillas de poliestireno (PS), las cuales producen superficies con características de superhidrofobicidad obteniendo ángulos de contacto cercanos a 150° (66). En trabajos similares, como “Comparación del ángulo de contacto en distintos tipos de lentes de contacto” (56), Teniendo como referencia los valores a considerar para definir cuando la medida de un ángulo de contacto se concluiría como hidrofóbica o superhidrofóbica, para caso tal que una medida de ángulo de contacto sea clasificada como hidrofóbica esta debe ser inferior a 90° y para ser clasificada superhidrofóbica debe superar los 90° .

Entonces, al evaluar la base de datos (apéndice B), se encontró que ninguno de los lentes oftálmicos superó los 90° en el ángulo de contacto con ningún tipo de agua utilizada en la presente investigación, es decir, los lentes que según el criterio del fabricante poseían recubrimiento superhidrofóbico, no cumplen con las características necesarias para serlo. Este resultado posiblemente se deba a un error en el momento de la clasificación del lente por parte del fabricante al enviarlo para el estudio. Por otra parte, no se tiene conocimiento respecto el volumen y/o el tamaño de las gotas de agua utilizadas por la empresa para poder evidenciar los criterios en la clasificación del material o recubrimiento del lente que lo identifica como superhidrofóbico.

Cuando se analizó entre todos los 52 datos recolectados, se logró evidenciar que el ángulo de contacto más cercano a 90° con recubrimiento superhidrofóbico, fue el lente de la casa comercial Unilentes con material policarbonato con un ángulo de contacto de $81,77^\circ$ como se muestra en la figura 47.

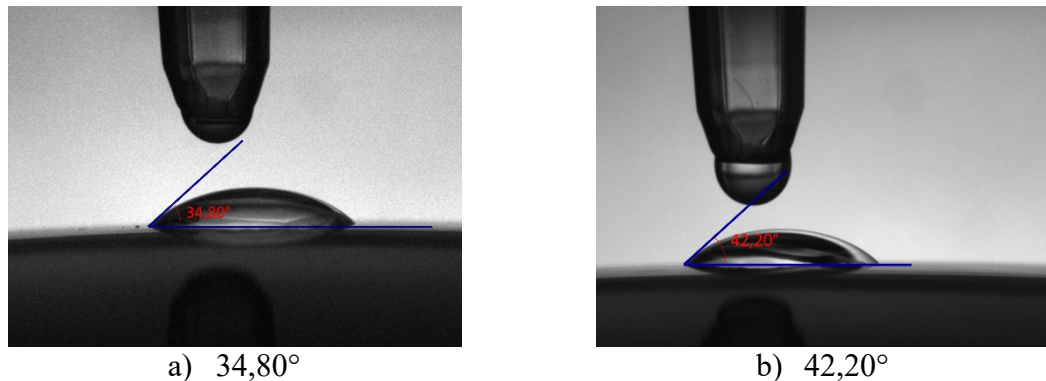
Figura 47. *Ángulo de contacto en lente con superficie superhidrofóbica*



Dos lentes de la casa comercial Megalens, que, según los criterios de esta casa, estos tenían recubrimiento hidrofóbico y material policarbonato, al realizar el estudio arrojaron resultados para

los ángulos de contacto de $34,80^\circ$ y $42,20^\circ$, como se muestran en la figura 48, que al compararse con los demás lentes que poseían el mismo recubrimiento eran los ángulos de valores más reducidos. En este caso, también se presume que existió un error por parte de la entidad al momento de la clasificación y envío de estos lentes para el estudio.

Figura 48. *Ángulo de contacto para superficies hidrofóbicas que no cumplen la condición de hidrofobicidad.*



El montaje optoelectrónico implementado y el método de detección de bordes utilizado en la investigación resultaron ser eficientes, prácticos y confiables para la medida del ángulo de contacto que existió entre las gotas de agua utilizadas y las superficies de los lentes oftálmicos con material Cr-39 y Policarbonato caracterizados con recubrimientos hidrofóbicos y superhidrofóbicos por las casas comerciales vinculadas al estudio. Se logró evidenciar que la mayoría de los ángulos de contacto obtenidos en los lentes oftálmicos que estuvieron en contacto con agua destilada no presentaron gran variación entre ángulos, sea que tuvieran recubrimientos hidrofóbicos o superhidrofóbicos. Sin embargo, en los lentes oftálmicos con recubrimiento hidrofóbico que estuvieron en contacto con agua de grifo y agua de lluvia se evidenciaron variaciones entre los diferentes ángulos de contacto evaluados, se hace posible que estos hallazgos

se deban al tipo de superficie y la relación existente entre estas y la cantidad de sustancia líquida implementada para el estudio.

Una de las limitaciones que se tuvo, fue que no se pudo garantizar las condiciones óptimas y el tipo de recubrimiento utilizados en los lentes por parte de las empresas, teniendo en cuenta que no se tenía ningún documento que certificara dicho estado, por lo cual, los resultados obtenidos quedan con esa condición de confiabilidad respecto lo estipulado por parte de las casas comerciales respecto a los lentes y los respectivos recubrimientos.

Hubiese resultado interesante poder realizar una imagen amplia, con ayuda de microscopía electrónica, respecto las películas que poseían los lentes en estudio, para poder advertir que particularidades geométricas tenían o presentan cada una de estas atendiendo a los materiales de los lentes oftálmicos sobre los cuales se aplicaron dichos recubrimientos.

5. Conclusiones

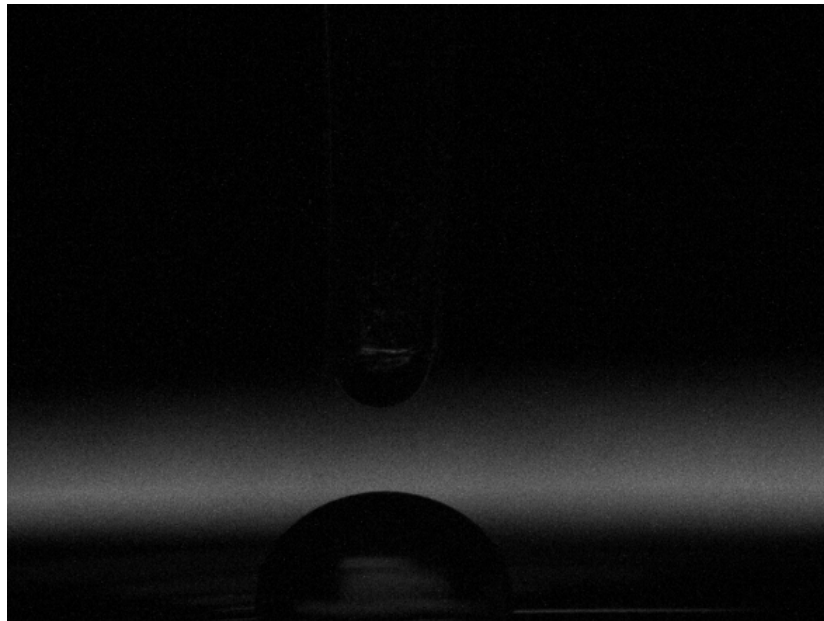
A través del método óptico implementado se logró determinar el ángulo de contacto en los diferentes lentes oftálmicos utilizados con recubrimientos superhidrofóbicos e hidrofóbicos concluyendo que los lentes que poseían recubrimiento superhidrofóbico no cumplían con el ángulo de contacto necesario para ser clasificado como superhidrofóbico, ya que al estar en contacto con el agua de grifo, de lluvia y destilada, no se logró obtener un ángulo de contacto cercano a los valores planteados por los autores.

5.1 Recomendaciones

Para próximas investigaciones relacionadas con el tema de estudio se recomienda tener en cuenta la precipitación de lluvias, las medidas, ya que el comportamiento de esta no es el mismo.

En cuanto al lente se recomienda que la empresa en donde se soliciten los lentes garantice que el lente contiene el filtro que se está utilizando ya que si no trae este filtro da un margen de error alto como se muestra en los resultados obtenidos y en la discusión planteada anteriormente, también se recomienda tener cuidado con la iluminación ya que si se tiene iluminación muy baja se tienden a presentar complicaciones para el procesamiento digital de las imágenes como se evidencia en la figura 49.

Figura 49. *Detección del ángulo de contacto con error en la iluminación.*



Referencias

1. Torrentes Burgués, J. Reporte: Medida del ángulo de contacto, [Internet], FOOT-UPC, Terrassa, 2020 [citado 4 marzo 2020]. Disponible en: <https://n9.cl/gat05>
2. Invisión, Lentes hidrofóbicas, [Sede web]. Invisionopticas.blogspot.com. [Actualizada el 3 de abril de 2009; citado 4 marzo 2020]. Disponible en: <https://invisionopticas.blogspot.com/2009/04/normal-0-21-false-false-false.html>
3. Pinzón Rodríguez, K. Y. y Rincón Castillo, J. S., Evaluación de compuestos químicos que proporcionen propiedades hidrofóbicas a textiles de algodón para Saint Germain Ltda, a nivel laboratorio, [Tesis de licenciatura], Bogotá, Fundación Universidad de América, [Citado 17 Marzo 2019]. Disponible en: <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6732/1/6131016-2018-1-IQ.pdf>
4. Ma M, Hill RM. Superhydrophobic surfaces. Vol. 11, Current Opinion in Colloid and Interface Science. Elsevier; 2006. p. 193–202.
5. Neira Arenas. G, Cañas M.L. Procedimiento para medir ángulos de contacto en sólidos particulados finos. ST [Internet]. 30 de julio de 2007 [citado 7 de marzo de 2019]; 1(36). Disponible en: <https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/5159>
6. Quéré, D., 2002. Surface chemistry: fakir droplets. Nat. Mater. 1, 14.
7. Shirtcliffe, N.J., McHale, G., Atherton, S., Newton, M.I., 2010. An introduction to superhydrophobicity. Adv. Colloid Interface Sci. 161, 124.
8. Rodriguez A. estudio del ángulo de contacto y mojabilidad a alta temperatura de fases líquidas en la sinterización de metales. [Internet]. Leganés: Universidad Carlos III de Madrid; 2010. [citado: 4 marzo 2020]. Disponible en: <https://n9.cl/zff6>
9. Blanco MT, Sacristán B, Lucio L, Blanco J, Pérez-Giraldo C, Cándido Gómez-García A. La hidrofobicidad de la superficie celular como indicador de otros factores de virulencia en *Candida albicans*. [Internet] Rev Iberoam Micol. 2010 Oct 1;27(4):195–9. [citado: 4 marzo 2020]. Disponible en: <https://n9.cl/f4gv7>
10. Bico, J., Tordeux, C., Quéré, D., 2001. Rough wetting. Europhys. Lett. 55, 214.
11. Quéré, D., 2008. Wetting and roughness. In: Clarke, D.R., Rühle, M., Tomsia, A.P. (Eds.), Annual Review of Materials Research, p. 71.

12. Halder A, Chatterjee N, Kar A, Pal S, Pramanik S. Edge detection: A statistical approach. [Internet] In: ICECT 2011 - 2011 3rd International Conference on Electronics Computer Technology. 2011. p. 306–9. [citado: 10 de marzo 2020] Disponible en: <https://n9.cl/rz6o>
13. Rodríguez-Meza, J. A., Silva-Ortigoza, R., Sandoval-Gutierrez, J., Antonio-Cruz, M., Taud, H., Alba-Juarez, J. N., ... & Macias-Igari, R. Control Based on Differential Flatness for a DC/DC Boost Converter via a Sigma-Delta-Modulator. 2015, Noviembre. In 2015 International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering (ICMEAE) (pp. 111-115). IEEE. [citado: 10 de marzo 2020]. Disponible en: <https://n9.cl/i5llr>
14. Rodríguez García-Cebadera Á. Estudio del ángulo de contacto y de la mojabilidad a alta temperatura de fases líquidas en la sinterización de metales. Leganés; 2010.
15. Wang L, Shen Y, Liu H, Guo Z. An accurate and efficient multi-category edge detection method [Internet]. Science Direct. 2019 [citado: 12 de marzo 2020]. Disponible en: <https://n9.cl/5pvv>
16. Universidad de Jaén. Detección de bordes en una imagen. [Internet]. 2006;1–21. [citado: 12 de Marzo 2020]. Disponible en: http://www4.ujaen.es/~satorres/practicas/practica3_vc.pdf
17. Anti-Reflex. [Internet]; citado: 17 de abril 2019. Disponible en: <https://labocosta.com/antireflex.html>
18. Blunt MJ, Alhosani A, Lin Q, Scanziani A, Bijeljic B. Determination of contact angles for three-phase flow in porous media using an energy balance. J Colloid Interface Sci [Internet]. 2021;582:283–90. [citado: 2020 agosto 31]. Disponible en: <https://n9.cl/yjlu>
19. Huang X, Gates I. Apparent Contact Angle around the Periphery of a Liquid Drop on Roughened Surfaces. Sci Rep [Internet]. 2020;10(1). [citado: 2020 agosto 31]. Disponible en: <https://n9.cl/1oks7>
20. Singh KK, Bajpai MK, Pandey RK. A novel approach for edge detection of low contrast satellite images. In: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives [Internet]. Alemania; 2015. p. 211–7. [Citado: 01 septiembre de 2020] Disponible en: <https://n9.cl/2jwtu>
21. Bi C, Yuan Y, Zhang R, Xiang Y, Wang Y, Zhang J. A Dynamic Mode Decomposition Based Edge Detection Method for Art Images. IEEE Photonics J [Internet]. 2017;9(6). [Citado: 01 septiembre de 2020]. Disponible en: <https://n9.cl/15fl>

22. Óptica Rosales. [Internet]. (2020). [citado: 2020 agosto 11], Disponible en: <https://opticarosales.blogspot.com/feeds/posts/default>
23. Fernández I. Diferencias entre lentes progresivas y bifocales [Internet]. Gafas.es. (2020) [citado 25 Octubre 2020]. Disponible en: <https://www.gafas.es/blog/consejos-curiosidades/diferencias-entre-lentes-progresivas-y-bifocales>
24. Jin-gu L, Kyung J. Gafas multifocales con ajuste automático de enfoque [Internet]. Corea; 2010 [citado: 19 de octubre 2019]. Disponible en: <https://n9.cl/vywji>
25. G. M. ¿Cuál es la diferencia entre las progresivas estándar y las de alta gama? [Internet]. Gafas.es. (2020) [citad 25 Octubre 2020]. Disponible en: <https://www.gafas.es/blog/diferencia-entre-las-progresivas-estandar-las-de-alta-gama>
26. Efecto de lentes de lentes multifocales en los patrones de pasos de usuarios novatos [Internet]. Doi-org.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co. 2019 [citado 19 Octubre 2019]. Disponible en: <https://n9.cl/gvav>
27. MEDITEGIC [Internet] (2020). [citado: 2020 agosto 11], Disponible en <https://n9.cl/o6rsd>
28. La evaluación de la transmitancia espectral de lentes ópticos [Internet]. Doi-org.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co. 2016 [cited 19 October 2019]. Disponible en: <https://doi-org.crai-ustadigital.usantotomas.edu.co/10.1016/j.ijleo.2015.11.034>
29. Alomar. Materiales de lentes oftálmicos [Internet]. [citado 2020 Nov 3]. p. 2–6. Disponible en: https://www.academia.edu/34193716/Materiales_de_lentes_ofthalmicos
30. Mishra V, Sharma R, Khatri N, Garg H, Karar V, Khan GS, et al. Processing of Polycarbonate by Ultra-Precision Machining for Optical Applications. [Internet] In: Materials Today: Proceedings. Elsevier Ltd; 2018. p. 25130–8. [citado 19 October 2019]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.314>
31. Materiales de los lentes - ¿Cuáles son los mejores para tus lentes? El | GafasWorld Colombia [Internet]. Gafasworld.com.co. 2019 [consultado el 19 de octubre de 2019]. Disponible en: <https://www.gafasworld.com.co/centro-optico/gafas-recetadas/materiales-de-los-lentes>
32. Yu, P. Trivex lens material: The technology behind the triple benefit. Research and Development, (12), 1-4. (2012); [citado: 20 de junio 2019]

33. Movil, A. Materiales de lentes. Grupo franja (Oftálmica, mercadeo y tecnología) [Modificado por última vez 12 Noviembre 2015; citado el 23 de Junio de 2020]. Disponible en: <https://grupofranja2.com/ofthalmica/item/926-materiales-de-lentes>
34. Le T-VT, Kim JM, Cha JC. Ophthalmic optical filters for prevention and reduction of photophobic effects and responses [Internet]. Estados Unidos, US 2016/0282532 A1 [citado: 2020 agosto 31]. Disponible en: <https://patentimages.storage.googleapis.com/33/e6/76/f35ce2e0371414/US20160282532A1.pdf>
35. Meyer EE, Rosenberg KJ, Israelachvili J. Recent progress in understanding hydrophobic interactions. Proc Natl Acad Sci U S A [Internet]. 2006;103(43):15739–46. [citado: 2020 agosto 31]. Disponible en: <https://n9.cl/ei0i0>
36. Maghsoudi K, Vazirinasab E, Momen G, Jafari R. Icephobicity and durability assessment of superhydrophobic surfaces: The role of surface roughness and the ice adhesion measurement technique. J Mater Process Technol [Internet]. 2021;288(09240136) [citado: 2020 agosto 31]. Disponible en: <https://n9.cl/enus>
37. Filtros y Tratamientos de lentes Oftálmicos | Grupo Nissi [Internet]. Grupo-nissi.com. 2017. Citado 15 Octubre 2019. Disponible en: <http://grupo-nissi.com/nissi/index.php/filtros>
38. Shirtcliffe, N.J., McHale, G., Atherton, S., Newton, M.I., 2010. An introduction to superhydrophobicity. Adv. Colloid Interface Sci. 161, 124.
39. Bico, J., Tordeux, C., Quéré, D., 2001. Rough wetting. Europhys. Lett. 55, 214.
40. Crown-of-Thorns (*Euphorbia milii*). (2020). [citado 2 Septiembre 2020], Disponible en: <https://www.inaturalist.org/observations/58113497>
41. Orellana, J. et al. c Características del agua potable. Unidad temática N° 3. 2005 [Internet] [citado: 15 de junio 2020] Disponible en: <https://n9.cl/vbzp>
42. Quéré, D., 2008. Wetting and roughness. In: Clarke, D.R., Rühle, M., Tomsia, A.P. (Eds.), Annual Review of Materials Research, p. 71.
43. Lifeder. [Internet] (2020). [citado: 2020 agosto 11], Disponible en https://www.lifeder.com/wp-content/uploads/2019/01/640px-Distillation_PSF.png
44. Raffino, M.E. Agua Destilada [Internet]. Argentina [Modificado por última vez 16 Junio 2020; citado el 25 de mayo de 2020]. Disponible en: <https://concepto.de/agua-destilada/>

45. Rodríguez, R. et al. 2004. Composición química de las precipitaciones, deposición de sales y evaluación de la recarga en la región orientas de cuba. Boletín geológico y minero, 115, Núm. especial: 341-356
46. Dajer chadid G, Iragorri hormaza J, Villazón de Armas C, Tarazona Solano. E. [Internet]. Derechodeautor.gov.co. 2020 [citado 11 Octubre 2019]. Disponible en: <https://n9.cl/867r>
47. Blanco Santamaria j. Código de Etica Profesional de Optometría Artículo 1o. [Internet]. Leyes.co. 2020 [citado 11 Octubre 2019]. Disponible en: https://leyes.co/codigo_de_etica_profesional_de_optometria/1o.htm
48. El tiempo en Bucaramanga en Marzo de 2022: tabla de temperaturas y clima - Climate-Data.org [Internet]. [citado 2021 Sep 26]. Disponible en: <https://es.climate-data.org/america-del-sur/colombia/santander/bucaramanga-5923/t/marzo-3/>
49. Melo R, Barreto JP, Falcão G. A new solution for camera calibration and real-time image distortion correction in medical endoscopy-initial technical evaluation. IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 2012 Mar;59(3):634–44.
50. Bustamante Mejia J, López Varona R. Calibración de Cámara Termográfica Fluke TI-32 Thermographic camera calibration FLUKE TI-32 Investigadora 2013-2014 por el grupo de electrofisiología. Scientia et Technica Año XIX. 19(1).
51. Shang Y, Sun X, Yang X, Wang X, Yu Q. A camera calibration method for large field optical measurement. Optik. 2013 Dec;124(24):6553–8.
52. Torrent Burgués J. Report: Medida del ángulo de contacto [Internet]. [citado 2021 Oct 16]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/17638/Report%20Mesura%20angle%20contacte%20def.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
53. Rodríguez García-Cebadera Á, González AQ. Estudio del ángulo de contacto y de la mojabilidad a alta temperatura de fases líquidas en la sinterización de metales. [Internet]. 2010 [citado 2021 Oct 16]. Disponible en: https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/10046/PFC_Alvaro_Rodriguez_Garcia;jsessionid=93CB61B077FC843488DB20DCC8E8FA4C?sequence=1
54. Fernández Cañete, A. Estudio de la hidrofobicidad y autolimpieza en materiales con nanotratamiento superficiales [Internet] (2021) [citado 2021 Oct 14]. Disponible en:

- https://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2013/hdl_2072_234675/PFC_AgustinFernandezCanete.pdf
55. Valverde J. Detección de bordes mediante el algoritmo de Canny. ResearchGate [Internet]. 2007;(Octubre 2007):8. [citado 10 Octubre 2021]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/267240432_Deteccion_de_bordes_mediante_el_algoritmo_de_Canny
 56. Valiente R Ivera A. Comparación del ángulo de humectación en distintos tipos de lentes de contacto [Internet]. [Valladolid]; 2018 [citado 2021 Oct 16]. Disponible en: <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/31996/TFG-G2973.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
 57. Guo, Z., Liu, W., 2007. Biomimic from the superhydrophobic plant leaves in nature: binary structure and unitary structure. *Plant Sci.* 172, 1103.
 58. Ishino, C., Okumura, K., Quéré, D., 2004. Wetting transitions on rough surfaces. *Europhys. Lett.* 68, 419.
 59. Boreyko, J.B., Collier, C.P., 2013. Dewetting transitions on superhydrophobic surfaces: when are wenzel drops reversible? *J. Phys. Chem. C* 117, 18084.
 60. Wenzel, R.N., 1936. Resistance of solid surfaces to wetting by water. *Ind. Eng. Chem.* 28, 988
 61. Cassie, A.B.D., Baxter, S., 1944. Wettability of porous surfaces. *Trans. Faraday Soc.* 40, 546.
 62. Fogg, G.E., 1944. Diurnal fluctuation in a physical property of leaf cuticle. *Nature* 154, 515.
 63. Love, J.C., Gates, B.D., Wolfe, D.B., Paul, K.E., Whitesides, G.M., 2002. Fabrication and wet-ting properties of metallic half-shells with submicron diameters. *Nano Lett.* 2, 891.
 64. Li, J., Fu, J., Cong, Y., Wu, Y., Xue, L., Han, Y., 2006. Macroporous fluoropolymeric films templated by silica colloidal assembly: a possible route to super-hydrophobic surfaces. *Appl. Surf. Sci.* 252, 2229.
 65. Sun, C., Ge, L.Q., Gu, Z.Z., 2007. Fabrication of super-hydrophobic film with dual-size roughness by silica sphere assembly. *Thin Solid Films* 515, 4686.

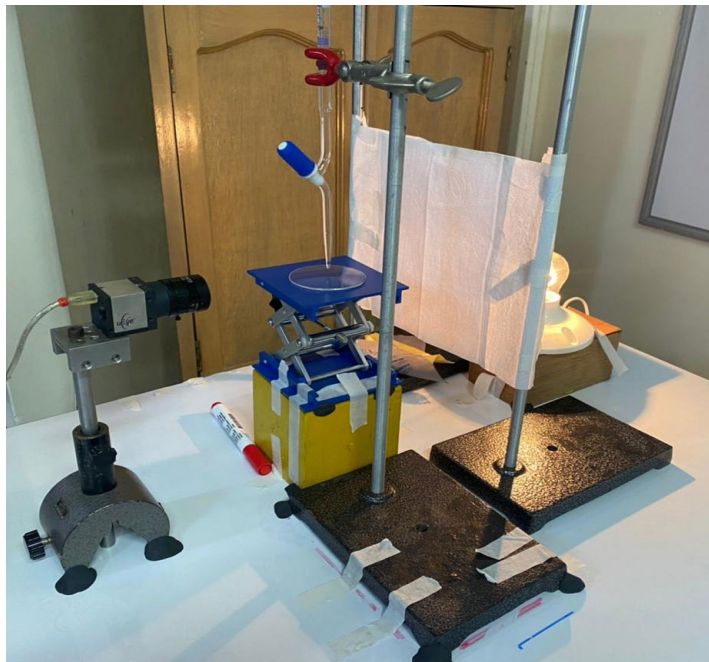
66. Sun, X.L., Fan, Z.P., Zhang, L.D., Wang, L., Wei, Z.J., Wang, X.Q., Liu, W.L., 2011. Superhydrophobicity of silica nanoparticles modified with polystyrene. *Appl. Surf. Sci.* 257, 2308.

Apéndices

Apéndice A. Prueba piloto

Se aplicó una prueba piloto para la toma de la medida del ángulo de contacto del lente 1. Para realizar la medida del ángulo de contacto generado entre la gota y la superficie de cada lente oftálmico, fue necesario diseñar un montaje experimental, a través de un sistema óptico, compuesto por una cámara CMOS marca Edmund Optics con resolución de $1600 \text{ píxeles} \times 1200 \text{ píxeles}$, con objetivo de microscopio de 25mm de focal/ $F1.4$, una fuente de iluminación con bombillo dimerizable, un difusor, una bureta de 25ml , las gotas que salían de la bureta tenían un volumen aproximado de $0,05\text{ml}$, los lentes se ubicaron sobre una plataforma mecánica que puede variar la altura de $40\text{mm} - 150\text{mm}$ y un área de 100cm^2 . En la siguiente figura se muestra el montaje experimental implementado.

Montaje experimental utilizando inicialmente



Al tomar la primera muestra, se evidenció la dificultad de controlar la fuente de luz en la gota de agua, hecho que no permite realizar una evaluación precisa del ángulo de contacto, por lo tanto, se modificó el montaje empleando un difusor más delgado y una caja recubierta con cartulina negra, dentro de ésta se encontraba la fuente de luz, esto se realizó para evitar reflexión especular y difusa generada por los objetos alrededor. Después de realizar la segunda toma, se decidió cambiar la bureta donde se encontraba la muestra de los diferentes tipos de agua por el titulador digital automático. Este dispositivo realiza un registro digital del volumen de la gota que se aplicó sobre el lente. En la figura titulador digital, se muestra la imagen del titulador que se implementó en el montaje optoelectrónico utilizado.

Titulador digital



Para tener información de las sustancias líquidas (tipos de agua) utilizadas en la investigación se determinaron algunas propiedades físicas de dichas sustancias, entre las cuales se

tienen la acidez medida a través del pH, la transparencia medida por el grado de turbidez, conductividad, la dependencia de la velocidad de la luz en la sustancia determinada con el índice de refracción, simultáneamente, los sólidos disueltos en los líquidos a través de los grados Brix.

Las medidas de estas variables se realizaron en el laboratorio de Química de la Universidad Santo Tomás Seccional Bucaramanga. El índice de refracción y los grados Brix se midieron con el refractómetro digital RX – 5000 α , tal como se muestra en la figura.

Refractómetro digital RX-5000a.



La turbidez se midió con un turbidímetro-2005, la conductividad y el pH se determinaron con un dispositivo multiparámetro. En la siguiente figura se muestran las imágenes de los dispositivos mencionados.

Toma de datos de las propiedades físicas del agua.



a. Turbidímetro



b. Dispositivo multiparámetro



c. Toma de datos con los dispositivos

Teniendo en cuenta los resultados que se obtuvieron de las mediciones realizadas, se consideró pertinente adicionar las siguientes variables: grado BRIX, Turbidez y Conductividad del agua, ya que estas propiedades físicas brindan más información respecto a los tipos de agua

utilizados en el trabajo de investigación, lo cual fortalece los resultados que se adquieren en la medición del ángulo de contacto.

Apéndice B. Base de datos

Base de datos

LENTE				AGUAS							MEDIDA ANGULO DE CONTACTO				DESVIACION MEDIA	
MATERIAL	INDICE DE REFRACCION MATERIAL	NUMERO ABBE	CASA COMERCIAL	FILTRO	TIPO DE AGUA	INDICE DE REFRACCION	BRX	PH	TURBIDEZ	CONDUCTIVIDAD	ANGULO 1	ANGULO 2	ANGULO 3	ANGULO 4	PROMEDIO	
CR-39	1.49	58	MEGALENS	HIDROFORO	AGUA DE GRIFO	1.3305	0.04%	6.94	0.74	90.4	77.302	76.962	76.802	76.467	77.231	0.486
POURCARBONATO	1.58	30	MEGALENS	HIDROFORO	AGUA DE GRIFO	1.3305	0.04%	6.94	0.74	90.4	42.7970	42.388	41.841	41.820	42.205	0.283
CR-39	1.49	58	MEGALENS	SUPERHIDROFORO	AGUA DE GRIFO	1.3305	0.04%	6.94	0.74	90.4	76.7982	77.205	76.903	77.3803	76.991	0.143
POURCARBONATO	1.58	30	MEGALENS	SUPERHIDROFORO	AGUA DE GRIFO	1.3305	0.04%	6.94	0.74	90.4	76.8496	76.822	77.6812	77.6881	77.3150	0.274
CR-39	1.49	58	MEGALENS	HIDROFORO	AGUA DE LLUVIA	1.3313	0.10%	7.37	2.01	690	79.3108	79.242	79.381	79.250	79.3025	0.0479
POURCARBONATO	1.58	30	MEGALENS	HIDROFORO	AGUA DE LLUVIA	1.3313	0.10%	7.37	2.01	690	44.6372	31.9139	31.850	31.6687	34.8054	4.6179
CR-39	1.49	58	MEGALENS	SUPERHIDROFORO	AGUA DE LLUVIA	1.3313	0.10%	7.37	2.01	690	79.2900	74.973	74.301	73.9249	74.5138	0.009
POURCARBONATO	1.58	30	MEGALENS	SUPERHIDROFORO	AGUA DE LLUVIA	1.3313	0.10%	7.37	2.01	690	79.8365	79.765	79.635	79.195	79.5975	0.2190
CR-39	1.49	58	MEGALENS	HIDROFORO	AGUA DESTILADA	1.3304	0.03%	6.42	0.52	3.71	71.2778	71.435	72.2403	71.5663	71.6390	0.3132
POURCARBONATO	1.58	30	MEGALENS	SUPERHIDROFORO	AGUA DESTILADA	1.3304	0.03%	6.42	0.52	3.71	78.3015	75.8068	75.9311	75.9385	75.8660	0.1638
CR-39	1.49	58	MEGALENS	HIDROFORO	AGUA DESTILADA	1.3304	0.03%	6.42	0.52	3.71	52.2978	52.3028	51.2040	50.6925	51.6468	0.0885
POURCARBONATO	1.58	30	MEGALENS	SUPERHIDROFORO	AGUA DESTILADA	1.3304	0.03%	6.42	0.52	3.71	80.5937	80.948	80.484	80.3798	80.4167	0.0640
CR-39	1.49	58	MEGALENS	HIDROFORO	AGUA DESTILADA	1.3304	0.03%	6.42	0.52	3.71	77.2667	77.6000	77.6480	77.5289	77.5594	0.1082
POURCARBONATO	1.58	30	MEGALENS	HIDROFORO	AGUA DESTILADA	1.3304	0.03%	6.42	0.52	3.71	77.7034	80.887	78.685	77.9280	78.4422	0.8233
CR-39	1.49	58	MEGALENS	SUPERHIDROFORO	AGUA DESTILADA	1.3304	0.03%	6.42	0.52	3.71	80.5092	80.7142	80.3907	81.2120	80.6000	0.3900
POURCARBONATO	1.58	30	MEGALENS	SUPERHIDROFORO	AGUA DESTILADA	1.3304	0.03%	6.42	0.52	3.71	80.5792	80.9081	80.9165	81.2703	80.9321	0.3131
CR-39	1.49	58	MEGALENS	HIDROFORO	AGUA DESTILADA	1.3304	0.03%	6.42	0.52	3.71	81.0512	81.0688	80.715	80.9705	80.9555	0.1120
POURCARBONATO	1.58	30	MEGALENS	SUPERHIDROFORO	AGUA DESTILADA	1.3304	0.03%	6.42	0.52	3.71	79.2419	79.5153	79.664	79.9047	78.9161	0.4805
CR-39	1.49	58	MEGALENS	HIDROFORO	AGUA DE GRIFO	1.3305	0.04%	6.94	0.74	90.4	76.4713	75.9311	76.2074	76.9185	76.4128	0.294
POURCARBONATO	1.58	30	MEGALENS	HIDROFORO	AGUA DE GRIFO	1.3305	0.04%	6.94	0.74	90.4	71.0128	68.463	70.384	69.5456	69.8655	0.7200
CR-39	1.49	58	MEGALENS	SUPERHIDROFORO	AGUA DE GRIFO	1.3305	0.04%	6.94	0.74	90.4	73.0677	73.876	73.273	73.0943	73.1542	0.1032
POURCARBONATO	1.58	30	MEGALENS	SUPERHIDROFORO	AGUA DE GRIFO	1.3305	0.04%	6.94	0.74	90.4	76.4713	75.9311	76.2074	76.9185	76.4128	0.294
CR-39	1.49	58	MEGALENS	HIDROFORO	AGUA DE GRIFO	1.3305	0.04%	6.94	0.74	90.4	77.8465	77.225	75.747	76.1377	76.7981	0.7964
POURCARBONATO	1.58	30	MEGALENS	SUPERHIDROFORO	AGUA DE GRIFO	1.3305	0.04%	6.94	0.74	90.4	76.8144	76.991	76.2144	76.3897	76.3897	0.1771
CR-39	1.49	58	MEGALENS	HIDROFORO	AGUA DE GRIFO	1.3305	0.04%	6.94	0.74	90.4	73.8748	73.954	73.954	73.6539	73.3253	0.4663
POURCARBONATO	1.58	30	MEGALENS	HIDROFORO	AGUA DE LLUVIA	1.3313	0.10%	7.37	2.01	690	74.3021	74.951	74.6807	74.2880	74.4060	0.2736
CR-39	1.49	58	MEGALENS	SUPERHIDROFORO	AGUA DE LLUVIA	1.3313	0.10%	7.37	2.01	690	65.7727	65.1771	65.1796	65.2789	65.3338	0.2104
POURCARBONATO	1.58	30	MEGALENS	SUPERHIDROFORO	AGUA DE LLUVIA	1.3313	0.10%	7.37	2.01	690	72.9563	72.9400	72.9539	72.9158	73.2415	0.1136
CR-39	1.49	58	MEGALENS	HIDROFORO	AGUA DE LLUVIA	1.3313	0.10%	7.37	2.01	690	74.7979	74.566	74.6147	74.4622	74.5502	0.1118
POURCARBONATO	1.58	30	MEGALENS	SUPERHIDROFORO	AGUA DE LLUVIA	1.3313	0.10%	7.37	2.01	690	77.5349	77.5608	77.576	77.5883	77.2443	0.0746
CR-39	1.49	58	MEGALENS	HIDROFORO	AGUA DE GRIFO	1.3305	0.04%	6.94	0.74	90.4	75.7942	75.395	74.986	74.4255	75.4860	0.101
POURCARBONATO	1.58	30	MEGALENS	SUPERHIDROFORO	AGUA DE GRIFO	1.3305	0.04%	6.94	0.74	90.4	75.5107	75.583	82.012	74.7176	77.0140	2.5396
CR-39	1.49	58	UNILENTS	HIDROFORO	AGUA DE GRIFO	1.3305	0.04%	6.94	0.74	90.4	78.1114	78.144	77.2676	77.7466	77.2622	0.3056
POURCARBONATO	1.58	30	UNILENTS	HIDROFORO	AGUA DE GRIFO	1.3305	0.04%	6.94	0.74	90.4	74.4754	75.152	73.909	76.8700	76.1754	0.8601
CR-39	1.49	58	UNILENTS	SUPERHIDROFORO	AGUA DE GRIFO	1.3305	0.04%	6.94	0.74	90.4	79.795	78.7076	78.908	79.0837	79.0902	0.2947
POURCARBONATO	1.58	30	UNILENTS	SUPERHIDROFORO	AGUA DE GRIFO	1.3305	0.04%	6.94	0.74	90.4	80.7538	80.1039	81.1665	80.5151	80.7421	0.2287
CR-39	1.49	58	UNILENTS	HIDROFORO	AGUA DESTILADA	1.3304	0.03%	6.42	0.52	3.71	82.241	81.827	81.832	81.9204	81.7666	0.1417
POURCARBONATO	1.58	30	UNILENTS	SUPERHIDROFORO	AGUA DESTILADA	1.3304	0.03%	6.42	0.52	3.71	79.2461	78.100	77.623	75.964	77.4887	1.1844
CR-39	1.49	58	UNILENTS	HIDROFORO	AGUA DESTILADA	1.3304	0.03%	6.42	0.52	3.71	69.271	67.861	66.564	68.1718	64.9513	1.812
POURCARBONATO	1.58	30	UNILENTS	SUPERHIDROFORO	AGUA DESTILADA	1.3304	0.03%	6.42	0.52	3.71	77.7418	77.186	77.4813	77.5045	77.4796	0.1495
CR-39	1.49	58	UNILENTS	HIDROFORO	AGUA DESTILADA	1.3304	0.03%	6.42	0.52	3.71	71.0172	70.509	70.150	70.137	70.5067	0.258
POURCARBONATO	1.58	30	UNILENTS	SUPERHIDROFORO	AGUA DESTILADA	1.3304	0.03%	6.42	0.52	3.71	78.8247	78.9973	79.276	79.2793	79.1800	0.2890
CR-39	1.49	58	UNILENTS	HIDROFORO	AGUA DESTILADA	1.3304	0.03%	6.42	0.52	3.71	78.8397	79.369	78.219	74.5265	75.3733	1.2822
POURCARBONATO	1.58	30	UNILENTS	SUPERHIDROFORO	AGUA DESTILADA	1.3304	0.03%	6.42	0.52	3.71	79.3856	75.991	75.1287	75.0662	75.3049	0.1714
CR-39	1.49	58	UNILENTS	HIDROFORO	AGUA DESTILADA	1.3304	0.03%	6.42	0.52	3.71	73.5223	73.475	73.876	73.887	73.5131	0.0916
POURCARBONATO	1.58	30	UNILENTS	SUPERHIDROFORO	AGUA DE LLUVIA	1.3304	0.03%	7.41	4.12	26.1	49.732	49.875	49.829	49.9302	49.9302	0.2125
CR-39	1.49	58	UNILENTS	HIDROFORO	AGUA DE LLUVIA	1.3304	0.03%	7.41	4.12	26.1	75.563	75.942	76.122	75.9779	76.652	0.1545
POURCARBONATO	1.58	30	UNILENTS	SUPERHIDROFORO	AGUA DE LLUVIA	1.3304	0.03%	7.41	4.12	26.1	71.6435	72.412	72.458	71.8093	72.2850	0.3485
CR-39	1.49	58	UNILENTS	HIDROFORO	AGUA DE LLUVIA	1.3304	0.03%	7.41	4.12	26.1	79.1030	79.256	78.742	79.0854	79.0651	0.1094
POURCARBONATO	1.58	30	UNILENTS	SUPERHIDROFORO	AGUA DE LLUVIA	1.3304	0.03%	7.41	4.12	26.1	73.940	73.185	73.073	73.2439	72.7434	2.0847
CR-39	1.49	58	UNILENTS	HIDROFORO	AGUA DE LLUVIA	1.3304	0.03%	7.41	4.12	26.1	76.489	74.979	75.363	76.301	74.510	0.615
POURCARBONATO	1.58	30	UNILENTS	SUPERHIDROFORO	AGUA DE LLUVIA	1.3304	0.03%	7.41	4.12	26.1	77.9992	77.968	78.358	78.322	78.1628	0.1812