

EVALUACIÓN DE PRODUCTOS QUÍMICOS QUE PROPORCIONEN
PROPIEDADES HIDROFÓBICAS A TEXTILES DE ALGODÓN PARA SAINT
GERMAIN LTDA, A NIVEL LABORATORIO

KAREN YULIETH PINZÓN RODRÍGUEZ
JOHAN SEBASTIAN RINCÓN CASTILLO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2018

EVALUACIÓN DE PRODUCTOS QUÍMICOS QUE PROPORCIONEN
PROPIEDADES HIDROFÓBICAS A TEXTILES DE ALGODÓN PARA SAINT
GERMAIN LTDA, A NIVEL LABORATORIO

KAREN YULIETH PINZÓN RODRÍGUEZ
JOHAN SEBASTIAN RINCÓN CASTILLO

Proyecto integral de grado para optar por el título de
INGENIERO QUÍMICO

Director
Fabián Ballesteros Ochoa
Ingeniero Químico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERIAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2018

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C, Febrero de 2018

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Jaime Posada Díaz

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada García – Peña

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra. Ana Josefa Herrera Vargas

Secretario General

Dr. Juan Carlos Posada García – Peña

Decano Facultad de Ingenierías

Ing. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director Programa Ingeniería Química

Ing. Leonardo de Jesús Herrera Gutiérrez

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de grado a mis padres, porque sé todo lo que han sacrificado para permitirme llegar hasta este punto, gracias a ellos por creer, confiar y dejarme ser durante toda la vida.

Karen Yulieth Pinzón Rodríguez

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a Dios, por haberme dado la oportunidad de llegar hasta este punto, por cuidarme a cada instante, por darme fortaleza para superar las dificultades y por poner en mi camino a todas esas personas que me han ayudado a crecer; además de infinita bondad y amor.

A mis padres, porque sin su ayuda y sus sacrificios nada de esto hubiera sido posible. Por su apoyo incondicional y su preocupación a lo largo de toda mi carrera; por lo buenos consejos, el ejemplo que me han dado incluso con las reprimendas.

Johan Sebastian Rincón Castillo

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a mis padres, mi hermana y mi abuelita por apoyar siempre mis decisiones a lo largo de esta etapa de mi vida, a mi compañero Johan por su paciencia y ayuda, al ingeniero Fabián Ballesteros por todo el conocimiento compartido y la colaboración, a Alejandro por mantenerse a mi lado en los momentos más difíciles de la carrera, a todos los docentes que aportaron a mi formación y a la Universidad de América por ser el lugar donde inicia y finaliza esta experiencia.

Karen Yulieth Pinzón Rodríguez

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por darme su amor para terminar lo que con tanta ilusión y alegría un día comencé, por permitirme alcanzar mis metas propuestas y proyectar nuevos sueños. A mis padres por toda la educación que me han brindado, por respetar mis decisiones y por darle alas a mis proyectos. A mi compañera Karen por todo su apoyo y por haberme levantado cuando más lo he necesitado. Al ingeniero Fabián Ballesteros por su paciencia, disposición y por guiarnos a lo largo de todo este proyecto. A los maestros que hicieron parte de mi formación como ingeniero, por aportar su granito de arena para hacer de mí un gran profesional. A la Universidad de América por la confianza puesta en nosotros para representarla y por las experiencias vividas, y al Centro de Manufactura en Textil y Cuero – Sena Textil por abrirnos las puertas y por el apoyo institucional para lograr la culminación de este trabajo de grado.

Johan Sebastian Rincón Castillo

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	22
OBJETIVOS	23
1. GENERALIDADES	24
1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA EMPRESA	24
1.1.1 Organigrama	24
1.1.2 Localización	24
1.1.3 Procesos	25
1.2 MARCO TEÓRICO	26
1.2.1 Hidrofobicidad	26
1.2.2 Ángulo de contacto	26
1.2.2.1 Modelos teóricos	28
1.2.3 Ángulo de contacto de histéresis (ACH)	30
1.2.4 Fuerzas de adhesión y cohesión	31
1.2.5 Tensión superficial y energía superficial	31
1.2.6 Superficies superhidrofóbicas	32
1.2.6.1 Superficies superhidrofóbicas naturales	32
1.2.6.2 Superficies superhidrofóbicas artificiales	33
1.2.7 Fabricación de recubrimientos hidrofóbicos	33
1.2.7.1 Inmersión	33
1.2.8 Emulsiones	34
1.2.8.1 Definiciones	34
1.2.8.2 Introducción	36
1.2.8.3 Formulación fisicoquímica	37
1.2.8.4 Viscosidad de las emulsiones	37
1.2.8.5 Estabilidad de las emulsiones	38
1.2.8.6 Tamaño de gota y distribución de tamaños	39
1.2.8.7 Preparación de las emulsiones	39
2. ANÁLISIS DEL TEXTIL HIDROFÓBICO	41
2.1 ESPECTROSCOPIA FTIR	41
2.2 EQUIPOS	42
2.3 MÉTODOS	42
2.4 ANÁLISIS FTIR	43
3. PREPARACIÓN DE RECUBRIMIENTOS	48
3.1 SELECCIÓN DE MATERIAS PRIMAS	48
3.2 EQUIPOS	48
3.3 ÁCIDO GRASO	51
3.3.1 Métodos	51

3.4 SILICONA	56
3.4.1 Métodos	56
3.5 FLUOROQUÍMICOS	59
3.5.1 Métodos	59
4. CONDICIONES DE APLICACIÓN Y CURADO	61
5. PRUEBAS DE RESISTENCIA AL LAVADO	71
6. COSTO DE PRODUCCIÓN	78
7. CONCLUSIONES	81
8. RECOMENDACIONES	83
BIBLIOGRAFÍA	84
ANEXOS	88

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Productos elaborados por Industrias Químicas Saint Germain Ltda	25
Cuadro 2. Clasificación de los materiales según el ángulo de contacto	27
Cuadro 3. Características infrarrojas de un anillo aromático	44
Cuadro 4. Características infrarrojas de una cadena carbonada	44
Cuadro 5. Características infrarrojas de un grupo carbonilo en un éster	45
Cuadro 6. Características infrarrojas de un grupo funcional isotiocianato	45
Cuadro 7. Equipos empleados en la experimentación	49
Cuadro 8. Ángulos de contacto para el ácido graso por inmersión	64
Cuadro 9. Ángulos de contacto para la silicona por inmersión	65
Cuadro 10. Ángulos de contacto para el fluoroquímico A por inmersión	65
Cuadro 11. Ángulos de contacto para el fluoroquímico B por inmersión	66
Cuadro 12. Ángulos de contacto para el fluoroquímico C por inmersión	66
Cuadro 13. Ángulos de contacto para el ácido graso por Foulard	67
Cuadro 14. Ángulos de contacto para la silicona por Foulard	67
Cuadro 15. Ángulos de contacto para el fluoroquímico A por Foulard	68
Cuadro 16. Ángulos de contacto para el fluoroquímico B por Foulard	68
Cuadro 17. Ángulos de contacto para el fluoroquímico C por Foulard	69
Cuadro 18. Resultados primer ciclo de lavado	72
Cuadro 19. Resultados segundo ciclo de lavado	72
Cuadro 20. Resultados tercer ciclo de lavado	73
Cuadro 21. Ángulos de contacto después del primer ciclo de lavado	73

Cuadro 22. Ángulos de contacto después del segundo ciclo de lavado	75
Cuadro 23. Ángulos de contacto después del tercer ciclo de lavado	76

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Selección de las materias primas a través de la energía superficial	48
Tabla 2. Solubilidad del ácido graso en alcohol a temperatura ambiente	52
Tabla 3. Relación de ácido graso y surfactante en las emulsiones preparadas	53
Tabla 4. Datos experimentales de la reología de cada experimento	54
Tabla 5. Solubilidad del ácido graso en alcohol a ~50°C	55
Tabla 6. Proporciones de los experimentos con silicona	56
Tabla 7. Viscosidades de los experimentos cinco a nueve de silicona	58
Tabla 8. Proporción de las disoluciones de fluoroquímicos A, B y C	59
Tabla 9. Concentraciones seleccionadas para el diseño de experimentos	60
Tabla 10. Diseño de experimentos para ácido graso	62
Tabla 11. Diseño de experimentos para silicona	63
Tabla 12. Diseño de experimentos para fluoroquímico A, B y C	63
Tabla 13. Precio de los compuestos	78
Tabla 14. Costos de producción Ácido Graso 0.5%	79
Tabla 15. Costos de producción Fluoroquímicos A, B y C 2%	80

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Organigrama de Industrias Químicas Saint Germain Ltda	24
Figura 2. Esquema general el fenómeno de mojabilidad	26
Figura 3. Modelo de mojabilidad planteado por Young	28
Figura 4. Modelo de mojabilidad planteado por Wenzel	29
Figura 5. Modelo de mojabilidad planteado por Cassie-Baxter	29
Figura 6. Una gota de líquido en una superficie vertical	30
Figura 7. Esquema de las fuerzas de adhesión y cohesión	31
Figura 8. Fuerzas intermoleculares en una gota de agua sobre una superficie	32
Figura 9. Superhidrofobicidad presente en las hojas de la flor de loto	33
Figura 10. Procedimiento de inmersión en solución	34
Figura 11. Tipos de emulsión	35
Figura 12. Mecanismos de desestabilización de las emulsiones	38
Figura 13. Equipo Shimadzu SSX 550	42
Figura 14. Espectro resultante para la primera muestra de textil	43
Figura 15. Monómero del poliéster	46
Figura 16. Espectro para ambas muestras de textil	46
Figura 17. Sección del espectro	46
Figura 18. Experimentos Em AG uno a seis después del periodo de reposo	53
Figura 19. Experimentos Em S uno a nueve después del periodo de reposo	57
Figura 20. Montaje para la prueba de gota de agua	64
Figura 21. Montaje prueba de resistencia al lavado	72

LISTA DE DIAGRAMAS

	pág.
Diagrama 1. Metodología del método 1	51
Diagrama 2. Metodología del método 2	52
Diagrama 3. Metodología prueba de hidrofobicidad (por inmersión)	61
Diagrama 4. Metodología prueba de hidrofobicidad (por Foulard)	62
Diagrama 5. Metodología prueba de resistencia al lavado	71

LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfica 1. Perfil de viscosidad promedio para los Em AG uno a seis	54
Gráfica 2. Perfil de viscosidades para los experimentos Em S 5 a 9	58
Gráfica 3. Disminución en el ángulo de contacto para inmersión	76
Gráfica 4. Disminución en el ángulo de contacto para Foulard	77

LISTA DE ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

- θ – Ángulo de Contacto.
 γ – Tensión superficial.
 γ_{SV} – Tensión superficial en la interfase sólido-vapor.
 γ_{SL} – Tensión superficial en la interfase sólido-líquido.
 γ_{LV} – Tensión superficial en la interfase líquido-vapor.
 θ_W^* – Ángulo aparente de contacto.
 r – Factor de rugosidad.
 ϕ_S – Fracción del área total de las interfases paralela a la superficie rugosa.
 r_f – Área proyectada.
 θ_A – Ángulo de avance.
 θ_R – Ángulo de retroceso.
O/W – Emulsión de aceite en agua.
W/O – Emulsión de agua en aceite.
 η_0 – Viscosidad de la fase externa de una emulsión.
 η – Viscosidad de una emulsión.
Sol AG 1 – Prueba #1 de solubilidad de ácido graso en alcohol a Ambiente.
Sol AG 2 – Prueba #2 de solubilidad de ácido graso en alcohol a Ambiente.
Sol AG 3 – Prueba #3 de solubilidad de ácido graso en alcohol a Ambiente.
Sol AG 4 – Prueba #4 de solubilidad de ácido graso en alcohol a Ambiente.
Em AG 1 – Emulsión #1 de ácido graso.
Em AG 2 – Emulsión #2 de ácido graso.
Em AG 3 – Emulsión #3 de ácido graso.
Em AG 4 – Emulsión #4 de ácido graso.
Em AG 5 – Emulsión #5 de ácido graso.
Em AG 6 – Emulsión #6 de ácido graso.
Sol TAG 1 – Prueba #1 de solubilidad de ácido graso en alcohol a 50°C.
Sol TAG 2 – Prueba #2 de solubilidad de ácido graso en alcohol a 50°C.
Sol TAG 3 – Prueba #3 de solubilidad de ácido graso en alcohol a 50°C.
Sol TAG 4 – Prueba #4 de solubilidad de ácido graso en alcohol a 50°C.
Sol TAG 5 – Prueba #5 de solubilidad de ácido graso en alcohol a 50°C.
Em S 1 – Emulsión #1 de Silicona.
Em S 2 – Emulsión #2 de Silicona.
Em S 3 – Emulsión #3 de Silicona.
Em S 4 – Emulsión #4 de Silicona.
Em S 5 – Emulsión #5 de Silicona.
Em S 6 – Emulsión #6 de Silicona.
Em S 7 – Emulsión #7 de Silicona.
Em S 8 – Emulsión #8 de Silicona.
Em S 9 – Emulsión #9 de Silicona.

GLOSARIO

ÁNGULO DE CONTACTO: es el ángulo que forma un líquido con una superficie sólida cuando ambos entran en contacto. Está determinado por las propiedades tanto del sólido como del líquido y por las fuerzas de interacción y repulsión entre ellos. El ángulo de contacto, en última instancia, determina que tan hidrofóbica o hidrofílica puede llegar a ser una superficie sólida.

COALESCENCIA: es la desaparición del límite entre dos partículas (generalmente gotas de líquido o burbujas) en contacto, o entre una de estas y una fase de mayor volumen seguida por cambios en su forma, lo que conduce a una reducción del área superficial total. La floculación de una emulsión, como la formación de agregados, puede ser sucedido por la coalescencia.

EMULSIÓN: son dispersiones de gotas de un líquido en otro líquido inmiscible con el primero (fase interna y externa respectivamente), que presentan cierto grado de estabilidad. Dicha estabilidad está asegurada por una sustancia adicionada en pequeñas cantidades llamada emulsionante.

FLOCULACIÓN: es el proceso de contacto y adhesión en donde las partículas dispersas se mantienen juntas por interacciones físicas débiles que dan lugar a una separación de fases debido a la formación de precipitados más grandes que aquellas formadas en los coloides.

FOULARD: es un equipo empleado en la industria textil para dar acabados físicos como la coloración. Funciona por medio de dos rodillos en los cuales se impregna el tinte, se esparce por estos mediante presión y la tela se introduce entre los rodillos múltiples veces para aplicar el acabado.

HIDROFOBICIDAD: es la propiedad física de una molécula (con tendencia apolar) que es incapaz de interactuar con una o más moléculas de agua. Los materiales hidrofóbicos son clasificados específicamente por el ángulo que se forma entre el borde de la gota de agua y la superficie que se encuentra inmediatamente debajo de ella.

HISTÉRESIS: es la diferencia máxima que se observa en los valores indicados por una medida para el mismo valor cualquiera del campo de medición, cuando la variable recorre toda la escala ascendente y descendente.

SURFACTANTE: son sustancias (también llamadas “tensoactivos”) que influyen por medio de la tensión superficial en la superficie de contacto entre dos fases. En función de su mayor o menor dispersión en agua, y mayor o menor estabilización de las micelas o coloides, los tensoactivos se emplean como emulsionantes, humectantes, detergentes o solubilizantes.

RESUMEN

En el presente proyecto se evaluaron compuestos químicos que brinden propiedades hidrofóbicas a textiles de algodón para Industrias Químicas Saint Germain Ltda. La formulación de los recubrimientos fue realizada a escala laboratorio como etapa previa, analizando la viabilidad del producto antes de la posible fase de producción industrial y comercialización en el mercado.

En primera instancia, se realizó un proceso de ingeniería inversa a un producto textil hidrofóbico disponible en el mercado con la intención de identificar el tipo de tecnología empleada en el mismo y obtener información sobre compuestos químicos que pudiesen ser útiles para el cumplimiento de los objetivos del presente proyecto.

Posteriormente, se seleccionaron los compuestos químicos destinados a ser empleados como recubrimiento sobre el textil. Sin embargo, fue necesario disolver algunos en compuestos orgánicos y emulsionar la silicona para facilitar su manipulación. Las emulsiones resultantes fueron caracterizadas mediante pruebas de estabilidad y reología; y a partir de los datos obtenidos de todas las preparaciones se seleccionaron las mejores para llevarlas al diseño de experimentos, en el que se emplearon dos metodologías de aplicación de recubrimiento: inmersión y foulard.

Una vez efectuado el diseño de experimentos y evaluada cada muestra con la prueba de caída de gota, se realizaron ciclos de lavado estandarizados para determinar la resistencia del recubrimiento; a través de las pruebas de resistencia al lavado y medición de ángulos de contacto se determinó qué compuestos otorgan mejores propiedades y cuáles las mantienen después de los ciclos de lavado, como comportamiento general los recubrimientos otorgan ángulos de contacto que cumplen con características hidrofóbicas pero ninguno las mantiene después del lavado, por lo tanto se busca seleccionar la mejor opción revisando la viabilidad económica respecto a las propiedades hidrofóbicas otorgadas.

Finalmente, se calculó el costo aproximado de producción de la mejor opción seleccionada anteriormente. De esta manera se deja a criterio de la empresa el uso de esta u otra alternativa para efectos de sus procesos de producción.

INTRODUCCIÓN

El fenómeno de la hidrofobicidad se presenta en la naturaleza de muchas formas. Una de ellas es el caso de la flor de loto en la cual, debido a la estructura de su hoja, obtiene un mecanismo repelente al agua y a la suciedad. A partir de este principio, se han venido desarrollando materiales capaces de imitar estas propiedades y que puedan ser empleados en diferentes áreas industriales. Una de estas aplicaciones es la industria textilera. En Colombia existen productos sintéticos con características similares que son ampliamente utilizados en el campo de la medicina y la enfermería, estos son comercializados como material antilíquido e impermeable por las empresas Textilia, a través de su marca *Techrepelent* y Lafayette, a través de sus marcas *Lafayette TexSolutions* y *Lafayette Uni for me*, pero ninguna tiene una composición 100% algodón ya que sus textiles hidrofóbicos son mezclados con poliéster en diferentes cantidades.

Sin embargo, a nivel nacional no se han logrado grandes avances científicos sobre este efecto aplicado a fibras naturales como el algodón. Una de las razones por las que no se suele trabajar con este material es debido a su difícil manipulación y su alta tendencia a absorber líquidos. Adicionalmente, no se conoce información de alguna empresa que desarrolle específicamente el recubrimiento que serviría a la industria textilera como insumo dentro de sus procesos de producción para lograr introducir al mercado textiles de algodón hidrofóbicos.

Lograr un resultado favorable puede llegar a representar un avance importante no sólo en la industria textilera, sino en la industria de materiales y en la comunidad científica, abriendo la posibilidad de impulsar futuras investigaciones sobre el tema; además ampliaría los campos de producción de la empresa Industrias Químicas Saint Germain Ltda ya que sus productos son en su mayoría enfocados a la limpieza industrial y no hacen parte de insumos para otros tipos de industrias, con lo cual también esta llegaría a ser más competitiva en el mercado.

Mediante este proyecto se evaluaron diferentes alternativas de volver hidrofóbico un textil de algodón, a través de la aplicación de un recubrimiento que evite que su superficie se moje, que sea económicamente viable y, de ser posible, que no cambie las propiedades inherentes del textil (olor, color, textura, etc.).

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar productos químicos que proporcionen propiedades hidrofóbicas a textiles de algodón para Saint Germain Ltda, a nivel laboratorio.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el textil hidrofóbico disponible en el mercado.
- Seleccionar compuestos químicos disponibles en el mercado que puedan usarse como recubrimiento y las condiciones de aplicación y curado que proporcionen hidrofobicidad a textiles de algodón.
- Determinar la resistencia del recubrimiento obtenido frente a ciclos de lavado.
- Estimar el costo aproximado de producción de recubrimiento.

1. GENERALIDADES

1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA EMPRESA

La empresa Industrias Químicas Saint Germain Ltda. es una organización dedicada a la elaboración de productos químicos innovadores para la limpieza y desinfección tanto institucional como industrial. Dentro de sus productos se encuentran desengrasantes, suavizantes textiles, desmanchadores, blanqueadores, detergentes, lavavajillas, abrillantadores, jabones, selladores, limpiavidrios, ceras y removedores de ceras.

Saint Germain Ltda. tiene más de veinticinco años de experiencia en el mercado, certificación ISO 9001:2008, reconocimiento como empresa altamente innovadora por Colciencias y está en proceso de implementación de la norma ISO 14001 para identificar, priorizar y gestionar los riesgos ambientales involucrados en la realización de sus procesos.

1.1.1 Organigrama. Industrias Químicas Saint Germain Ltda. cuenta con operarios en el área de producción, al igual que personas vinculadas a la administración y a la dirección; es por esto, que una sola persona puede ocupar dos o tres cargos dentro del organigrama. La estructura organizacional de la empresa se observa en la **Figura 1**.

Figura 1. Organigrama de Industrias Químicas Saint Germain Ltda.



1.1.2 Localización. Industrias Químicas Saint Germain Ltda. está ubicada en la ciudad de Bogotá D.C; carrera 19 sur # 55–20, barrio San Carlos – localidad de Tunjuelito.

1.1.3 Procesos. En la actualidad los procesos que se llevan a cabo en Industrias Químicas Saint Germain Ltda. son en su mayoría mezclas entre agua y un surfactante dependiendo de la especificidad de cada producto.

Para el desarrollo de los procesos, la planta de producción dispone de tres tanques de 2000 litros de capacidad cada uno con un motor de 3 caballos de potencia y agitadores de paletas; de estos tres (3) tanques, dos (2) son de acero inoxidable para productos no alcalinos (como ambientadores, ceras autobrillantes, jabones desinfectantes, etc.) y el tanque restante es de fibra de vidrio para productos alcalinos (desengrasantes, blanqueadores, etc.). Los productos desarrollados por Industrias Químicas Saint Germain Ltda. se listan en el **Cuadro 1**.

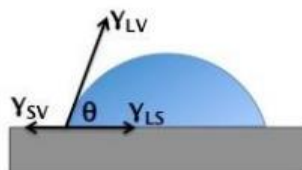
Cuadro 1. Productos elaborados por Industrias Químicas Saint Germain Ltda.

Línea	Producto
Institucional	Jabón líquido para manos Jabón desinfectante multiusos Jabón para áreas especiales Cera polimérica autobrillante Cera emulsionada Desengrasante activo Removedor de ceras y suciedades Sellador para pisos Limpiavidrios
Para lavandería	Detergente líquido para lavadoras Desengrasantes Suavizantes Blanqueador oxigenado Desmanchador textil
Industrial	Desengrasante industrial Desinfectantes Solvente dieléctrico Alcohol en gel Jabones industriales
Textil	Desengrasante textil Suavizante humectante

1.2 MARCO TEÓRICO

1.2.1 Hidrofobicidad. El fenómeno de la hidrofobicidad en superficies sólidas se ha venido investigando con remarcable atención a lo largo de los últimos años, logrando importantes avances¹. Para comprender este fenómeno es esencial tener claro que la hidrofobicidad es una forma de medir la mojabilidad de una superficie. La mojabilidad es el estudio del cómo se extiende un líquido cuando es depositado en un sólido, siendo mayor cuando el ángulo de contacto o la tensión superficial son menores². La hidrofobicidad es la propiedad física de una molécula a ser repelida por una masa de agua y ocurre cuando dicha molécula (con tendencia apolar) no es capaz de interactuar con una o más moléculas de agua³. Los materiales hidrofóbicos son clasificados específicamente por el ángulo que se forma entre el borde de la gota de agua y la superficie que se encuentra inmediatamente debajo de ella. Este ángulo se denomina ángulo de contacto.

Figura 2. Esquema general el fenómeno de mojabilidad.



Fuente: TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT. Wettability. [En línea]. Abril de 2015. [Consultado el 18 de abril de 2017]. Disponible en: http://www.cpc.tu-darmstadt.de/research_8/ongoing_projects/fluid_solid_interfaces/wettability/wettability.en.jsp

1.2.2 Ángulo de contacto. El ángulo de contacto es una de las formas más comunes para medir la mojabilidad de una superficie o material. Es el ángulo que forma un líquido con una superficie sólida cuando ambos entran en contacto. Está determinado por las propiedades tanto del sólido como del líquido y por las fuerzas de interacción y repulsión entre ellos⁴.

¹ TEISALA, Hannu; TUOMINEN, Mikko and KUUSIPALO, Jurka. Superhydrophobic Coatings on Cellulose-Based Materials: Fabrication, Properties, and Applications. En: Advanced materials interfaces. 2013, vol. 1, p. 1-26.

² MITTAL, Kashmiri. Contact Angle, Wettability and Adhesion, Volumen 3. Hoboken: Taylor & Francis, 2003. 396 p.


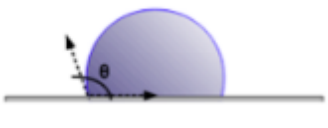


³ BEN-NAIM, Arie. Hydrophobic interactions. Plenum Press, 1979, p. 1-24.

⁴ ADAMSON, Arthur and GAST, Alice. Physical chemistry of surfaces, 6 ed. New York: Wiley, 1997, p. 352-364.

Esas interacciones son descritas por las fuerzas de adhesión y cohesión: el equilibrio de las fuerzas de cohesión, presentes entre moléculas similares (como las del líquido) y las fuerzas de adhesión, presentes entre moléculas diferentes (como las del líquido y el sólido) determinará el valor del ángulo de contacto formado en la interfase líquido-sólido⁵.

El ángulo de contacto, en última instancia, determina que tan hidrofóbica o hidrofílica puede llegar a ser una superficie sólida, a la vez que estos son explicados por las teorías enfocadas en las ecuaciones de Young, Wenzel y Cassie-Baxter. Con base en estos modelos se ha logrado entender que tanto la energía superficial como la estructura superficial pueden influenciar el ángulo de contacto que tiene una gota de líquido sobre una superficie sólida⁶.

Cuadro 2. Clasificación de los materiales según el ángulo de contacto.

Superficie	Ángulo de Contacto	Figura
Superhidrofóbica	$\theta > 160^\circ$	
Hidrofóbica	$\theta > 90^\circ$	
Hidrofílica	$\theta < 90^\circ$	
Superhidrofílica	$\theta \sim 0^\circ$	

Fuente: RIOS, Fabian. HYDROPHOBICITY AND ITS APPLICATIONS. Tesis Doctoral, New Mexico, New Mexico State University, 2011. 118 p.

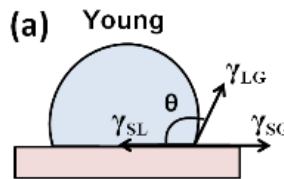
⁵ ZISMAN, William. Contact angle, wettability, and adhesion. Washington D.C.: American Chemical Society, 1964, p. 1-4.

⁶ MITTAL. Op. cit., p 24.

1.2.2.1 Modelos teóricos. Para esclarecer el fenómeno de mojado de una superficie, esta sección se enfoca en los lineamientos básicos que conciernen a la mojabilidad, abarcando principalmente los modelos matemáticos propuestos por varios autores, para todos los modelos teóricos definidos a continuación, el ángulo de contacto se simboliza con la letra griega Theta (θ).

- **Modelo de Young.** El primer modelo es definido por la ecuación de *Young*, que se deriva del comportamiento que tiene una gota de un líquido sobre una superficie sólida ideal; es decir, una superficie rígida, homogénea, plana e inerte. El punto en el que las tres fases del sistema coexisten es donde se forma la línea de contacto entre la gota y la superficie⁷. Cada interfase proporciona la línea de contacto de tal manera que el área superficial correspondiente es mínima, balanceando las tensiones superficiales:

Figura 3. Modelo de mojabilidad planteado por Young.



Fuente: ALIOFKHAZRAEI, Mahmood. Surface Energy. Open Access Book. InTechOpen, 2015, 380p.

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}}$$

Donde γ es la tensión superficial que indica la energía por unidad de área superficial de determinada interfase, de esta manera γ_{SV} indica la tensión superficial en la interfase sólido – vapor, γ_{SL} la tensión superficial en la interfase sólido – líquido y γ_{LV} la tensión superficial en la interfase líquido – vapor. Sin embargo, debido a que las superficies reales varían respecto a sus condiciones, la mayoría de los escenarios que involucran ángulos de contacto no pueden ser explicados a cabalidad por la ecuación de *Young*.

- **Modelo de Wenzel.** *Wenzel* propuso, una ecuación que relaciona el ángulo de contacto con la rugosidad superficial y la energía superficial⁸:

$$r(\gamma_{SV} - \gamma_{SL}) = \gamma_{LV} \cos \theta_W^*$$

⁷ BEN-NAIM, Op. Cit., p 14.

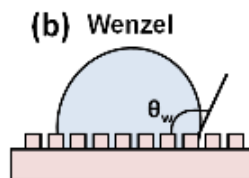
⁸ BEN-NAIM, Ibid. Cit., p 15.

Donde θ_w^* es el ángulo aparente de contacto, el cual mide el ángulo de contacto influenciado por la rugosidad de las superficies sólidas y r , que corresponde al factor de rugosidad. Esta ecuación puede ser reescrita como:

$$\text{Cos } \theta_w^* = r \text{Cos } \theta$$

La ecuación de *Wenzel* asume que el agua penetrará las ranuras causadas por la rugosidad superficial y, por lo tanto, esta ecuación corresponde al régimen de mojado homogéneo⁹.

Figura 4. Modelo de mojabilidad planteado por Wenzel.

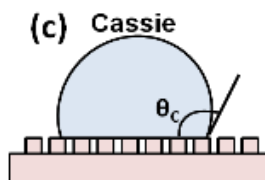


Fuente: ALIOFKHAZRAEI, Mahmood. Surface Energy. Open Access Book. InTechOpen, 2015, 380p.

- **Modelo de Cassie–Baxter.** En el estado heterogéneo, el líquido solo tiene contacto con el sólido en la parte superior de las protuberancias en una fracción denominada ϕ_s , la cual es la fracción del área total de las interfases sólido–líquido y líquido–aire paralela a la superficie rugosa. Además, si se cambia la fracción de área mojada por el área proyectada, r_f , se da paso a la ecuación modificada de *Cassie-Baxter*⁹:

$$\text{Cos } \theta_{CB}^* = (r_f * \phi_s * \text{Cos } \theta) + \phi_s - 1$$

Figura 5. Modelo de mojabilidad planteado por Cassie-Baxter.



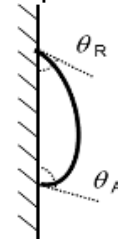
Fuente: ALIOFKHAZRAEI, Mahmood. Surface Energy. Open Access Book. InTechOpen, 2015, 380p.

⁹ BEN-NAIM, Ibid. Cit., p 15.

1.2.3 Ángulo de contacto de histéresis (ACH). En el mecanismo de desplazamiento de una gota por una superficie intervienen dos ángulos de gran importancia; el ángulo de avance (θ_A) y el de retroceso (θ_R). El ángulo de avance es el observado cuando la fase líquida avanza sobre la fase sólida a expensas de la fase fluida y el ángulo de retroceso se da cuando la fase líquida retrocede sobre el sólido a favor de la fase fluida¹⁰.

El ángulo de contacto de histéresis se define como la diferencia entre el ángulo de contacto de avance y el ángulo de contacto de retroceso para una línea de contacto moviéndose en dirección opuesta a una gota, a la misma velocidad¹¹. Un alto ángulo de histéresis o ángulos mayores a 10° indican que las gotas de líquido se están adhiriendo demasiado a la superficie sólida¹⁰.

Figura 6. Una gota de líquido en una superficie vertical.



Fuente: ERAL, H; 'T MANNETJE, D.J.C.M and OH, J. Contact angle hysteresis: a review of fundamentals and applications. Febrero 2013, vol. 291, no. 2, p. 247-260.

El valor de la histéresis es consecuencia de la rugosidad, de la heterogeneidad de la superficie y de cómo ambas afectan al desplazamiento de la gota (pérdida de energía); y también depende del líquido (volumen, forma de colocar la gota sobre la superficie, entre otros)¹².

¹⁰ MONTES RUIZ-CABELLO, Francisco. Efecto de la rugosidad y heterogeneidad superficial en fenómenos de mojado. Tesis Doctoral, Granada, Universidad de Granada, 2009. p. 28-31.

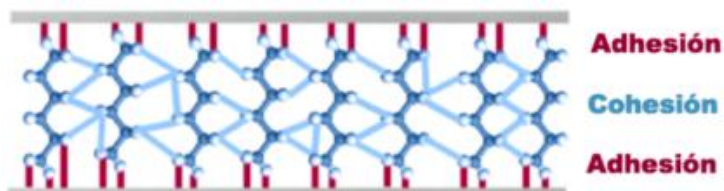
¹¹ ERAL, H; 'T MANNETJE, D.J.C.M and OH, J. Contact angle hysteresis: a review of fundamentals and applications. Febrero 2013, vol. 291, no. 2, p. 247-260.

¹² FERNANDEZ CAÑETE, Agustín. Estudio de la Hidrofobicidad y Autolimpieza en Materiales con Nanotratamientos Superficiales. Trabajo de Grado, Barcelona, Universitat Autònoma de Barcelona, 2013. p. 14.

1.2.4 Fuerzas de adhesión y cohesión. Cuando un líquido entra en contacto con una superficie, las fuerzas de adhesión y cohesión actuarán sobre ellos. Estas fuerzas rigen la forma que el líquido toma encima de la superficie. Cuando las fuerzas de adhesión son mayores que las de cohesión, el líquido se extiende formando una delgada película relativamente uniforme sobre el sólido. Por el contrario, cuando las fuerzas de cohesión son mayores que las de adhesión el líquido es capaz de formar pequeñas gotas que pueden permanecer sobre el sólido, manteniendo así mínimo contacto con la superficie¹³.

Las fuerzas de cohesión son fuerzas intermoleculares que generan una tendencia en los líquidos a resistir la división. Estas fuerzas de atracción existen entre moléculas de la misma sustancia¹⁴. Las fuerzas de adhesión son fuerzas de atracción existentes entre moléculas de distinta naturaleza. Son generadas por la interacción de dos sustancias. La adhesión hace que el líquido se aferre a la superficie en la cual reposa¹⁴.

Figura 7. Esquema de las fuerzas de adhesión y cohesión.



Fuente: GARCÍA, Gabriela; VALENCIA, Tatiana y GENCON Daniela. Adhesión y Cohesión. [En línea]. Agosto de 2015. [Consultado el 18 de abril de 2017]. Disponible en: <http://medicinaug3.blogspot.com.co/2015/08/adhesion-y-cohesion.html>

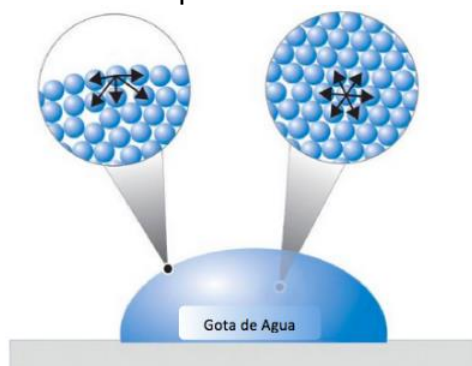
1.2.5 Tensión superficial y energía superficial. La tensión superficial es la energía o el trabajo requerido para incrementar el área superficial de un líquido debido a las fuerzas intermoleculares. Dado que estas fuerzas intermoleculares varían dependiendo la naturaleza de los líquidos (por ejemplo, agua y gasolina) o por solutos en el líquido (por ejemplo, surfactantes como el detergente), cada solución difiere en las propiedades exhibidas, relacionadas a la tensión superficial¹⁵.

¹³ SIEBOLD, Alain, *et al.* Effect of dynamic contact angle on capillary rise phenomena. Enero 2000, vol. 161, no. 1, p. 81-87.

¹⁴ PETRUCCI, Ralph, *et al.* General chemistry: principles and modern applications. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 2007.

¹⁵ ALDRIDGE, Benjamin and BRAR Nivaz. Surface Tension. [En línea]. Noviembre de 2017. [Consultado el 18 de abril de 2017]. Disponible en: https://chem.libretexts.org/Core/Physical_and_Theoretical_Chemistry/Physical_Properties_of_Matter/States_of_Matter/Properties_of_Liquids/Surface_Tension.

Figura 8. Fuerzas intermoleculares en una gota de agua sobre una superficie.



Fuente: ALDRIDGE, Benjamin and BRAR Nivaz. Surface Tension. [En línea]. Noviembre de 2017. [Consultado el 18 de abril de 2017]. Disponible en: https://chem.libretexts.org/Core/Physical_and_Theoretical_Chemistry/Physical_Properties_of_Matter/States_of_Matter/Properties_of_Liquids/Surface_Tension.

La energía superficial es definida como la suma de todas las fuerzas intermoleculares que están presentes en la superficie de un material. Es el grado en que la fuerza de atracción o de repulsión de una superficie ejerce sobre otro material¹⁶. Tensión y energía superficial son análogos: para líquidos y sólidos, respectivamente; siendo esta una característica importante de cualquier superficie o interfase.

1.2.6 Superficies superhidrofóbicas.

1.2.6.1 Superficies superhidrofóbicas naturales. La flor de loto puede repeler la contaminación o la polución. La explicación de este fenómeno reside en la rugosidad superficial de sus hojas, que poseen una extrema repelencia a gotas de cualquier líquido. Muchos avances en investigación han indicado que la cutícula de la planta es un material compuesto, principalmente hecho de una red de ceras hidrofóbicas que presentan una disposición como la explicada en el modelo de Cassie–Baxter¹⁷.

¹⁶ ADHESIVES, GLUES AND SEALANTS. Surface energy and surface tension. [En línea]. Julio de 2014. [Consultado el 18 de abril de 2017]. Disponible en: <http://www.adhesiveandglue.com/surface-energy.html>

¹⁷ YAN, Y.; GAO, N. and BARTHLOTT, W. Mimicking natural superhydrophobic surfaces and grasping the wetting process: A review on recent progress in preparing superhydrophobic surfaces. En: Advances in Colloid and Interface Science. Septiembre, 2011, vol. 169, no. 2, p. 80-105.

Figura 9. Superhidrofobicidad presente en las hojas de la flor de loto.



Fuente: PERKINS, Sid. Cool jobs: Repellent chemistry. [En línea]. Septiembre de 2013. [Consultado el 19 de abril de 2017]. Disponible en <https://www.sciencenewsforstudents.org/article/cool-jobs-repellent-chemistry>.

1.2.6.2 Superficies superhidrofóbicas artificiales. Es evidente que las superficies superhidrofóbicas naturales poseen una intensa rugosidad y estructuras complejas en las escalas micro y nano. Estas superficies han servido como modelos para imitar la superhidrofobicidad. Las estructuras parecidas a la hoja de loto contienen nanopartículas de un tamaño que va desde 100nm hasta 300nm. Este tipo de morfología puede ser conseguida con distintas técnicas (deposición química, tratamiento con plasma, separación de fases, electrospinning, etc.) que produzcan estructuras jerárquicas y baja energía superficial¹⁸.

1.2.7 fabricación de recubrimientos hidrofóbicos.

1.2.7.1 Inmersión. Es la técnica más común y versátil. Comúnmente requiere de tres pasos generales: inmersión en la suspensión de recubrimiento, secado y curado. De forma general, la suspensión contiene el recubrimiento que humedece el textil, dispersándose a lo largo de toda la superficie del material. Algunas soluciones contienen también componentes poliméricos específicos que incrementan la fuerza de enlazado¹⁹.

¹⁸ YAN. *Ibid.* Cit., p. 87.

¹⁹ LIU, Hui, *et al.* Recent Progress in Fabrication and Applications of Superhydrophobic Coating on Cellulose-Based Substrates. *En*: Materials MDPI. Febrero, 2016, vol. 9, no. 3, p. 124.

Figura 10. Procedimiento de inmersión en solución.



1.2.8 Emulsiones.

1.2.8.1 Definiciones. Una dispersión es un sistema de varias fases en el cual una se encuentra fragmentada dentro de la otra, dependiendo de la naturaleza de los componentes, la dispersión puede ser *espuma*, *emulsión* o *suspensión*; hablamos de *espuma* cuando se trata de gas disperso en un líquido, *suspensión* si es sólido disperso en líquido y *emulsión* si es líquido disperso en otro inmiscible, esta última será de vital importancia para el presente proyecto.

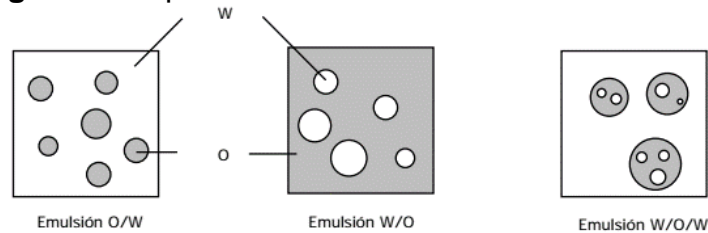
Las emulsiones son dispersiones de gotas de un líquido en otro líquido inmiscible con el primero (fase interna y externa respectivamente), que presentan una estabilidad de acuerdo a la aplicación para la que se requiera, la estabilidad entendida como la ausencia de cambios durante un periodo de tiempo lo suficientemente largo para que se logre su aplicación; esta estabilidad está asegurada por una sustancia adicionada en pequeñas cantidades llamada emulsionante; en la práctica, este agente tiene unos límites, no es suficiente para estabilizar una emulsión si su concentración es menor al 0,1% y por encima del 5% no hay cambio aunque se siga aumentando, por eficiencia y costo suele ser utilizado del 0,2% al 3%²⁰.

²⁰ SALAGER, Jean-Louis. Cuaderno FIRP 747 Parte B, 2nd ed. Venezuela: Laboratorio FIRP, 1999, p. 4.

Las emulsiones de acuerdo al tamaño de gota pueden ser *macroemulsiones* (con un tamaño de gota en el rango 1-100 μm y algunas excepciones de 0,1-500 μm), *microemulsiones* (una sola fase, con tamaño de partícula $<1 \mu\text{m}$ y es termodinámicamente estable; lo que indica que sus componentes no generan reacciones espontáneas entre sí), *miniemulsiones* (sistemas que contienen muy pequeñas gotas dispersadas en una fase continua y cuya formulación corresponde a un sistema polifásico), y finalmente las *nanoemulsiones* (con tamaño de gota de 20-200 nm y una estabilidad menor que las microemulsiones)²¹.

De acuerdo a su composición, las emulsiones simples pueden ser de dos tipos: gotas de aceite dispersas en agua (*O/W*), o gotas de agua dispersas en aceite (*W/O*). En donde W=Agua y O=Aceite de acuerdo a su traducción al inglés, o cualquier sustancia que sea representada como polar y apolar respectivamente, estas se pueden ver en la **Figura 11**. A partir de esta forma de nombrar se pueden tener también combinaciones *W/O/W* y *O/W/O* y/o también *W₁/O/W₂* o *O₁/W/O₂* si la sustancia de la fase interna es diferente a la de la fase externa entendidas como 1 y 2 respectivamente; también se pueden encontrar *biemulsiones* en donde se encuentra la mezcla de dos emulsiones semejantes con fase externa idéntica o compatible²¹.

Figura 11. Tipos de emulsión.



Fuente: SALAGER, Jean-Louis. Cuaderno FIRP 747 Parte B, 2nd ed. Venezuela: Laboratorio FIRP, 1999, p. 6.

Las cantidades de fase interna y externa influyen sobre las propiedades de la emulsión, se tiene una emulsión de bajo contenido de fase interna si esta está por debajo de 20%, y en este caso la interacción entre las gotas es mínima lo cual es aprovechable para algunas aplicaciones; también hay emulsiones con alto contenido de fase interna con contenido entre 60% y 70%, y más de 75% suelen ser muy viscosas pues las gotas están en contacto continuo.

²¹ SALAGER. Ibid. Cit., p. 5.

Cuando dos gotas de la fase dispersa están ubicadas a distancia suficientemente pequeña (por ejemplo, una distancia más pequeña que su radio) entonces están sometidas a dos tipos de fuerzas. De un lado las fuerzas atractivas de Van der Waals que tienen que ver con la masa de materia presente en las dos gotas, y por otra parte las fuerzas de repulsión que dependen de las propiedades interfaciales que el surfactante adsorbido les confiere y que resulta en una fuerza repulsiva²².

Las fuerzas atractivas dependen del volumen de las gotas vecinas y las fuerzas repulsivas dependen del surfactante absorbido y el área superficial de las mismas gotas; se consideran gotas esféricas del mismo diámetro con un volumen igual a $\frac{4}{3}\pi R^3$ y área interfacial de $4\pi R^2$, entonces, el área por unidad de volumen en una emulsión monodispersa o con gotas idénticas es:

$$\sigma = \frac{4\pi R^2}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{3}{R}$$

Como las fuerzas repulsivas favorecen la estabilidad de una emulsión y estas dependen del área de la gota, se busca siempre un tamaño de “grano” pequeño; la aglomeración de gotas o el aumento del tamaño de las gotas, desestabiliza la emulsión²².

Los tipos de emulsiones pueden ser detectadas de diferentes formas, pero la más común es por conductividad electrolítica. Generalmente las emulsiones *O/W* poseen una alta conductividad y las *W/O* baja conductividad.

1.2.8.2 Introducción. Aunque existen emulsiones naturales como la leche y el latex, la mayoría de emulsiones son elaboradas para un fin específico y generalmente cumplen con las propiedades requeridas por el usuario, las principales propiedades de las emulsiones son el tipo (*O/W*, *W/O* o *múltiple*), el tamaño de gota o mejor su distribución estadística, la estabilidad, es decir la forma en que evoluciona cuando está sometida a condiciones particulares de almacenamiento, transporte o manipulación, y la viscosidad o mejor su comportamiento reológico ya que en muchos casos la emulsiones no son fluidos newtonianos²³.

Debido a que las propiedades no son independientes unas de otras, el objetivo es lograr las requeridas modificando ciertas variables como la composición, la formulación o las condiciones de operación y agitación.

²² SALAGER, Jean-Louis. Cuaderno FIRP 747 Parte A, 2nd ed. Venezuela: Laboratorio FIRP, 1999, p. 4.

²³ SALAGER. Ibid. Cit., p 6.

1.2.8.3 Formulación fisicoquímica. La formulación fisicoquímica se refiere a la naturaleza de los componentes, para el caso de las emulsiones: surfactante (S), agua (W) y aceite (O), cada uno con su potencial químico que define su estado fisicoquímico a determinada temperatura y presión. El equilibrio físico-químico depende de algunas variables de formulación que son las que caracterizan los componentes principales y sus interacciones con la interfase: la longitud de cadena alquilo del surfactante, así como su grupo hidrofílico, la salinidad de la fase agua (tipo de electrólito y su concentración), el tipo de aceite (su estructura, su volumen molar y su polaridad), la presencia de alcoholes (tipo y concentración), la temperatura y la presión²⁴.

1.2.8.4 Viscosidad de las emulsiones. Los factores que afectan la viscosidad de una emulsión son listados de acuerdo a su importancia; así:

- Viscosidad de la fase externa (η_0).
- Proporción volumétrica de la fase interna.
- Tamaño de gotas de la fase interna.
- Viscosidad de la fase interna.
- Efecto del emulsionante.

De acuerdo a los modelos teóricos y empíricos, existe proporcionalidad entre la viscosidad de la emulsión (η) y la de la fase externa (η_0) definida por la ecuación **(1)** donde $f(x)$ representa otros efectos, esta relación se evidencia siempre y cuando la proporción de fase interna sea baja, pues si esta es mayor al 70% se mide una viscosidad aparente promedio que varía con el cizallamiento.

$$\eta = \eta_0 * f(x) \quad (1)$$

El tamaño de las gotas y la distribución del mismo, también afectan la viscosidad de la emulsión, y de acuerdo a estudios con partículas de látex de tamaño definido se ha concluido que: *a menor tamaño de gota, mayor viscosidad y a mayor distribución de tamaño de gota, menor viscosidad*. La viscosidad de la fase interna es importante únicamente si hay convección dentro de las gotas, pues si la viscosidad es muy alta en la fase interna se ha encontrado que prácticamente no hay influencia²⁵.

De acuerdo a la literatura, se encuentra que aumentar la concentración del emulsionante, disminuye el tamaño de las gotas y aumenta la viscosidad, es por esto que para lograr una emulsión estable, se debe tener un tamaño de gota pequeño pero no demasiado pequeño para evitar la alta viscosidad.

²⁴ SALAGER. Ibid. Cit., p 7,8.

²⁵ SALAGER. Op. Cit., p 11.

1.2.8.5 Estabilidad de las emulsiones. Aunque termodinámicamente una emulsión es inestable y en algún momento se separará en dos fases, es difícil definir experimentalmente su estabilidad, la única manera de medirla es teniendo en cuenta la variación del número de gotas en función del tiempo. La naturaleza del surfactante también puede tener efecto sobre la estabilidad de la emulsión, si son orgánicas o inorgánicas²⁶. La inestabilidad de emulsiones se puede dar por diferentes motivos (**Figura 12**), especialmente:

- Separación gravitacional, que se da por la diferencia de densidades de la fase acuosa y la fase oleosa, se clasifican en cremado o sedimentación de acuerdo al comportamiento de las partículas, cuando la densidad de la fase oleosa es menor y las partículas se mueven hacia arriba, se considera cremado y cuando la densidad de la fase oleosa es mayor y las partículas se mueven hacia abajo, se considera sedimentación. Por lo anterior, generalmente las emulsiones (O/W) tienden al cremado y las emulsiones (W/O) a la sedimentación²⁶.
- Inversión de fases, fenómeno que se da cuando la emulsión pasa de (O/W) a (W/O) o de (W/O) a (O/W) por factores como condiciones ambientales, agitación, concentración de disolvente entre otras, para algunas aplicaciones es un fenómeno positivo pero para otros, representa complicaciones por la variación en las características físicas de la emulsión²⁶.
- Coalescencia, las partículas pequeñas se van uniendo entre sí formando unas más grandes que pueden llegar al grado de separar completamente la emulsión²⁶.
- Floculación, en este fenómeno dos o más partículas se unen entre sí llegando a partículas lo suficientemente grandes *sin perder su integridad individual*, que pueden ser retiradas con facilidad pues se aglomeran en un mismo punto, generalmente al fondo del recipiente que contiene la emulsión, esto por el aumento de peso y volumen²⁶.

Figura 12. Mecanismos de desestabilización de las emulsiones.



²⁶ SALAGER. Ibid. Cit., p. 17-23.

1.2.8.6 Tamaño de gota y distribución de tamaños. Las propiedades de una emulsión no dependen sólo del diámetro promedio de las gotas sino también de la distribución de tamaño, si la emulsión se produce por un único proceso de agitación, el tamaño de gota se aproxima a una ley normal. La distribución de tamaño de gotas se puede determinar basados en una propiedad promedio del sistema (métodos globales), o de acuerdo a las propiedades a escala de la gota (métodos individuales)²⁷.

1.2.8.7 Preparación de emulsiones.

- **Variables y factores involucrados.** Los factores importantes en el proceso de producción de la emulsión son:
 - **Variables de Formulación:** Naturaleza del agente emulsionante y de las fases acuosa y oleica, así como la temperatura.
 - **Variables de composición:** Proporción relativa de agua y aceite (en inglés Water/Oil Ratio, WOR), y concentración del emulsionante.
 - **Factores fluomecánicos:** Aparato utilizado, intensidad de agitación, y procedimiento²⁸.
- **Principios de la preparación de emulsiones.** Después de seleccionar la composición y condiciones de operación, se procede a emulsionar de manera física o fisicoquímica para provocar la dispersión de una fase en la otra, este proceso se desarrolla en tres pasos: primero se genera una inestabilidad utilizando equipos dispersores como agitadores de hélice o turbina, homogeneizadores, molinos coloidales, dispersores ultrasónicos, dispersores de chorro o pulverizadores, luego se deben colocar las gotas de la fase interna en el seno de la externa por condensación de vapor y finalmente una emulsión espontánea²⁹.

La agitación se puede producir de manera intermitente, agitando manual o mecánicamente las fases dentro de un recipiente cerrado, se ha determinado que la agitación con periodos de reposo de aproximadamente un minuto generan mejores resultados que una agitación continua, y se logran emulsiones con tamaños de gota del orden de (50-100 μm).

²⁷ SALAGUER. Ibid. Cit., p 28-32.

²⁸ SALAGUER. Ibid. Cit., p 33.

²⁹ SALAGUER. Ibid. Cit., p 38.

Se puede hacer uso de varios equipos como mezcladores que cumplen la función de generar un movimiento en el fluido para que este se someta a cizallamiento intenso y además garantiza que todo el fluido pase por esta zona, los orificios y homogenizadores incrementan el cizallamiento y logran disminuir el tamaño de las gotas, al igual que un molino de coloides aunque con una geometría diferente, los dispersores ultrasónicos que generan gotas finas y tienen un requerimiento energético mucho menor que homogenizadores y mezcladores y por último también se puede presentar emulsión espontánea que no requiere de energía mecánica³⁰.

Después de la agitación de las dos fases, que entrega como resultado una emulsión, se procede a realizar la medición de las propiedades de esta:

- Puesto que la fase acuosa de la emulsión contiene en general electrolitos disueltos, la medición de la conductividad electrolítica permite de estimar inmediatamente el tipo de emulsión, bien sea O/W (alta conductividad) o W/O (baja conductividad)³¹.
- El tamaño medio de gota y la distribución de tamaño son informaciones importantes, no solo porque corresponden a especificaciones eventuales, sino porque pueden influenciar considerablemente otras propiedades como la viscosidad y la estabilidad³¹.
- La viscosidad de las emulsiones conteniendo hasta 60% de fase interna no varía en general mucho con el cizallamiento, por lo que su medición es fácil. No es el caso de las emulsiones de alto contenido de fase interna para las cuales se requiere un estudio reológico más completo³¹.
- La estabilidad de la emulsión es una propiedad que debe medirse en condiciones cercanas a las de almacenamiento o de manejo. Si no se tiene ninguna información particular se medirá el tiempo requerido para que se separe una cierta cantidad de una de las fases³¹.

³⁰ SALAGUER. Ibid. Cit., p 38-42.

³¹ SALAGER, Jean-Louis. Cuaderno FIRP 747 Parte C, 2nd ed. Venezuela: Laboratorio FIRP, 1999, p. 6.

2. ANÁLISIS DEL TEXTIL HIDROFÓBICO

En el mercado colombiano existe un producto textil catalogado como “antifluido” con propiedades hidrofóbicas. Sin embargo, dicho textil está hecho de fibras de poliéster. Poder identificar la tecnología empleada en estas telas puede ser significativo para el desarrollo y cumplimiento de este trabajo de grado. Es por esta razón que, aunque el enfoque sea a un material base diferente, se emplea la espectroscopia infrarroja para estudiar la composición que tiene el textil hidrofóbico y poder ser comparada con uno de características regulares.

2.1 ESPECTROSCOPIA FTIR

La espectroscopia de infrarrojo es una de las técnicas más versátiles y de mayor aplicación en la caracterización e identificación de materiales, análisis de productos farmacéuticos y de síntesis, análisis de contaminantes, alimentos, adhesivos y polímeros, entre otros³¹. Es un tipo de espectrometría de absorción que utiliza la región infrarroja del espectro electromagnético. Como las demás técnicas espectroscópicas, puede ser utilizada para identificar un compuesto o investigar la composición de una muestra. Se basa en el hecho de que los enlaces químicos de las sustancias tienen frecuencias de vibración específicas, que corresponden a los niveles de energía de la molécula. Estas frecuencias dependen de la forma de la superficie de energía potencial de la molécula, la geometría molecular, las masas atómicas y el acoplamiento vibracional³².

Al exponer una muestra a la radiación infrarroja, sus moléculas absorben la radiación a longitudes de onda específicas que causan el estiramiento o la flexión de los enlaces presentes en la muestra. Como consecuencia, los niveles de energía vibracional de las moléculas de la muestra pasan del estado de reposo al estado de excitación y la frecuencia del pico de absorción es determinada por la diferencia de energía entre ambos estados. La intensidad de los picos de absorción se relaciona con el cambio en la energía vibracional y la posibilidad de transición de los niveles de energía. De esta manera, analizando el espectro infrarrojo se puede obtener información estructural de una molécula³³.

³¹ TRIANA, Lizbeth. Espectroscopía de Infrarrojo/ATR [En línea]. Noviembre de 2013. [Consultado el 19 de Abril de 2017]. Disponible en: http://www.cciqs.uaemex.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=113&Itemid=86

³² ATKINS, Peter and DE PAULA, Julio. Elements of physical chemistry. 5 ed. Oxford: Oxford University Press, 2009, p. 450-465.

³³ BIRKNER, Nancy and WANG, Qian. How an FTIR Spectrometer Operates [En línea]. Febrero de 2015. [Consultado el 19 de abril de 2017]. Disponible en: https://chem.libretexts.org/Core/Physical_and_Theoretical_Chemistry/Spectroscopy/Vibrational_Spectroscopy/Infrared_Spectroscopy/How_an_FTIR_Spectrometer_Operates

Un espectro IR se puede presentar en términos de *absorbancia* o *transmitancia* dependiendo de la configuración del equipo y el modo de análisis del mismo. La transmitancia se define como la cantidad de energía que atraviesa un cuerpo en determinada cantidad de tiempo³⁴ y la absorbancia como la cantidad de luz incidente que es absorbida por el material cuando ésta lo atraviesa³⁵.

2.2 EQUIPOS

El equipo empleado para realizar las pruebas FTIR fue un Shimadzu SSX 550, mientras que las muestras de textil fueron adquiridas del mismo proveedor para garantizar la homogeneidad del análisis.

Figura 13. Equipo Shimadzu SSX 550.



Fuente: PONTSHO, Mbule. Sol-gel Synthesis of and Luminescent Properties of Pr³⁺ in Different Host Matrices. En: ResearchGate Publications. Noviembre, 2009, p.33.

2.3 MÉTODOS

La configuración del equipo empleada para efectuar las pruebas FTIR fue la siguiente:

Modo de análisis: reflectancia.

Intervalo de barradura: 4000 cm⁻¹ a 400 cm⁻¹.

Resolución: 4 cm⁻¹.

Número de barraduras: 64

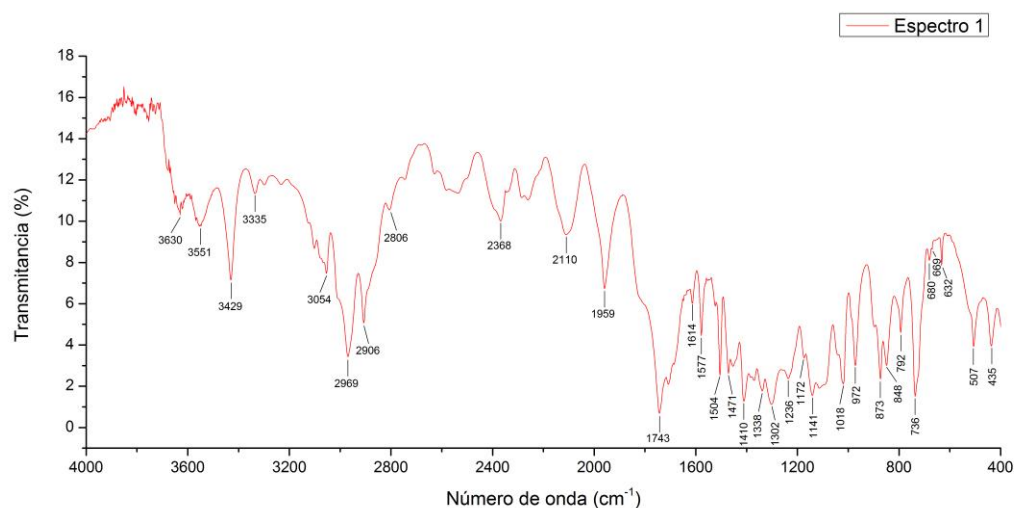
³⁴ GONZALEZ, Mónica. Transmitancia y absorbancia [En línea]. Noviembre de 2010. [Consultado el 19 de agosto de 2017] Disponible en: <http://quimica.laguia2000.com/conceptos-basicos/transmitancia-y-absorbancia>

³⁵ Nipun. Difference Between Absorbance and Transmittance [En línea]. Octubre de 2015. [Consultado el 19 de agosto de 2017]. Disponible en: <http://pediaa.com/difference-between-absorbance-and-transmittance/>

2.4 ANÁLISIS FTIR

Se tiene conocimiento de que el textil analizado a través de esta técnica está hecho a base de poliéster. Para verificar la composición base del textil se hace uso de tablas de IR en las cuales se puede encontrar información básica sobre la localización de las vibraciones moleculares dentro de un espectro IR. De esta manera, se etiquetan los picos resultantes más relevantes de la primera muestra (**Figura 14**) y a partir de estos se realiza la identificación estructural de las moléculas del material.

Figura 14. Espectro resultante para la primera muestra de textil.



Para realizar la verificación del material base del textil, se identifican las distintas estructuras moleculares que pueda haber en el material con ayuda del espectro. Dichas estructuras se listan a continuación:

La primera estructura que es sugerida por el espectro es la presencia de un anillo aromático en el textil. En el **Cuadro 3** se especifican las características que permiten la identificación del anillo.

Cuadro 3. Características infrarrojas de un anillo aromático.

Enlace / Grupo funcional	Señal (cm ⁻¹)	Modo de vibración		Observaciones
		Tensión	Flexión	
C – H	3054	X		Señal que indica el estiramiento de los enlaces C-H, presentes en un anillo aromático.
C – H	972 873 848 792		X	Grupo de señales que indican los pliegues de los enlaces C-H, presentes en un anillo aromático.
C = C	1614 1577 1504	X		Grupo de señales que indican el estiramiento de los enlaces C=C, presentes en un anillo aromático.
C = C	1471 1410		X	Grupo de señales que indican los pliegues de los enlaces C=C.

El espectro también arroja información acerca de la presencia de una cadena carbonada lineal y saturada (confirmada por la señal a 2905 cm⁻¹). Sin embargo, no brinda información sobre la longitud de esta cadena. En el **Cuadro 4** se especifican las características que permiten la identificación de la cadena.

Cuadro 4. Características infrarrojas de una cadena carbonada.

Enlace / Grupo funcional	Señal (cm ⁻¹)	Modo de vibración		Observaciones
		Tensión	Flexión	
C – H	2969 2906	X		Grupo de señales que indican el estiramiento de los enlaces C-H, presentes en una cadena carbonada lineal.
CH ₂	1302	X		Señal que indica el estiramiento del grupo funcional CH ₂ , presente dentro de una cadena carbonada lineal.
–(CH ₂) _n –	736		X	Señal que indica el pliegue y balanceo de los enlaces existentes entre grupos funcionales CH ₂ , presentes en una cadena carbonada de tipo –(CH ₂) _n –.

Continuando con el espectro, se evidencian otras señales significativas que ameritan un análisis sobre las mismas. De este análisis se encuentra el grupo carbonilo dentro del grupo funcional éster. En el **Cuadro 5** se especifican las características que permiten la identificación del grupo funcional éster.

Cuadro 5. Características infrarrojas de un grupo carbonilo en un éster.

Enlace / Grupo funcional	Señal (cm ⁻¹)	Modo de vibración		Observaciones
		Tensión	Flexión	
C = O	1743	X		Señal fuerte y pronunciada que indica el estiramiento del enlace C=O, presente en un grupo carbonilo.
C – O	1236 1172 1141 1018	X		Grupo de señales que indican el estiramiento simétrico y asimétrico del enlace C-O, de un grupo carbonilo, correspondiente al grupo funcional éster.

Finalmente, se denota el grupo funcional isotiocianato presente en una cadena alifática. Sin embargo, este grupo funcional resulta ser extraño dentro de la composición base que, en principio, tiene el material. En el **Cuadro 6** se especifican las características que permiten la identificación del grupo funcional isotiocianato.

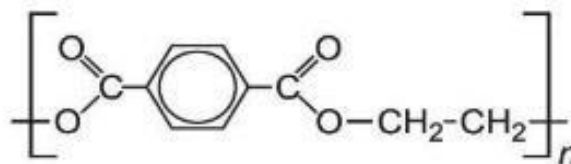
Cuadro 6. Características infrarrojas de un grupo funcional isotiocianato.

Enlace / Grupo funcional	Señal (cm ⁻¹)	Modo de vibración		Observaciones
		Tensión	Flexión	
– N = C = S	2110	X		Señal que indica el estiramiento y presencia de un grupo funcional isotiocianato.
– N = C = S	1089	X		Pequeño sobretono que confirma la presencia del grupo funcional isotiocianato en una cadena alifática (como sustituyente).

Por otra parte, se identifican más señales débiles que no se encuentran etiquetadas. Estas señales corresponden a sobretonos vibracionales que, en algunos casos, se superponen cerca de señales más pronunciadas o significativas. Es lo que ocurre en las señales a 3335 cm⁻¹ y las presentes en el rango comprendido de 2806 cm⁻¹ hasta 2200 cm⁻¹, para este espectro en específico. Estos sobretonos hacen más complejo el análisis debido a que pueden modificar la forma de los picos cercanos e incluso pueden trasladar la señal a un número de onda mayor o menor, dependiendo el caso.

Una vez reunida la información anteriormente obtenida, se puede construir una molécula a partir de la cual está hecho el material que se está analizando. Dicho material es, efectivamente, poliéster.

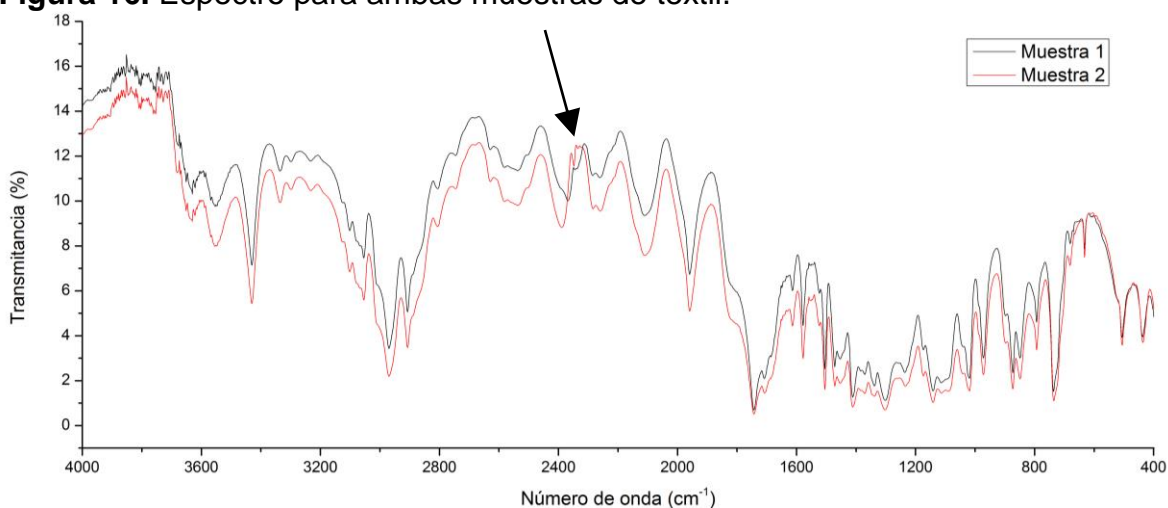
Figura 15. Monómero del poliéster.



Fuente: The Essential Chemical Industry. Polyesters. [En línea]. Agosto de 2016. [Consultado el 19 de agosto de 2017]. Disponible en: <http://www.essentialchemicalindustry.org/polymers/polyesters.html>

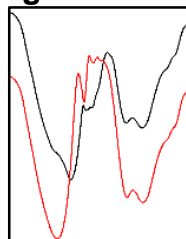
Luego de identificar el material base, se comparan ambos espectros con el fin de poder visualizar con mayor facilidad las zonas en las que puedan diferir ambos. En la **Figura 16** se encuentran los espectros de las dos muestras de textil y se señala una zona en donde estos son notablemente distintos el uno del otro.

Figura 16. Espectro para ambas muestras de textil.



De este espectro se puede observar una zona, aproximadamente desde los números de onda comprendidos de los 2459 cm^{-1} a los 2193 cm^{-1} , donde la segunda muestra tiene un comportamiento diferente con respecto a la primera. En la **Figura 17** se evidencian claramente las diferencias resultantes del análisis de las dos muestras de textil.

Figura 17. Sección del espectro.



La presencia del pico a 2347 cm^{-1} (espectro rojo en la Figura 18) es poco común y suele indicar presencia de CO_2 en la muestra. Debido a su rareza, se considera como impureza de la realización de la prueba FTIR³⁶ aunque tampoco se descartan condiciones climáticas que no se hayan previsto, pero que alteren los resultados. En este orden de ideas, las dos muestras de poliéster no presentan diferencias significativas en cuanto a composición se trata.

De los espectros se puede inferir que la similitud entre ambos puede ser ocasionada por cuatro factores: que el recubrimiento que hace hidrofóbica a la muestra de tela no es detectado por la técnica de espectroscopia FTIR; que al aplicar el recubrimiento, éste no se fija a la superficie del material; que el recubrimiento se degrada a la hora de realizar la espectroscopia FTIR; o bien que el material posee otros compuestos que modifican sus enlaces sin necesidad de aplicarle un recubrimiento. El análisis de ambos espectros permitió corroborar que se trataba, en efecto, de un textil de poliéster. Aunque en un principio se piensa que las muestras son diferentes, ambas resultaron ser iguales en cuanto a composición base (**Figura 15**). Sin embargo, con la espectroscopia FTIR realizada no fue posible establecer cuál de dichas muestras es hidrofílica y cual es hidrofóbica. Si bien la diferencia más significativa entre los espectros se catalogó como un error en la realización de la prueba FTIR, no se descarta que esa diferencia haya sido generada por la degradación del recubrimiento presente en la muestra dos. Esto podría explicar la presencia de CO_2 en dicha muestra, y el porqué de que ambos espectros sean iguales. Tampoco se descarta que los textiles posean otros compuestos base enlazados al poliéster. Es el caso del grupo funcional isotiocianato, donde cabe la posibilidad de que el CO_2 encontrado también sea producto de la degradación del isotiocianato. Sin embargo, al no poseer mayor información que ayude a identificar si este grupo funcional es clave en la hidrofobicidad del material, se recomienda realizar posteriores investigaciones que puedan aportar conocimiento a todas las partes interesadas e involucradas.

³⁶ DOMENICO, Davide. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR): Broad peak from 2000 to 2300 - can anyone help? [En línea]. Mayo de 2013. [Consultado el 25 de agosto de 2017]. Disponible en: https://www.researchgate.net/post/Fourier_Transform_Infrared_Spectroscopy_FT-IR_Broad_peak_from_2000_to_2300-can_anyone_help

3. PREPARACIÓN DE RECUBRIMIENTOS

3.1 SELECCIÓN DE MATERIAS PRIMAS

En vista de que el análisis FTIR hecho anteriormente no presentó ningún resultado favorable para seleccionar las materias primas, se buscaron compuestos cuya composición sea similar a la molécula de poliéster o a una sección de la misma. En este orden de ideas, se seleccionó un ácido graso orgánico saturado por dos motivos: principalmente por su comportamiento apolar debido a su larga cadena carbonada y por su baja energía superficial con respecto al agua. También se realizó una revisión bibliográfica en donde se encontraron varios compuestos que proporcionan propiedades hidrofóbicas a textiles; dichos compuestos fueron una silicona, tres fluoroquímicos y una resina³⁷. Sin embargo, la resina encontrada no es un compuesto de fácil acceso en el mercado así que debido a esto, se descarta el uso de la misma. En la **Tabla 1** se encuentra el parámetro de selección de las materias primas, comparadas con el agua.

Tabla 1. Selección de las materias primas a través de la energía superficial.

Compuesto	Energía superficial	Compuesto	Tensión superficial
Ácido Graso	27.7 mN/m		
Silicona	19.8 mN/m		
Fluoroquímico A	23.9 mN/m	Agua	71.97 mN/m
Fluoroquímico B	22.4 mN/m		
Fluoroquímico C	20.1 mN/m		

Fuente: LIDE, D. CRC handbook of chemistry and physics. 86 ed. Boca Raton, FL: CRC Press & Taylor & Francis, 2006, p. 3-462.





En resumen, estos compuestos se seleccionan preferiblemente con un valor de energía superficial menor a la tensión superficial del agua. De esta manera se garantiza el efecto hidrofóbico debido a que se evita que el agua expanda su área de mojado sobre la superficie sólida, formando una gota sobre ésta.

3.2 EQUIPOS




La preparación de los recubrimientos se llevó a cabo de tal forma que estos pudieran ser aplicados al textil sin alterar ninguna de sus propiedades físicas como el color, la textura y el olor. Por otra parte, la aplicación de los compuestos al textil se realizó de dos formas distintas: una por el método de inmersión y posterior curado en un horno; y la otra a través del Foulard de laboratorio y posterior curado en una termofijadora. En el **Cuadro 7** se listan todos los equipos empleados en el desarrollo de la etapa de experimentación.

³⁷ SCHINDLER, W. and HAUSER, P. Chemical finishing of textiles. Boca Raton, FL: Woodhead Publishing Limited & CRC Press, 2004, p. 76-82.

Cuadro 7. Equipos empleados en la experimentación.

Equipo	Imagen	Descripción
Balanza electrónica		<p><i>Marca:</i> LEXUS Mix-A 300g Plus.</p> <p><i>Rango de medición:</i> de 0,2 g a 300 g.</p>
Plancha de calentamiento		<p><i>Marca:</i> ACEQUILABS</p> <p><i>Rango de temperatura:</i> 0°C a 300°C.</p>
Agitador		<p><i>Marca:</i> IKA RW 20</p> <p><i>Potencia:</i> 110V a 115V</p>
Viscosímetro		<p><i>Marca :</i> BROOKFIELD LVDV-E</p> <p><i>Potencia:</i> ~115V</p>

Cuadro 7. (Continuación)

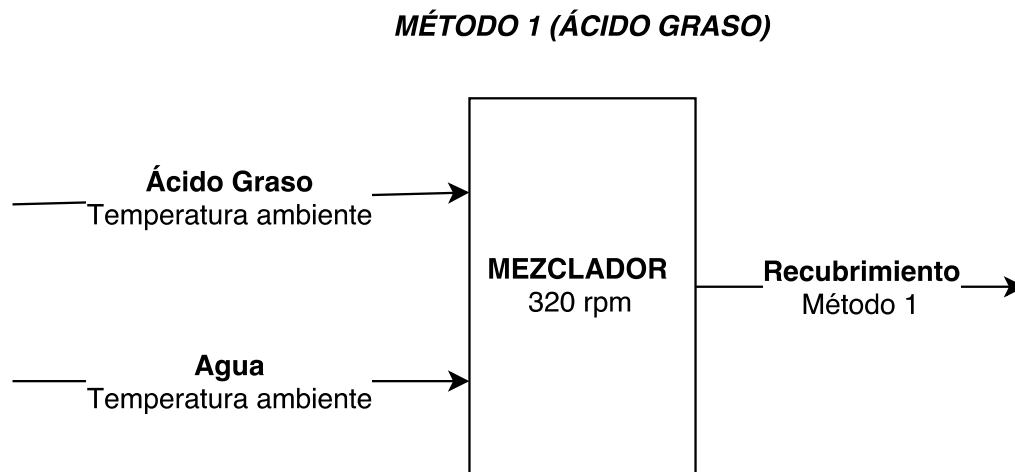
Equipo	Imagen	Descripción
Horno		<p><i>Marca: WTBBINDER</i></p> <p><i>Potencia: ~115V</i></p> <p><i>Rango de temperatura: 0°C a 300°C</i></p>
Foulard de laboratorio		<p><i>Marca: SDLATLAS</i></p> <p><i>Potencia: ~220V</i></p> <p><i>Rango de presión: de 0psi a 6psi.</i></p>
Termofijadora		<p><i>Marca: SDLATLAS</i></p> <p><i>Potencia: ~220V</i></p>

3.3 ÁCIDO GRASO

Un ácido graso saturado es un compuesto insoluble en agua³⁸ y ligeramente soluble en compuestos orgánicos como etanol, benceno, acetona, cloroformo y sulfuro de carbono³⁹. En su estado natural y a temperatura ambiente se encuentra como un sólido de apariencia cerosa e incoloro⁴⁰. Debido a que los compuestos a emplear como recubrimiento deben estar en estado líquido es necesario disolver el ácido graso para facilitar su posterior aplicación al textil de algodón.

3.3.1 Métodos. Se prepararon cuatro experimentos para ver la solubilidad del ácido graso en un solvente orgánico común como es el alcohol. Los experimentos fueron de 100mL cada uno, la velocidad de agitación fue de ~320 rpm en todos los casos y las disoluciones se realizaron a temperatura ambiente. Cada experimento se preparó por triplicado, es decir, uno original y dos réplicas. En la **Tabla 1** se lista el resumen del resultado de los experimentos, y en el **Diagrama 1** se evidencia la metodología realizada.

Diagrama 1. Metodología del método 1.



³⁸ YALKOWSKY, S.H. and BANERJEE, S. Aqueous Solubility. Methods of Estimation for Organic Compounds. New York, Marcel Dekker, 1992.

³⁹ LIDE, D. CRC handbook of chemistry and physics. 86 ed. Boca Raton, FL: CRC Press & Taylor & Francis, 2006, p. 3-462.

⁴⁰ ASHFORD, R. Ashford's Dictionary of industrial chemicals. Saltash: Wavelength Publications Ltd, 1994, p. 839.

Tabla 2. Solubilidad del ácido graso en alcohol a temperatura ambiente.

Experimento	Alcohol	Ácido Graso	Solubilidad
Sol AG 1	50%	50%	Insoluble
	39.47 g 50 mL	47.04 g 50 mL	
Sol AG 2	80%	20%	Insoluble
	63.14 g 80 mL	18.82 g 20 mL	
Sol AG 3	90%	10%	Insoluble
	71.04 g 90 mL	9.41 g 10 mL	
Sol AG 4	98%	2%	Soluble
	77.35 g 98 mL	1.88 g 2 mL	

Debido a que la cantidad de ácido graso disuelto presenta saturación en el experimento Sol AG 4, se opta por emulsionarlo con el fin de poder aumentar su concentración y, potencialmente su efecto hidrofóbico sobre el textil. Las emulsiones se preparan en agua, siendo el ácido graso la fase oleosa.

Se realizan seis experimentos por triplicado, en los cuales se varía la proporción en la que son adicionados tanto el ácido graso como el surfactante. Para lograr las emulsiones, el ácido graso se llevó a punto de fusión y el agua a una temperatura de ~80°C. Una vez fundido el ácido graso, se mezcló con el surfactante y dicha mezcla fue vertida en el agua caliente a una agitación de ~800 rpm. Esta elevada velocidad de agitación es necesaria para lograr una mejor dispersión del ácido graso en la mezcla y un tamaño de partícula pequeño, lo que se traduce en mayores viscosidades y homogeneidad de las emulsiones. En el **Diagrama 2** se encuentra resumida la metodología de los experimentos, y en la **Tabla 2** se muestra el resumen de las proporciones correspondientes de cada uno.

Diagrama 2. Metodología del método 2.

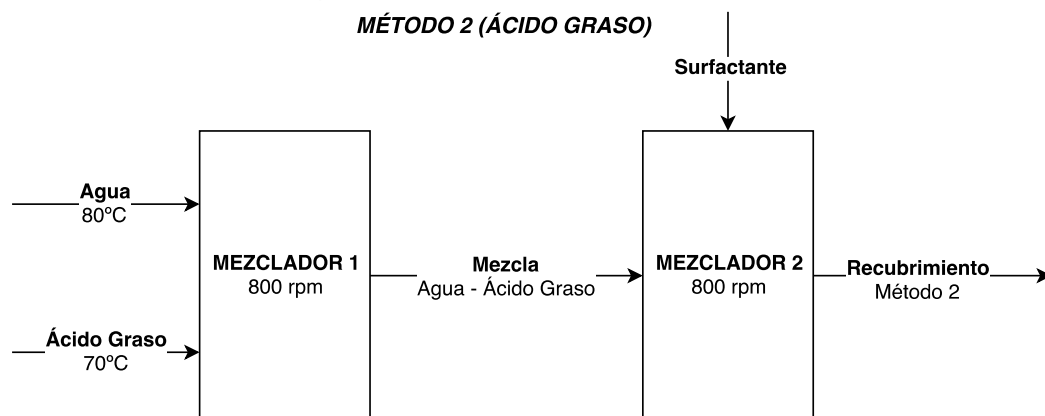


Tabla 3. Relación de ácido graso y surfactante en las emulsiones preparadas.

Experimento	Agua	Solución		Proporción
		Ácido graso	Surfactante	
Em AG 1	200 mL	10 g	10 g	1:1
Em AG 2		20 g	10 g	2:1
Em AG 3		10 g	20 g	1:2
Em AG 4		10 g	30 g	1:3
Em AG 5		10 g	40 g	1:4
Em AG 6		10 g	50 g	1:5

Las emulsiones anteriormente preparadas se dejaron en reposo durante una semana, para establecer la estabilidad de las mismas. Las emulsiones que sean estables, serán aquellas en las que no haya separación de fases. En la **Figura 18** se muestran los resultados de los experimentos.

Figura 18. Experimentos Em AG uno a seis después del periodo de reposo.



Para los experimentos Em AG 1 (proporción 1:1) y Em AG 2 (proporción 2:1) se evidencia separación de fases, es decir, que el ácido graso vuelve a su estado sólido en forma de gránulos, formando un precipitado. A pesar de que el experimento Em AG 3 (proporción 1:2) también presentó separación de fases, no hubo formación de precipitado; sin embargo, habían sólidos en suspensión.

Debido a que el objetivo es obtener una dispersión del ácido graso en agua, en los experimentos Em AG 4 a Em AG 6 se varía únicamente la cantidad adicionada de surfactante. Incrementar la proporción de surfactante aumenta la posibilidad de que las partículas de ácido graso sean emulsionadas⁴¹.

⁴¹ SALAGER, Jean-Louis. Cuaderno FIRP 747 Parte D, 2nd ed. Venezuela: Laboratorio FIRP, 1999, p. 8

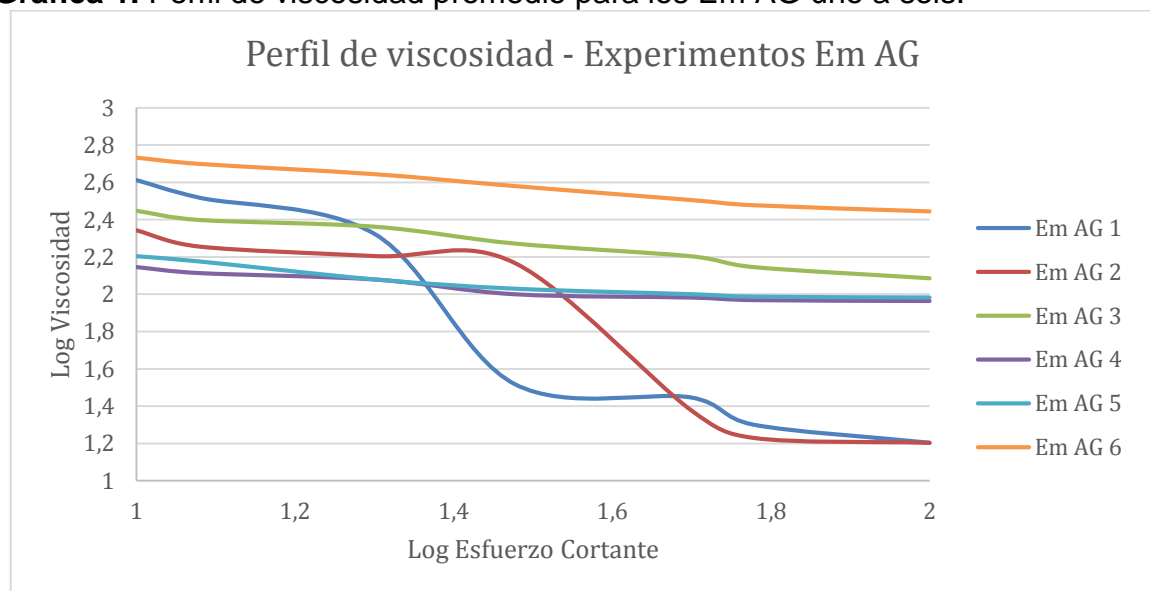
En estos experimentos no existe separación de fases y, además presentan una mejor consistencia y mayor viscosidad. Para identificar estas diferencias en la viscosidad, se realiza un prueba reológica con el viscosímetro BROOKFIELD a cada experimento y se determina el comportamiento de la viscosidad a diferentes esfuerzos cortantes. Todos los perfiles de viscosidad realizados a continuación se toman con la aguja (o “spindle”) 05 a temperatura ambiente y presión atmosférica. En la **Tabla 4** se lista el resumen los datos reológicos de cada experimento.

Tabla 4. Datos experimentales de la reología de cada experimento.

rpm	Viscosidad (cP)					
	Em AG 1	Em AG 2	Em AG 3	Em AG 4	Em AG 5	Em AG 6
10	410	220	280	140	160	540
12	330	180	250	130	150	500
20	210	160	230	120	120	440
30	33	147	187	100	107	380
50	28	24	160	96	100	320
60	20	17	140	93	97	300
100	16	16	122	92	96	278

Los perfiles de viscosidad se grafican en escala logarítmica para poder visualizar mejor su comportamiento. Debido a que todos los valores de viscosidad son semejantes entre réplicas, los datos empelados para graficar dichos perfiles son el promedio de las 3 mediciones por cada experimento. En la **Gráfica 1** se muestra el perfil de viscosidad promedio de cada experimento.

Gráfica 1. Perfil de viscosidad promedio para los Em AG uno a seis.



De esta gráfica se puede ver que los experimentos Em AG 1 y Em AG 2 presentan un comportamiento irregular, esto se debe a que se evidencia separación de fases y el ácido graso se precipita con el paso del tiempo. Es por esto que los dos perfiles resultan inconsistentes y presentan cambios abruptos en sus pendientes al aumentar el esfuerzo cortante. El experimento Em AG 3 muestra un mejor comportamiento pero su perfil de viscosidad también presenta inconsistencias, arrojando valores de viscosidad mayores que los anteriormente mostrados a causa de la existencia de sólidos en suspensión. De los experimentos Em AG 4 a Em AG 6 se observa un comportamiento más constante, indicando que estas mezclas son homogéneas y por lo tanto estables. Dichos perfiles de viscosidad tienen un comportamiento pseudo-plástico típico de las emulsiones, en donde se muestra una leve disminución de la viscosidad a medida que se incrementa el esfuerzo cortante aplicado. Los experimentos Em AG 1 a Em AG 3 no son considerados útiles debido a su incapacidad para emulsionar el ácido graso. Por otra parte los experimentos Em AG 4 a Em AG 6 se consideran viables para ser aplicados posteriormente a las muestras de textil como recubrimiento.

Sin embargo, para no dejar de lado la posibilidad de trabajar con una disolución de ácido graso, se realizan otros cinco experimentos por triplicado. El objetivo de estos experimentos es aumentar la solubilidad del ácido graso, realizando las disoluciones a una temperatura mayor a la temperatura ambiente. Nuevamente se prepararon 100 mL en cada experimento, con una agitación de ~320rpm y llevando al alcohol a una temperatura de ~50°C. En la **Tabla 5** se muestra el resumen de los resultados de estas disoluciones.

Tabla 5. Solubilidad del ácido graso en alcohol a ~50°C.

Experimento	Alcohol	Ácido Graso	Solubilidad
	99.9%	0.1%	
Sol T AG 1	78.85 g	0.09 g	Soluble
	99.9 mL	0.1 mL	
	99.8%	0.2%	
Sol T AG 2	78.77 g	0.19 g	Soluble
	99.8 mL	0.2 mL	
	99.7%	0.3%	
Sol T AG 3	78.69 g	0.28 g	Soluble
	99.7 mL	0.3 mL	
	99.6%	0.4%	
Sol T AG 4	78.61 g	0.38 g	Soluble
	99.6 mL	0.4 mL	
	99.5%	0.5%	
Sol T AG 5	78.54 g	0.47 g	Soluble
	99.5 mL	0.5 mL	

En estos experimentos, a diferencia de los Sol AG todos se solubilizan fácilmente gracias al aumento en la temperatura y su manipulación resulta ser más sencilla debido a que en ningún caso se alcanza el punto de saturación. Por otra parte, al enfriarse las disoluciones se mantienen homogéneas sin presencia de precipitado de ácido graso. Finalmente, los experimentos seleccionados a ser usados en el posterior diseño de experimentos son aquellos que requieren menor cantidad de materias primas involucradas en la formulación de los mismos, es decir las disoluciones de ácido graso a ~50°C.

3.4 SILICONA

Una silicona es un compuesto polimérico orgánico a base de sílice; naturalmente insoluble en agua y etanol; soluble en tetracloruro de carbono, benceno, cloroformo, dietil éter, tolueno y otros solventes orgánicos⁴². A temperatura ambiente es un líquido viscoso incoloro. Debido a lo anterior, se emulsiona la silicona en agua con el fin de hacer formulaciones a distintas concentraciones.

3.4.1 Métodos. Se realizaron nueve experimentos por triplicado en donde se variaron las proporciones en las que se agregaron el agua, la silicona y el surfactante. Dichos experimentos fueron de 500mL cada uno, a una agitación de ~800rpm y emulsionados a temperatura ambiente. El ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) actúa como agente secuestrante que forma complejos con los iones de la silicona proporcionándole mayor estabilidad a la emulsión resultante; y el propilenglicol funciona como un inversor favoreciendo que el comportamiento de la emulsión preparada sea mas hidrofóbico que hidrofílico. En la **Tabla 6** se muestra el resumen de las proporciones de las distintas emulsiones.

Tabla 6. Proporciones de los experimentos con silicona.

Experimento	Agua	Surfactante	Silicona	EDTA	Propilenglicol
	82%	5%	5%	5%	3%
Em S 1	410 mL	25 mL	25 mL	25 mL	15 mL
	410 g	23.625 g	24.125 g	21.5 g	15.6 g
	72%	10%	10%	5%	3%
Em S 2	360 mL	50 mL	50 mL	25 mL	15 mL
	360 g	47.25 g	48.25 g	21.5 g	15.6 g
	62%	15%	15%	5%	3%
Em S 3	310 mL	75 mL	75 mL	25 mL	15 mL
	310 g	70.875 g	72.375 g	21.5 g	15.6 g

⁴² Food and Agriculture Organization of the United States (FAO). Additive-315. [En línea]. Enero de 2013. [Consultado el 29 de agosto de 2017]. Disponible en: <http://www.fao.org/ag/agn/jecfa-additives/specs/Monograph1/Additive-315.pdf>

Tabla 6. (Continuación)

Experimento	Agua	Surfactante	Silicona	EDTA	Propilenglicol
	52%	20%	20%	5%	3%
Em S 4	260 mL	100 mL	100 mL	25 mL	15 mL
	260 g	94.5 g	96.5 g	21.5 g	15.6 g
	42%	25%	25%	5%	3%
Em S 5	210 mL	125 mL	125 mL	25 mL	15 mL
	210 g	118.125 g	120.625 g	21.5 g	15.6 g
	32%	30%	30%	5%	3%
Em S 6	160 mL	150 mL	150 mL	25 mL	15 mL
	160 g	141.75 g	144.75 g	21.5 g	15.6 g
	22%	35%	35%	5%	3%
Em S 7	110 mL	175 mL	175 mL	25 mL	15 mL
	110 g	165.375 g	168.875 g	21.5 g	15.6 g
	12%	40%	40%	5%	3%
Em S 8	60 mL	200 mL	200 mL	25 mL	15 mL
	60 g	189 g	193 g	21.5 g	15.6 g
	2%	45%	45%	5%	3%
Em S 9	10 mL	225 mL	225 mL	25 mL	15 mL
	10 g	212.625 g	217.125 g	21.5 g	15.6 g

Una vez preparadas, las emulsiones se dejan en reposo una semana para evidenciar si son estables. En la **Figura 19** se muestran los resultados después de una semana de reposo.

Figura 19. Experimentos Em S uno a nueve después del periodo de reposo.

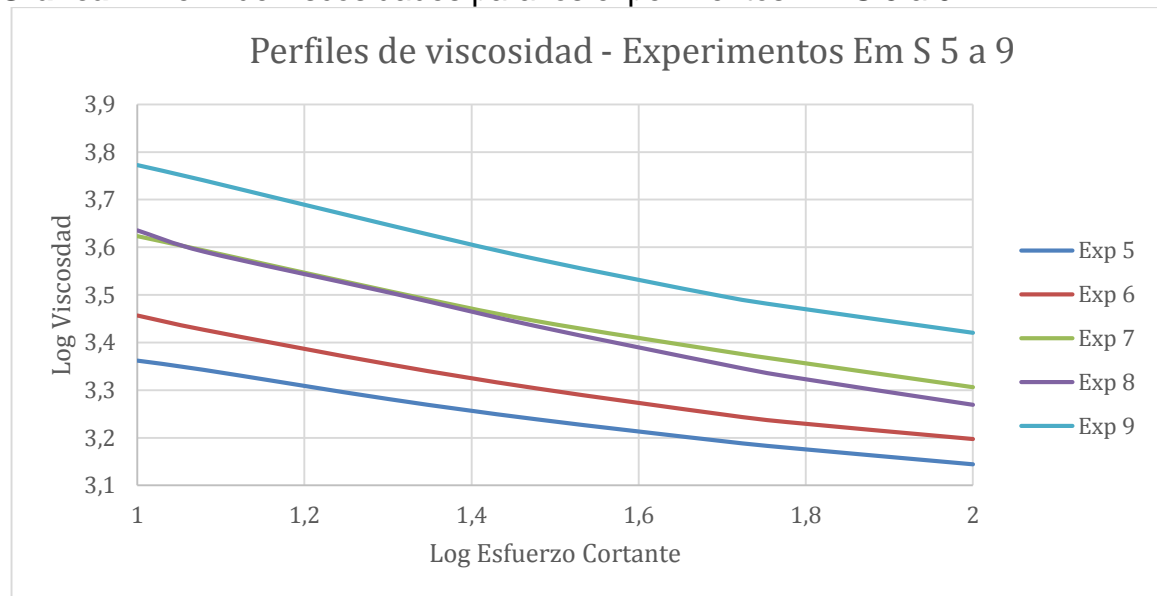
Luego de este período de tiempo, se puede ver claramente que en los experimentos uno a cuatro hubo separación de fases, lo cual se debe a la alta cantidad de agua presente en los mismos. Estas formulaciones se descartaron inmediatamente, por lo que no se les hará prueba reológica ni tampoco será considerado su uso como recubrimiento. A diferencia del comportamiento anterior, los experimentos cinco a nueve presentan homogeneidad y una tonalidad uniforme e intensa conforme se concentra la silicona en los mismos.

Debido a que la cantidad de silicona emulsiona aumenta en cada experimento, su viscosidad también se ve incrementada. Los perfiles de viscosidad listados en la **Tabla 7** muestra el resumen del comportamiento que tienen estas formulaciones cuando son sometidas a diferentes valores de esfuerzo cortante; y la **Gráfica 2** presenta el comportamiento de cada perfil de viscosidad.

Tabla 7. Viscosidades de los experimentos cinco a nueve de silicona.

rpm	Viscosidad (cP)				
	Em S 5	Em S 6	Em S 7	Em S 8	Em S 9
10	2300	2860	4200	4320	5920
12	2200	2670	3920	3900	5500
20	1910	2260	3220	3200	4430
30	1733	2013	2787	2720	3760
50	1560	1776	2412	2264	3144
60	1510	1710	2300	2133	2987
100	1394	1576	2024	1860	2632

Gráfica 2. Perfil de viscosidades para los experimentos Em S 5 a 9.



Como se puede evidenciar en la gráfica, los experimentos Em S 5 a Em S 9 presentan un claro comportamiento pseudo-plástico, aumentando a medida que la cantidad de silicona a emulsionar también aumenta; lo que también permite deducir que el tamaño de partícula en las formulaciones disminuye a medida que se concentra cada emulsión. Finalmente, con toda la información anteriormente obtenida se consideran viables los experimentos 5, 6, 7, 8 y 9 dentro del diseño de experimentos.

3.5 FLUOROQUÍMICOS

Un fluoroquímico es un compuesto orgánico que contiene flúor y carbono. Son estructuralmente similares a los hidrocarburos y son empleados en la elaboración de refrigerantes, aceites, grasas, polímeros sintéticos, etc⁴³. Algunos de sus usos industriales son como aditivos antimanchas, retardantes de llama, estimulantes de pozos petroleros, recubrimientos, etc⁴⁴. Esta última aplicación (como aditivo) será considerada a continuación para formular un recubrimiento que pueda ser fácilmente aplicado al textil y así, verificar si proporciona hidrofobicidad al mismo.

3.5.1 Métodos. Los fluoroquímicos A, B y C fueron preparados de la misma forma y en las mismas proporciones. Se prepararon disoluciones de 30mL de cada uno, disueltos en alcohol industrial a temperatura ambiente y con una agitación de ~320rpm durante 5 minutos para asegurar la homogeneidad de las fases. En la **Tabla 8** se muestran las preparaciones de los tres fluoroquímicos.

Tabla 8. Proporción de las disoluciones de fluoroquímicos A, B y C.

<u>Experimento</u>	<u>Alcohol</u>	<u>Fluoroquímico</u>	<u>Solubilidad</u>
1	99%	1%	Soluble
2	98%	2%	Soluble
3	97%	3%	Soluble

Dado que todos los experimentos se solubilizaron, estas proporciones se consideran viables para efectuar el diseño de experimentos. En conclusión, la selección de las concentraciones en el caso del ácido graso se debe a que se buscan bajas concentraciones que se mantengan solubilizadas al enfriarse hasta la temperatura ambiente; para la silicona se seleccionan concentraciones tales que se pueda evidenciar claramente la cantidad de producto emulsionado; y, para los fluoroquímicos se toman bajas concentraciones debido a la disponibilidad en el mercado y costo de las materias primas.

También se intenta evidenciar claramente el efecto de la concentración sobre la variable de respuesta, por esta razón no se toman concentraciones muy cercanas entre sí pero tampoco se arriesga la consistencia del diseño de experimentos tomando concentraciones muy alejadas entre sí. En la **Tabla 9** se resume la selección de concentración para cada compuesto.

⁴³ Daikin Industries, Ltd. Fluorocarbon. [En línea]. Marzo de 2014. [Consultado el 1 de septiembre de 2017]. Disponible en: <https://www.daikin.com/chm/products/fluorocarbon/index.html>

⁴⁴ 3M. Fluorochemicals [En línea]. Agosto de 2015. [Consultado el 1 de septiembre de 2017]. Disponible en: https://www.3m.com/3M/en_US/company-us/all-3m-products/~/All-3M-Products/Chemicals/Fluorochemicals/?N=5002385+8745514+87111017+8723740+3294857497&rt=r3

Tabla 9. Concentraciones seleccionadas para el diseño de experimentos.

Compuesto	Concentración
	0.3%
Ácido Graso	0.5%
	1%
	25%
Silicona	35%
	45%
Fluoroquímico A,	1%
B y C	2%
	3%

De esta forma se finaliza la preparación de las formulaciones que, probablemente, le otorguen hidrofobicidad a un textil de algodón y se da paso al diseño de experimentos, construido para determinar con qué condiciones se obtiene un mejor resultado.

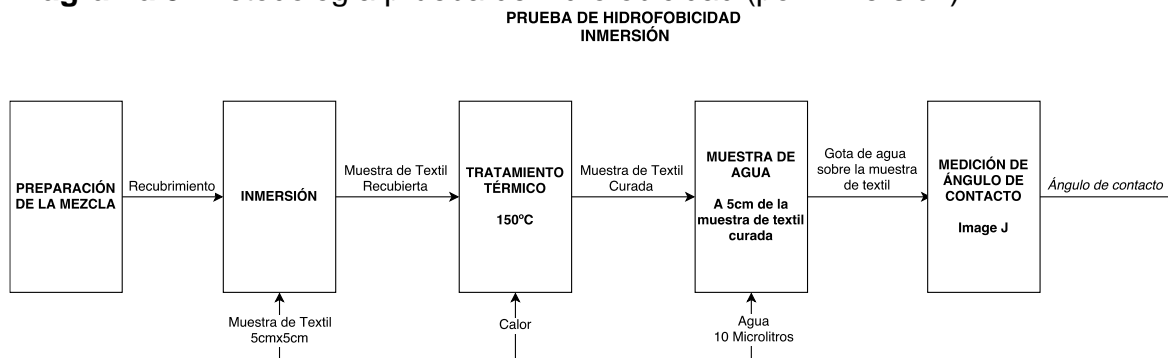
4. CONDICIONES DE APLICACIÓN Y CURADO

El diseño de experimentos que se empleará es el diseño ortogonal propuesto por Genichi Taguchi, el cual combina métodos estadísticos y de ingeniería para optimizar los procesos de diseño y fabricación de modo que se reduzcan los costos de los productos. El diseño ortogonal reduce considerablemente el número de pruebas a realizar sin sacrificar la significancia que pueda tener los diferentes factores de las variables analizadas. Este diseño de experimentos ayuda a identificar los factores que más intervienen en la generación de problemas o, alternativamente, los factores que más contribuyen a lograr resultados positivos⁴⁵.

Para todos los compuestos se evaluarán tres distintos niveles de tiempo de curado del recubrimiento, según los valores sugeridos dentro de la metodología propuesta por Hu⁴⁶; los cuales serán 5, 10 y 15 minutos.

La prueba de hidrofobicidad se realiza por dos métodos diferentes, en el **Diagrama 3**, se evidencia la metodología empleada para la realización de la prueba de hidrofobicidad por el método de inmersión a los compuestos seleccionados como posible recubrimiento para el material, y en el **Diagrama 4**, se presenta la metodología empleada para la realización de la prueba de hidrofobicidad por el método Foulard; cada uno de los recubrimientos se evalúa en 9 muestras, variando la composición y el tiempo de curado, y cada una de estas a su vez maneja 2 repeticiones. De la **Tabla 10** a **Tabla 12** se muestra el diseño de experimentos para cada compuesto, siguiendo los arreglos ortogonales de Taguchi.

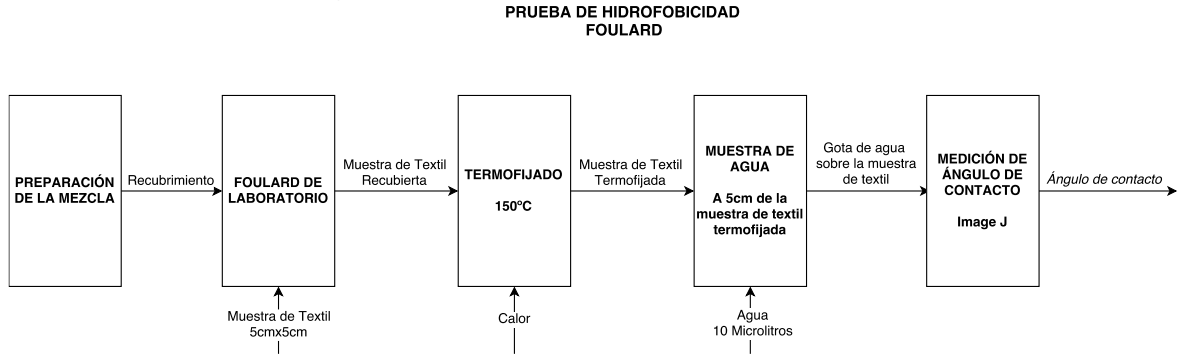
Diagrama 3. Metodología prueba de hidrofobicidad (por inmersión).



⁴⁵ YACUZZI, Enrique, *et al.* EL DISEÑO EXPERIMENTAL Y LOS MÉTODOS DE TAGUCHI: CONCEPTOS Y APLICACIONES EN LA INDUSTRIA FARMACÉUTICA. Abril, 2012, vol. 1, no.1, p 25.

⁴⁶ HU, J Active coatings for smart textiles. Amsterdam: Elsevier/Woodhead Publishing, 2016, p.43-45.

Diagrama 4. Metodología prueba de hidrofobicidad (por Foulard).



La prueba de hidrofobicidad por método de inmersión se realiza en las instalaciones de la Fundación Universidad de América, utilizando un Beaker de 250 mL para la inmersión y un horno para el curado, previamente fijado a una temperatura de ~150°C. La prueba de hidrofobicidad por método de Foulard se realiza en las instalaciones del Centro de Manufactura en Textil y Cuero – Sena Textil, utilizando un Foulard de laboratorio para impregnar por presión los recubrimientos en las muestras de textil (4psi) y una Termofijadora para el curado, previamente fijada a una temperatura de ~150°C. Esta temperatura se seleccionó tal que los productos a analizar (ácido graso, silicona y fluoroquímicos) no se degradaran ni perdieran las propiedades características de cada uno.

Tabla 10. Diseño de experimentos para Ácido Graso.

Ácido graso – 550 rpm		
Muestra	Composición	Tiempo de curado (Minutos)
1	0,3%	5
2	0,3%	10
3	0,3%	15
4	0,5%	5
5	0,5%	10
6	0,5%	15
7	1%	5
8	1%	10
9	1%	15

Tabla 11. Diseño de experimentos para silicona.

Silicona – 800 rpm		
Muestra	Composición	Tiempo de curado (Minutos)
1	25%	5
2	25%	10
3	25%	15
4	35%	5
5	35%	10
6	35%	15
7	45%	5
8	45%	10
9	45%	15

Tabla 12. Diseño de experimentos para fluoroquímico A, B y C.

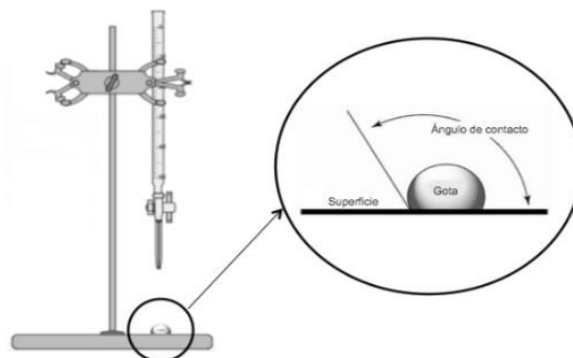
Fluoroquímico A, B Y C – 330 rpm		
Muestra	Composición	Tiempo de curado (Minutos)
1	1%	5
2	1%	10
3	1%	15
4	2%	5
5	2%	10
6	2%	15
7	3%	5
8	3%	10
9	3%	15

La evaluación de los compuestos se realiza a través de la prueba de gota de agua y la medición del ángulo de contacto, considerando aceptables aquellas muestras que presenten un valor mayor o igual a 90°, lo cual indica que la superficie tiene un comportamiento hidrofóbico. Esta prueba se realiza con una micropipeta automática de 10 µL situada a 5 cm de la superficie del textil de algodón y se configura de tal forma que todas las gotas tengan un volumen de 10 µL, como lo muestra Park⁴⁷. En la **Figura 20** se observa el montaje de la metodología utilizada para la prueba de gota de agua.

Una vez la gota cae sobre la superficie del textil, se toma una fotografía de perfil de tal manera que se pueda apreciar la línea de contacto entre la superficie y la gota y luego cada fotografía es examinada con el software de libre acceso ImageJ para determinar sus respectivos ángulos de contacto.

⁴⁷ PARK, S; KIM, J and PARK, Chung H., Superhydrophobic Textiles: Review of Theoretical Definitions, Fabrication and Functional Evaluation. En: Journal of Engineered Fibers and Fabrics. 2015, vol. 10, no. 4, p. 6-14.

Figura 20. Montaje para la prueba de gota de agua.




Fuente: Cleaning Technologies Group. Is It Clean? – Oil and Hydrophobic Films – Contact Angle and Beyond. [En línea]. Agosto de 2011. [Consultado el 12 de septiembre de 2017]. Disponible en: <https://techblog.ctgclean.com/2011/08/is-it-clean-oil-and-hydrophobic-films-contact-angle-and-beyond/>

Los ángulos de contacto obtenidos para cada una de las muestras y sus réplicas presentan una variación prácticamente imperceptible a simple vista, sin embargo al ser analizados con el software se encuentran ligeras variaciones entre ellos. Se reporta el ángulo de contacto promedio de las tres mediciones para cada muestra junto un valor de incertidumbre que considera las variaciones del ángulo entre las mismas... **Ver Anexo A...** Del **Cuadro 8** al **Cuadro 17** se presentan los resultados de todas las pruebas de hidrofobicidad para ambos métodos.

Cuadro 8. Ángulos de contacto para el ácido graso por inmersión.



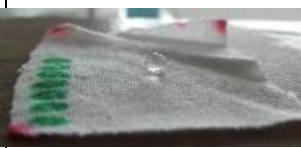






		Ángulos de contacto ácido graso – Inmersión		
		Concentración		
		0,3%	0,5%	1%
Tiempo de curado (min)	5			
		$86^{\circ} \pm 3^{\circ}$	$94^{\circ} \pm 3^{\circ}$	$119^{\circ} \pm 2^{\circ}$
		10		
	$96^{\circ} \pm 3^{\circ}$		$122^{\circ} \pm 3^{\circ}$	$127^{\circ} \pm 2^{\circ}$
	15			
		$97^{\circ} \pm 2^{\circ}$	$123^{\circ} \pm 3^{\circ}$	$128^{\circ} \pm 2^{\circ}$

Cuadro 9. Ángulos de contacto para la silicona por inmersión.










Ángulos de contacto silicona – Inmersión	
Después del proceso de curado en las muestras con silicona el recubrimiento no se adhiere al textil en ninguno de los casos, razón por la cual no es posible realizar la prueba de caída de gota.	

En este caso las muestras de textil permanecen húmedas luego del proceso de curado debido a que la cantidad en exceso de silicona aplicada por el método de inmersión. Por otro lado, por el método Foulard, la cantidad de silicona aplicada es menor debido a la presión del equipo permitiendo que el proceso de curado adhiera el recubrimiento a las muestras.










Cuadro 10. Ángulos de contacto para el fluoroquímico A por inmersión.

Ángulos de contacto fluoroquímico A – Inmersión				
		CONCENTRACIÓN		
		1%	2%	3%
Tiempo de curado (min)	5			
		$124^{\circ} \pm 2^{\circ}$	$128^{\circ} \pm 2^{\circ}$	$135^{\circ} \pm 3^{\circ}$
	10			
		$130^{\circ} \pm 3^{\circ}$	$133^{\circ} \pm 1^{\circ}$	$136^{\circ} \pm 2^{\circ}$
	15			
		$133^{\circ} \pm 3^{\circ}$	$133^{\circ} \pm 1^{\circ}$	$138^{\circ} \pm 2^{\circ}$








Cuadro 11. Ángulos de contacto para el fluoroquímico B por inmersión.

Ángulos de contacto fluoroquímico B – Inmersión				
		Concentración		
		1%	2%	3%
Tiempo de curado (min)	5			
		$137^\circ \pm 1^\circ$	$142^\circ \pm 2^\circ$	$143^\circ \pm 1^\circ$
	10			
		$141^\circ \pm 2^\circ$	$144^\circ \pm 2^\circ$	$145^\circ \pm 2^\circ$
	15			
		$144^\circ \pm 1^\circ$	$145^\circ \pm 1^\circ$	$147^\circ \pm 1^\circ$








Cuadro 12. Ángulos de contacto para el fluoroquímico C por inmersión.

Ángulos de contacto fluoroquímico C – Inmersión				
		Concentración		
		1%	2%	3%
Tiempo de curado (min)	5			
		$147^\circ \pm 1^\circ$	$150^\circ \pm 1^\circ$	$150^\circ \pm 1^\circ$
	10			
		$150^\circ \pm 1^\circ$	$152^\circ \pm 1^\circ$	$152^\circ \pm 2^\circ$
	15			
		$150^\circ \pm 1^\circ$	$152^\circ \pm 1^\circ$	$153^\circ \pm 1^\circ$










Cuadro 13. Ángulos de contacto para el ácido graso por Foulard.

Ángulos de contacto ácido graso – Foulard				
		Concentración		
		0,3%	0,5%	1%
Tiempo de curado (min)	5			
		26°	92° ± 2°	118° ± 1°
		10		
	51° ± 2°		117° ± 1°	124° ± 2°
	15			
		61° ± 2°	119° ± 1°	125° ± 2°










Cuadro 14. Ángulos de contacto para la silicona por Foulard.

Ángulos de contacto silicona – Foulard				
		Concentración		
		25%	35%	45%
Tiempo de curado (min)	5			
		0°	0°	0°
		10		
	0°		0°	0°
	15			
		0°	0°	0°










Cuadro 15. Ángulos de contacto para el fluoroquímico A por Foulard.

Ángulos de contacto fluoroquímico A – Foulard				
		Concentración		
		1%	2%	3%
Tiempo de curado (min)	5			
		$121^{\circ} \pm 1^{\circ}$	$125^{\circ} \pm 2^{\circ}$	$130^{\circ} \pm 2^{\circ}$
	10			
		$128^{\circ} \pm 1^{\circ}$	$129^{\circ} \pm 2^{\circ}$	$132^{\circ} \pm 2^{\circ}$
	15			
		$130^{\circ} \pm 2^{\circ}$	$130^{\circ} \pm 1^{\circ}$	$132^{\circ} \pm 2^{\circ}$

Cuadro 16. Ángulos de contacto para el fluoroquímico B por Foulard.

Ángulos de contacto fluoroquímico B – Foulard				
		Concentración		
		1%	2%	3%
Tiempo de curado (min)	5			
		$129^{\circ} \pm 2^{\circ}$	$135^{\circ} \pm 1^{\circ}$	$135^{\circ} \pm 1^{\circ}$
	10			
		$133^{\circ} \pm 2^{\circ}$	$137^{\circ} \pm 2^{\circ}$	$137^{\circ} \pm 2^{\circ}$
	15			
		$136^{\circ} \pm 1^{\circ}$	$138^{\circ} \pm 1^{\circ}$	$139^{\circ} \pm 1^{\circ}$

Cuadro 17. Ángulos de contacto para el fluoroquímico C por Foulard.

Ángulos de contacto fluoroquímico C – Foulard				
		Concentración		
		1%	2%	3%
Tiempo de curado (min)	5			
		$138^{\circ} \pm 2^{\circ}$	$141^{\circ} \pm 1^{\circ}$	$141^{\circ} \pm 2^{\circ}$
	10			
		$141^{\circ} \pm 2^{\circ}$	$143^{\circ} \pm 2^{\circ}$	$143^{\circ} \pm 1^{\circ}$
	15			
		$141^{\circ} \pm 2^{\circ}$	$144^{\circ} \pm 1^{\circ}$	$145^{\circ} \pm 2^{\circ}$

Con base en los resultados obtenidos de las pruebas de caída de gota se puede observar que el método que arroja ángulos de contacto más altos es el de inmersión. Sin embargo, analizando más detalladamente estos datos es válido decir que la diferencia entre ambas metodologías es mínima debido a que, si bien los valores de los ángulos de contacto cambian, estos no presentan una variación significativa que de testimonio acerca de que técnica es la más apropiada.

Caso contrario sucede que si analizamos los resultados con respecto a las variables concentración y temperatura. A medida que se aumenta la concentración y el tiempo de curado, el ángulo de contacto se incrementa también; afirmación que no es errada si se piensa en términos de mayor cantidad de compuesto hidrofóbico presente en el recubrimiento y mayor tiempo de fijación del recubrimiento al textil. No obstante, el aumento del ángulo de contacto registrado en las muestras tratadas de 10 a 15 minutos no es tan significativo comparado con el aumento que tiene lugar de 5 a 10 minutos de curado, independientemente de la concentración y del compuesto empleado.

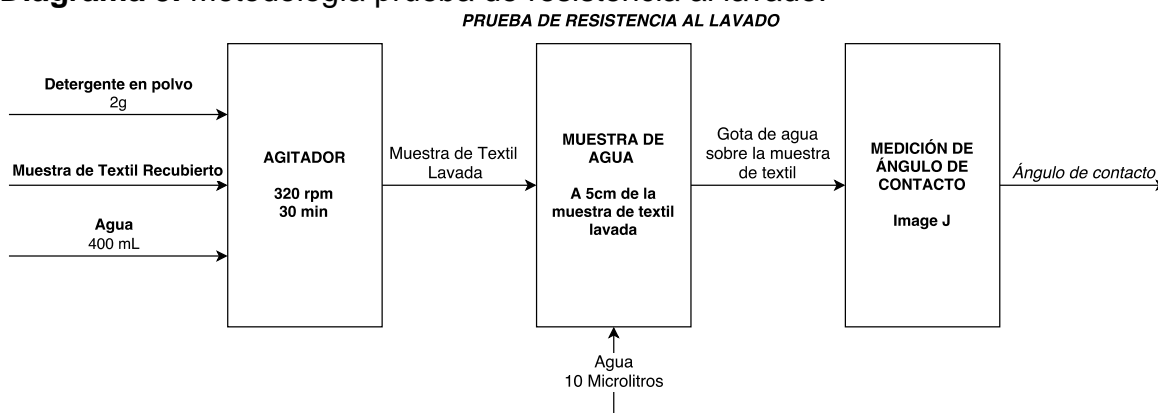
Por otro lado, se espera un proceso de adsorción por parte de las fibras de algodón desde los diferentes recubrimientos. Debido a que un textil de algodón no es una superficie completamente lisa, el modelo de Young no tiene aplicación en este caso. De igual forma, al no modificar la rugosidad superficial del material el modelo de Cassie–Baxter tampoco es objeto de análisis.

En este caso el modelo de Wenzel se ajusta debido a que toma en consideración la rugosidad propia del material, se asume que el recubrimiento penetra las ranuras causadas por la misma y, la adsorción se efectúa a temperatura ambiente y presión atmosférica. Sin embargo, ninguno de estos resultados da información sobre la solidez y durabilidad del recubrimiento por lo cual se realizan las pruebas de lavado para determinar la resistencia de los distintos recubrimientos aplicados, simulando procesos de lavado ordinarios como si el producto fuera aplicado a prendas de vestir cotidianas.

5. PRUEBAS DE RESISTENCIA AL LAVADO

La prueba de resistencia a los ciclos de lavado se realizó de acuerdo a la metodología mencionada por Bae⁴⁸ y Borisova⁴⁹, los cuales ponen las muestras del textil tratado con recubrimiento dentro de un recipiente simulando los efectos de una lavadora convencional, para ello se emplean 2g de detergente en polvo disueltos en 400mL de agua, que son agitados junto a la muestra a 320 rpm durante 30 minutos. En el **Diagrama 5** y **Figura 21** se indica la metodología empleada para las pruebas de resistencia al lavado y el montaje realizado para las mismas; en el **Cuadro 18**, **Cuadro 19** y **Cuadro 20** se recopilan las imágenes de las gotas de agua probadas en los textiles recubiertos después de cada ciclo de lavado y en el **Cuadro 21**, **Cuadro 22** y **Cuadro 23** se presentan un resumen de los ángulos de contacto obtenidos después de cada ciclo de lavado para cada textil analizado; para las tablas anteriormente mencionadas el símbolo “✓” indica aquellas muestras que aprobaron satisfactoriamente el ciclo de lavado sin perder totalmente sus propiedades hidrofóbicas, mientras que el símbolo “x” permite conocer cuáles muestras reprobaron el ciclo de lavado y perdieron definitivamente sus propiedades hidrofóbicas.

Diagrama 5. Metodología prueba de resistencia al lavado.



⁴⁸ BAE, Geun Yeol, *et al.* Superhydrophobicity of cotton fabrics treated with silica nanoparticles and water-repellent agent. En: Journal of Colloid and Interface Science. 2009, vol. 337, no. 1, pp. 170-175, 2009.

⁴⁹ BORISOVA, Anna and REIHMANE, Sakaidrite. Hydrophobic Treatment of Blended Fabric's Surface. En: Materials Science. 2013 vol. 19, no. 2, p. 3.

Figura 21. Montaje prueba de resistencia al lavado.



Cuadro 18. Resultados primer ciclo de lavado.

Ciclo 1					
Foulard			Inmersión		
Ácido Graso 0,3%	Ácido Graso 0,5%	Ácido Graso 1%	Ácido Graso 0,3%	Ácido Graso 0,5%	Ácido Graso 1%
x	x	x	x	x	x
Fluoroquím. A 1%	Fluoroquím. A 2%	Fluoroquím. A 3%	Fluoroquím. A 1%	Fluoroquím. A 2%	Fluoroquím. A 3%
✓	✓	✓	✓	✓	✓
Fluoroquím. B 1%	Fluoroquím. B 2%	Fluoroquím. B 3%	Fluoroquím. B 1%	Fluoroquím. B 2%	Fluoroquím. B 3%
✓	✓	✓	x	✓	✓
Fluoroquím. C 1%	Fluoroquím. C 2%	Fluoroquím. C 3%	Fluoroquím. C 1%	Fluoroquím. C 2%	Fluoroquím. C 3%
x	x	x	x	x	x













Cuadro 19. Resultados segundo ciclo de lavado.

Ciclo 2					
Foulard			Inmersión		
Fluoroquím. A 1%	Fluoroquím. A 2%	Fluoroquím. A 3%	Fluoroquím. A 1%	Fluoroquím. A 2%	Fluoroquím. A 3%
✓	✓	✓	x	x	X
Fluoroquím. B 1%	Fluoroquím. B 2%	Fluoroquím. B 3%		Fluoroquím. B 2%	Fluoroquím. B 3%
x	x	✓		x	x













Cuadro 20. Resultados tercer ciclo de lavado.

Ciclo 3		
Foulard		
Fluoroquímico A 1%	Fluoroquímico A 2%	Fluoroquímico A 3%
x	x	x
		Fluoroquímico B 3%
		X











Cuadro 21. Ángulos de contacto después del primer ciclo de lavado.

Ciclo 1		
	Foulard	Inmersión
Compuesto	Ángulo/Imagen	Ángulo/Imagen
Ácido Graso 0,3%	 0°	 0°
Ácido Graso 0,5%	 0°	 0°
Ácido Graso 1%	 0°	 0°
Fluoroquímico A 1%	 80° ± 2°	 35° ± 2°
Fluoroquímico A 2%	 93° ± 2°	 70° ± 2°
Fluoroquímico A 3%	 93° ± 2°	 87° ± 2°





Cuadro 21. (Continuación)

Compuesto	Ciclo 1	
	Foulard	Inmersión
	Ángulo/Imagen	Ángulo/Imagen
Fluoroquímico B 1%	 $64^{\circ} \pm 1^{\circ}$	 $29^{\circ} \pm 2^{\circ}$
Fluoroquímico B 2%	 $69^{\circ} \pm 2^{\circ}$	 $81^{\circ} \pm 2^{\circ}$
Fluoroquímico B 3%	 $69^{\circ} \pm 2^{\circ}$	 $81^{\circ} \pm 2^{\circ}$
Fluoroquímico C 1%	 0°	 0°
Fluoroquímico C 2%	 0°	 0°
Fluoroquímico C 3%	 0°	 0°

Cuadro 22. Ángulos de contacto después del segundo ciclo de lavado.

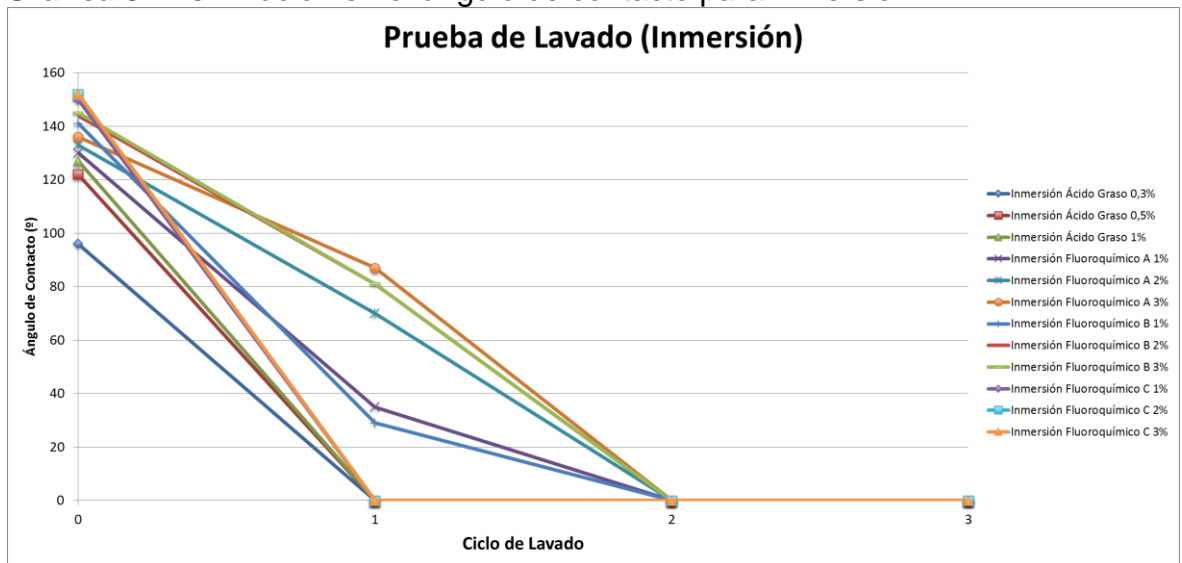
Ciclo 2			
Método	Compuesto	Ángulo	Imagen
Foulard	Fluoroquímico A 1%	$69^\circ \pm 2^\circ$	
	Fluoroquímico A 2%	$79^\circ \pm 2^\circ$	
	Fluoroquímico A 3%	$79^\circ \pm 2^\circ$	
	Fluoroquímico B 1%	0°	
	Fluoroquímico B 2%	0°	
	Fluoroquímico B 3%	$53^\circ \pm 2^\circ$	
Inmersión	Fluoroquímico A 2%	0°	
	Fluoroquímico A 3%	0°	
	Fluoroquímico B 2%	0°	
	Fluoroquímico B 3%	0°	

Cuadro 23. Ángulos de contacto después del tercer ciclo de lavado.

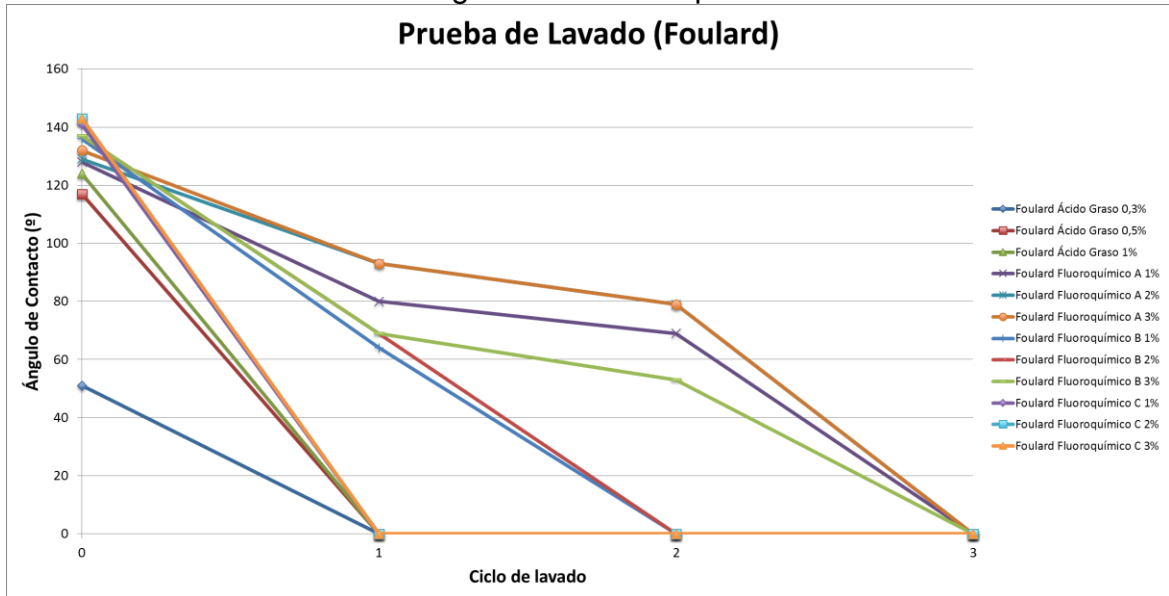
Ciclo 3			
Método	Compuesto	Ángulo de contacto	Imagen
Foulard	Fluoroquímico A 1%	0°	
	Fluoroquímico A 2%	0°	
	Fluoroquímico A 3%	0°	
	Fluoroquímico B 3%	0°	

Como se puede observar en las tablas anteriores, no todos los recubrimientos tienen la misma resistencia a los ciclos de lavado, a partir de los resultados obtenidos, se define que el Fluoroquímico A aplicado por el método Foulard y en las tres concentraciones trabajadas, posee una mejor resistencia a los ciclos de lavado. En la **Gráfica 3** y **Gráfica 4** se evidencia el comportamiento de los ángulos de contacto respecto a los ciclos de lavado.

Gráfica 3. Disminución en el ángulo de contacto para inmersión.



Gráfica 4. Disminución en el ángulo de contacto para Foulard.



La hidrofobicidad después del primer ciclo de lavado de las muestras de Fluoroquímico A recubierto por Foulard disminuye 37,5%, 27,9% y 29,5% para cada una de sus concentraciones teniendo en cuenta el ángulo de contacto original. Para el Fluoroquímico B recubierto por Foulard la disminución es del 52,9%, 49,6% y 49,6% respectivamente para cada concentración.

Por otro lado, las muestras recubiertas por método de Inmersión también presentan una disminución del ángulo de contacto, para las muestras de Fluoroquímico A disminuyen 73%, 47% y 36% de la menor a la mayor concentración; y para el Fluoroquímico B se obtienen disminuciones de 79,4%, 43,7% y 44,1%. Esto permite observar que únicamente las muestras de Fluoroquímico A recubierto por Foulard al 2% y 3% mantienen ángulos de contacto hidrofóbicos después de lavar por primera vez.

Luego del segundo ciclo de lavado, únicamente mantienen las propiedades hidrofóbicas las muestras recubiertas por Fluoroquímico A, en sus tres niveles de concentración y la muestra recubierta por Fluoroquímico B en su concentración más alta, aunque estas propiedades ya no garantizan que la superficie sea hidrofóbica. Para estas muestras la disminución del ángulo de contacto respecto a los valores originales son de 46,1% para el Fluoroquímico A al 1%, 38,7% para el Fluoroquímico A al 2%, 40,1% para el Fluoroquímico A al 3% y 61,3% para el Fluoroquímico B al 3%; someter estas muestras a un nuevo y tercer ciclo de lavado arroja como resultado la ausencia total de propiedades hidrofóbicas para todas ellas.

6. COSTO DE PRODUCCIÓN

A continuación, en la **Tabla 13** se relacionan los precios de los compuestos utilizados durante el desarrollo del proyecto, la silicona no se contempla en la estimación de costos de producción pues a partir de las pruebas de gota iniciales se descarta por la complejidad de su manejo.

Tabla 13. Precios de los compuestos.

Compuesto	Precio (COP/kg)
Ácido graso	9.000
Fluoroquímico A	467.000
Fluoroquímico B	435.000
Fluoroquímico C	420.000
Etanol 96% (Medio solvente)	2.540

La experimentación a nivel laboratorio se realiza en un beker plástico de 14 cm de altura y 10 cm de diámetro, con agitación de 320 rpm de acuerdo al compuesto utilizado.

Las condiciones de experimentación con ácido graso son 320 rpm de agitación y 0,3%, 0,5% y 1% de concentración, obteniendo un volumen final de 100mL; y para cada uno de los fluoroquímicos (A, B y C) 320 rpm de agitación y 1%, 2% y 3% de concentración, obteniendo un volumen final de 30mL.

Industrias Químicas Saint Germain Ltda cuenta con tanques de 2000L de capacidad, 2,5m de altura y 1m de diámetro, con un agitador tipo propela que posee un rango de agitación de 60rpm a 500 rpm, se propone realizar la producción en un equipo de estas características pues el fluido a manejar es newtoniano además que la complejidad del proceso no exige un equipo más elaborado.

Figura 22. Equipos disponibles en Industrias Químicas Saint Germain Ltda.



Debido a que el producto es el recubrimiento, se propone una producción hipotética de 500L de recubrimiento. Esta producción se establece debido a que operar a la máxima capacidad instalada resultaría excesivamente costoso y podría generar sobreproducción o producción innecesaria a causa de la competencia existente en el mercado, aplicada a fibras sintéticas. Además es importante dar prioridad a los principales procesos que Industrias Químicas Saint Germain desarrolla regularmente y que tienen un mercado y público establecido. Con esto en mente, la cantidad de materia prima requerida y su respectivo costo es el siguiente:

$$\begin{aligned} \text{Ácido graso} &= 500L * \frac{0,0005L}{0,1L} = 2.5L * 941 \frac{kg}{m^3} * \frac{1m^3}{1000L} = 2,3525kg * 9000 \frac{COP}{kg} \\ &= 27.000 COP \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Alcohol} &= 500L * \frac{0,0995L}{0,1L} = 497.5L * 791 \frac{kg}{m^3} * \frac{1m^3}{1000L} = 393.5225kg * 2540 \frac{COP}{kg} \\ &= 1'000.760 COP \end{aligned}$$

Tabla 14. Costos de producción de Ácido Graso 0.5%.

Materia prima	Cantidad (kg)	Precio (COP)
Ácido Graso	3	27.000
Alcohol	394	1.000.760

$$\begin{aligned} \text{Fluoroquímico A} &= 500L * \frac{0,0006L}{0,03L} = 10L * 2960 \frac{kg}{m^3} * \frac{1m^3}{1000L} \\ &= 29.6kg * 467000 \frac{COP}{kg} = 14'010.000 COP \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Fluoroquímico B} &= 500L * \frac{0,0006L}{0,03L} = 10L * 1700 \frac{kg}{m^3} * \frac{1m^3}{1000L} \\ &= 17kg * 435000 \frac{COP}{kg} = 7'395.000 COP \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Fluoroquímico C} &= 500L * \frac{0,0006L}{0,03L} = 10L * 2200 \frac{kg}{m^3} * \frac{1m^3}{1000L} \\ &= 22kg * 420000 \frac{COP}{kg} = 9'240.000 COP \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Alcohol} &= 500L * \frac{0,0294L}{0,03L} = 490L * 791 \frac{kg}{m^3} * \frac{1m^3}{1000L} = 387,59kg * 2540 \frac{COP}{kg} \\ &= 985.520 COP \end{aligned}$$

Tabla 15. Costos de producción Fluoroquímicos A, B y C 2%.

Materia prima	Cantidad (kg)	Precio (COP)
Fluoroquímico A	30	14.010.000
Fluoroquímico B	17	7.395.000
Fluoroquímico C	22	9.240.000
Alcohol	388	985.520

De los cuadros anteriores se puede ver claramente que el ácido graso es significativamente más barato e incluso la producción de recubrimiento con esta materia prima puede ser viable dentro de los procesos de la empresa. Por otra parte, la producción de recubrimiento con cualquiera de los tres fluoroquímicos no es recomendable debido a los altos costos de estas materias primas, además no se justifica el poder lograr ángulos de contacto más altos a través de los mismos.

7. CONCLUSIONES

- El análisis realizado al textil hidrofóbico no permite la identificación de la tecnología empleada en el mismo pero da lugar a la implementación de otro tipo de técnicas de caracterización con el fin de lograr el proceso de ingeniería inversa como lo son la microscopía electrónica de barrido, la microscopía electrónica de transmisión, el análisis termogravimétrico, la espectrometría de dispersión de rayos x, etc., que pueden ser objeto de estudio en futuras investigaciones.
- Las variables de concentración y tiempo de curado tienen un efecto directo en el valor del ángulo de contacto formado entre la superficie sólida y el líquido. En otras palabras, aumentar la concentración del recubrimiento aumenta el valor del ángulo de contacto. Esta afirmación es coherente ya que si se tiene mayor cantidad de compuesto hidrofóbico en el recubrimiento, el efecto repelente también es mayor. De igual forma ocurre con el efecto del tiempo de curado en donde se evidencia que a mayor tiempo de fijado, mayor es el ángulo de contacto reportado en las muestras. Estos resultados se pueden interpretar como el tiempo disponible que tiene el recubrimiento para fijarse a las fibras del textil a una determinada temperatura.
- En términos generales, el método de impregnación por inmersión es más sencillo que el método de impregnación a presión por Foulard; se realiza en menos tiempo pero la cantidad requerida de recubrimiento es mayor. Sin embargo, la técnica de Foulard presenta mayor resistencia a los ciclos de lavado; en otras palabras, el proceso de adsorción del recubrimiento es mejor por Foulard que en aquellas muestras realizadas por inmersión.
- El Fluoroquímico C es el compuesto que presenta los ángulos de contacto más altos de todas las muestras, para ambos métodos. Tales son los valores que estos se acercan a la superhidrofobicidad, característica que tiene como principal propiedad la autolimpieza. A pesar de la favorabilidad de estos resultados, sus principales desventajas radican en el costo como materia prima y en la nula resistencia al lavado convencional, independientemente del método de aplicación. Para efectos industriales no se recomienda debido a que no se justifica el elevado costo de producción de un recubrimiento que carece de durabilidad pese a alto efecto hidrofóbico que se obtuvo.
- A pesar del claro efecto hidrofóbico que otorga el Fluoroquímico B tampoco es recomendable para producción, siendo más costoso que el Fluoroquímico C. Sin embargo, presenta durabilidad ante el lavado convencional en sus preparaciones más concentradas hechas por Foulard. Desafortunadamente, al perder su efecto hidrofóbico en el proceso, no es viable preparar recubrimientos concentrados de este compuesto debido a que no se garantiza la permanencia del mismo después de los ciclos de lavado.

- Finalmente, El Fluoroquímico A y el Ácido Graso gozan de una serie de ventajas y desventajas que los hacen tanto viables como inviables a la vez: en el caso del Fluoroquímico A (específicamente aplicado por Foulard) su resistencia al lavado es la más alta de todos los compuesto analizados y es el que presenta ángulos de contacto muy cercanos a la hidrofobicidad (pero no alcanza a lograrla) después de los ciclos de lavado. Así como su desempeño es mejor, el costo de la materia prima también se eleva siendo esta la alternativa más costosa de todas. En el caso del Ácido Graso sucede totalmente al contrario que con el Fluoroquímico A; es la materia prima más asequible debido a su bajo costo, otorga valores de hidrofobicidad aceptables hasta el punto que puede ser comparado con el Fluoroquímico A y B tratados a los tres tiempos de curado en sus tres concentraciones para ambos métodos y con el Fluoroquímico C tratado a 5 minutos de curado en su concentración más baja por Foulard. Sin embargo, su mayor desventaja es su incapacidad para resistir ciclos de lavado, independientemente del método de aplicación de recubrimiento, del tiempo de curado y de la concentración del recubrimiento.
- Al proponer un mercado hipotético en donde la demanda de recubrimiento sea baja, la estimación de los costos de producción puede ser acertada debido a que se trata de un recubrimiento destinado a fibras de algodón las cuales, por a sus propiedades inherentes, dificultan la manipulación del material a nivel industrial gracias a su tendencia hidrofílica. La producción propuesta también es sugerida tomando en cuenta que, gracias al recubrimiento, las telas de algodón entrarían a competir directamente con aquellas que actualmente están posicionadas en el mercado, siendo estas últimas producidas a menor costo y en mayor volumen sin mencionar que el enfoque principal de la empresa es la producción de productos para la limpieza.
- En conclusión, se propone el empleo de Ácido Graso como recubrimiento hidrofóbico para textiles de algodón por su versatilidad, facilidad de manejo y adquisición, el bajo costo de producción potencial, sus bajos efectos nocivos para la salud y por la conservación de las propiedades inherentes del textil; no modifica la coloración, la textura ni el olor de la misma.

8. RECOMENDACIONES

- Dado que no se pudo obtener información relevante de las muestras de textil sometidas al análisis FTIR se sugiere realizar un proceso de extracción con solventes no polares con el fin de separar el recubrimiento del textil hidrofóbico y, de esta manera, poder aislarlo y analizarlo con mayor facilidad mediante la misma técnica infrarroja.
- En vista de que las formulaciones con Silicona no otorgaron hidrofobicidad a las muestras de textil, se recomienda extender el alcance de esta materia prima a la posibilidad de emulsionarlo en una fase oleica y someterlo a las mismas pruebas que se desarrollaron en este proyecto de grado; con el objetivo de determinar si es posible lograr hidrofobicidad con este compuesto y no descartarlo definitivamente.
- Debido a que en el presente proyecto de grado no se contempló la incidencia de la temperatura de curado en el ángulo de contacto, se recomienda realizar un diseño de experimentos más robusto en donde se contemplen las tres variables y tomar niveles de temperatura en los cuales se asegure que los recubrimientos no se degraden ni se descompongan en otros productos no deseados.
- El enfoque de este proyecto puede abrir las puertas a posteriores investigaciones en la misma área de interés, por lo que se recomienda aumentar el alcance de futuros proyectos hacia la evaluación de la hidrofobicidad sobre otras fibras textiles (paño, lino, lycra, drill, etc.) y determinar si el material también puede ser considerado como variable dentro de la obtención de propiedades hidrofóbicas en textiles.

BIBLIOGRAFÍA

3M. Fluorochemicals. [En línea]. Agosto de 2015. [Consultado el 1 de septiembre de 2017]. Disponible en: https://www.3m.com/3M/en_US/company-us/all-3m-products/~/All-3M-Products/Chemicals/Fluorochemicals/?N=5002385+8745514+8711017+8723740+3294857497&rt=r3

ADAMSON, Arthur and GAST, Alice. Physical chemistry of surfaces, 6 ed. New York: Wiley, 1997, p. 352-364.

ADHESIVES, GLUES AND SEALANTS. Surface energy and surface tension. [En línea]. Julio de 2014. [Consultado el 18 de abril de 2017]. Disponible en: <http://www.adhesiveandglue.com/surface-energy.html>

ALDRIDGE, Benjamin and BRAR Nivaz. Surface Tension. [En línea]. Noviembre de 2017. [Consultado el 18 de abril de 2017]. Disponible en: https://chem.libretexts.org/Core/Physical_and_Theoretical_Chemistry/Physical_Properties_of_Matter/States_of_Matter/Properties_of_Liquids/Surface_Tension.

ASHFORD, R. Ashford's Dictionary of industrial chemicals. Saltash: Wavelength Publications Ltd, 1994, p. 839.

ATKINS, Peter and DE PAULA, Julio. Elements of physical chemistry. 5 ed. Oxford: Oxford University Press, 2009, p. 450-465.

BAE, Geun Yeol, *et al.* Superhydrophobicity of cotton fabrics treated with silica nanoparticles and water-repellent agent. En: Journal of Colloid and Interface Science. 2009, vol. 337, no. 1, pp. 170-175, 2009.

BEN-NAIM, Arieh. Hydrophobic interactions. Plenum Press, 1979, p. 1-24.

BIRKNER, Nancy and WANG, Qian. How an FTIR Spectrometer Operates [En línea]. Febrero de 2015. [Consultado el 19 de abril de 2017]. Disponible en: https://chem.libretexts.org/Core/Physical_and_Theoretical_Chemistry/Spectroscopy/Vibrational_Spectroscopy/Infrared_Spectroscopy/How_an_FTIR_Spectrometer_Operates

BORISOVA, Anna and REIHMANE, Sakaidrite. Hydrophobic Treatment of Blended Fabric's Surface. En: Materials Science. 2013 vol. 19, no. 2, p. 3.

Daikin Industries, Ltd. Fluorocarbon. [En línea]. Marzo de 2014. [Consultado el 1 de septiembre de 2017]. Disponible en: <https://www.daikin.com/chm/products/fluorocarbon/index.html>

DOMENICO, Davide. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR): Broad peak from 2000 to 2300 - can anyone help? [En línea]. Mayo de 2013. [Consultado el 25 de agosto de 2017]. Disponible en: https://www.researchgate.net/post/Fourier_Transform_Infrared_Spectroscopy_FT-IR_Broad_peak_from_2000_to_2300-can_anyone_help

ERAL, H; 'T MANNETJE, D.J.C.M and OH, J. Contact angle hysteresis: a review of fundamentals and applications. Febrero 2013, vol. 291, no. 2, p. 247-260.

FERNANDEZ CAÑETE, Agustín. Estudio de la Hidrofobicidad y Autolimpieza en Materiales con Nanotratamientos Superficiales. Trabajo de Grado, Barcelona, Universitat Autònoma de Barcelona, 2013. p. 14.

Fluke Corporation. Incertidumbre de medida. [En línea]. Septiembre 2004. [Consultado el 15 de octubre de 2017]. Disponible en: <http://www.fluke.com/fluke/coes/support/biblioteca/Incertidumbre-de-medida.htm>

Food and Agriculture Organization of the United States (FAO). Additive-315. [En línea]. Enero de 2013. [Consultado el 29 de agosto de 2017]. Disponible en: <http://www.fao.org/ag/agn/jecfa-additives/specs/Monograph1/Additive-315.pdf>

GONZALEZ, Mónica. Transmitancia y absorbancia [En línea]. Noviembre de 2010. [Consultado el 19 de agosto de 2017] Disponible en: <http://quimica.laguia2000.com/conceptos-basicos/transmitancia-y-absorbancia>

HU, J Active coatings for smart textiles. Amsterdam: Elsevier/Woodhead Publishing, 2016, p.43-45.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICIACIÓN. Referencias bibliográficas. Contenido, forma y estructura. NTC 5613. Bogotá D.C.: ICONTEC, 2008. 33 p.

_____. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Bogotá D.C.: ICONTEC, 2008. 36 p.

_____. Referencias documentales para fuentes de información electrónicas. NTC 4490. Bogotá D.C.: ICONTEC, 2008. 23 p.

LIDE, D. CRC handbook of chemistry and physics. 86 ed. Boca Raton, FL: CRC Press & Taylor & Francis, 2006, p. 3-462.

LIU, Hui, *et al.* Recent Progress in Fabrication and Applications of Superhydrophobic Coating on Cellulose-Based Substrates. En: Materials MDPI. Febrero, 2016, vol. 9, no. 3, p. 124.

MITTAL, Kashmiri. Contact Angle, Wettability and Adhesion, Volumen 3. Hoboken: Taylor & Francis, 2003. 396 p.

MONTES RUIZ-CABELLO, Francisco. Efecto de la rugosidad y heterogeneidad superficial en fenómenos de mojado. Tesis Doctoral, Granada, Universidad de Granada, 2009. p. 28-31.

Nipun. Difference Between Absorbance and Transmittance [En línea]. Octubre de 2015. [Consultado el 19 de agosto de 2017]. Disponible en: <http://pediaa.com/difference-between-absorbance-and-transmittance/>

PARK, S; KIM, J and PARK, Chung H., Superhydrophobic Textiles: Review of Theoretical Definitions, Fabrication and Functional Evaluation. En: Journal of Engineered Fibers and Fabrics. 2015, vol. 10, no. 4, p. 6-14.

PETRUCCI, Ralph, *et al.* General chemistry: principles and modern applications. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall, 2007.

SALAGER, Jean-Louis. Cuaderno FIRP 747 Parte A, 2nd ed. Venezuela: Laboratorio FIRP, 1999, p. 4,5,6,8.

_____. Cuaderno FIRP 747 Parte B, 2nd ed. Venezuela: Laboratorio FIRP, 1999, p. 33,38.

_____. Cuaderno FIRP 747 Parte C, 2nd ed. Venezuela: Laboratorio FIRP, 1999, p. 6.

_____. Cuaderno FIRP 747 Parte D, 2nd ed. Venezuela: Laboratorio FIRP, 1999, p. 33

SCHINDLER, W. and HAUSER, P. Chemical finishing of textiles. Boca Raton, FL: Woodhead Publishing Limited & CRC Press, 2004, p. 76-82.

SIEBOLD, Alain, *et al.* Effect of dynamic contact angle on capillary rise phenomena. Enero 2000, vol. 161, no. 1, p. 81-87.

TEISALA, Hannu; TUOMINEN, Mikko and KUUSIPALO, Jurka. Superhydrophobic Coatings on Cellulose-Based Materials: Fabrication, Properties, and Applications. En: Advanced materials interfaces. 2013, vol. 1, p. 1-26.

TRIANA, Lizbeth. Espectroscopía de Infrarrojo/ATR [En línea]. Noviembre de 2013. [Consultado el 19 de Abril de 2017]. Disponible en: http://www.cciqs.uaemex.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=113&Itemid=86

YACUZZI, Enrique, *et al.* EL DISEÑO EXPERIMENTAL Y LOS MÉTODOS DE TAGUCHI: CONCEPTOS Y APLICACIONES EN LA INDUSTRIA FARMACÉUTICA. Abril, 2012, vol. 1, no.1, p 25.

YALKOWSKY, S.H. and BANERJEE, S. Aqueous Solubility. Methods of Estimation for Organic Compounds. New York, Marcel Dekker, 1992.

YAN, Y.; GAO, N. and BARTHOLOTT, W. Mimicking natural superhydrophobic surfaces and grasping the wetting process: A review on recent progress in preparing superhydrophobic surfaces. En: Advances in Colloid and Interface Science. Septiembre, 2011, vol. 169, no. 2, p. 80-105.

ZISMAN, William. Contact angle, wettability, and adhesion. Washington D.C.: American Chemical Society, 1964, p. 1-4.

ANEXO A INCERTIDUMBRE PRUEBAS DE HIDROFOBICIDAD

La incertidumbre es una estimación del posible error en una medida y es una estimación del rango de valores que contiene el valor verdadero de la cantidad medida. Asimismo, representa la probabilidad de que el valor verdadero esté dentro de un rango de valores indicado⁵⁰. La incertidumbre o error se define como:

$$E_x = 2\sigma_{\bar{x}} = 2 \sqrt{\frac{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$$

Donde E_x es error o incertidumbre, $\sigma_{\bar{x}}$ es la desviación cuadrática media, x_i corresponde al dato al cual se le quiere hallar la incertidumbre, \bar{x} es el promedio de las mediciones y n es el total de mediciones realizadas. La notación para realizar el reporte de los ángulos de contacto se ha establecido de la siguiente manera:

$$x_i = \bar{x} \pm E_x$$

A continuación se presentan los cálculos correspondientes a cada compuesto analizado a lo largo del presente proyecto de grado; teniendo en cuenta que **AG**=Ácido Graso, **S**=Silicona, **FA**=Fluoroquímico A, **FB**=Fluoroquímico B, **FC**=Fluoroquímico C, **O**=Muestra original, **R1** y **R2**=Réplicas de cada muestra. Los datos reportados se redondean al número entero más próximo con el fin de facilitar la lectura de los resultados.

Inmersión:

AG	O (°)	R1 (°)	R2 (°)	Promedio	Desv. Media	Error
1	84.6	88.3	84	85.6333333	1.344536269	2.68907254
2	97.4	97.3	92.3	95.6666667	1.68358084	3.36716168
3	98.8	95.8	96.3	96.9666667	0.927960727	1.85592145
4	97	92.3	93.4	94.2333333	1.419311257	2.83862251
5	124.7	119.6	122.3	122.2	1.473091986	2.94618397
6	125.6	120.2	122.7	122.8333333	1.560270632	3.12054126
7	118.5	116.7	120.4	118.5333333	1.068228024	2.13645605
8	125.5	126.6	128.6	126.9	0.907377173	1.81475435
9	126.9	129.6	127.1	127.8666667	0.868587615	1.73717523

⁵⁰ Fluke Corporation. Incertidumbre de medida. [En línea]. Septiembre 2004. [Consultado el 15 de octubre de 2017]. Disponible en: <http://www.fluke.com/fluke/coes/support/biblioteca/Incertidumbre-de-medida.htm>

FA	O (°)	R2 (°)	R3 (°)	Promedio	Desv. Media	Error
1	124.6	122.6	125.9	124.366667	0.959745337	1.91949067
2	128.3	128.5	133.4	130.066667	1.667666367	3.33533273
3	134.6	129.9	133.1	132.533333	1.386041526	2.77208305
4	128.5	126.4	129.9	128.266667	1.01707642	2.03415284
5	132.1	132.7	133.6	132.8	0.435889894	0.87177979
6	133.6	132.8	131.3	132.566667	0.674124947	1.34824989
7	137.4	131.9	136.2	135.166667	1.669663972	3.33932794
8	137.1	135	134.7	135.6	0.754983444	1.50996689
9	136.8	139.4	139	138.4	0.808290377	1.61658075

FB	O (°)	R2 (°)	R3 (°)	Promedio	Desv. Media	Error
1	136.8	137.2	138.4	137.466667	0.48074017	0.96148034
2	142.1	138.9	141.4	140.8	0.971253486	1.94250697
3	144.7	145.3	143	144.333333	0.688799277	1.37759855
4	143.5	141.6	140	141.7	1.011599394	2.02319879
5	145.2	142.8	145.2	144.4	0.8	1.6
6	145.4	144.5	145.8	145.233333	0.384418753	0.76883751
7	142.5	143.6	143.5	143.2	0.351188458	0.70237692
8	143.6	145.1	147.6	145.433333	1.166666667	2.33333333
9	146.8	147	148.5	147.433333	0.536449231	1.07289846

FC	O (°)	R2 (°)	R3 (°)	Promedio	Desv. Media	Error
1	146.8	148	146.6	147.133333	0.437162568	0.87432514
2	150.3	148.7	150.4	149.8	0.550757055	1.10151411
3	150.4	148.9	150	149.766667	0.448454135	0.89690827
4	149.1	150.2	150.7	150	0.472581563	0.94516313
5	151	152.3	152.5	151.933333	0.470224533	0.94044907
6	151.3	152.8	151.9	152	0.435889894	0.87177979
7	149.8	150.8	150.3	150.3	0.288675135	0.57735027
8	153.4	152.9	150.9	152.4	0.763762616	1.52752523
9	153.3	151.6	153.7	152.866667	0.643773597	1.28754719

Foulard:

AG	O (°)	R2 (°)	R3 (°)	Promedio	Desv. Media	Error
1	26.3	26.4	26.2	26.3	0.057735027	0.11547005
2	52.8	51	50	51.2666667	0.819213715	1.63842743
3	63.4	60.7	59.7	61.2666667	1.105038964	2.21007793
4	90.8	92.2	93.6	92.2	0.808290377	1.61658075
5	115.6	116.8	117.8	116.7333333	0.635959468	1.27191894
6	118.6	119.7	119.6	119.3	0.351188458	0.70237692
7	117.6	118.3	118.7	118.2	0.321455025	0.64291005
8	122.5	123	125.9	123.8	1.059874206	2.11974841
9	123.9	126.6	124.1	124.866667	0.868587615	1.73717523

FA	O (°)	R2 (°)	R3 (°)	Promedio	Desv. Media	Error
1	119.3	121	121.6	120.6333333	0.688799277	1.37759855
2	127.1	128.8	128.6	128.166667	0.536449231	1.07289846
3	127.7	129.9	131.9	129.8333333	1.212893693	2.42578739
4	126.7	126.1	123.5	125.4333333	0.982061324	1.96412265
5	130.7	128.3	127.3	128.766667	1.00884973	2.01769946
6	130.5	129.2	128.9	129.5333333	0.491030662	0.98206132
7	129.5	129.7	132	130.4	0.802080628	1.60416126
8	132.1	130.1	133.5	131.9	0.986576572	1.97315314
9	133.7	131	132.3	132.3333333	0.779601038	1.55920208

FB	O (°)	R2 (°)	R3 (°)	Promedio	Desv. Media	Error
1	131.7	129.2	127.5	129.466667	1.219744964	2.43948993
2	134.9	131.4	132.8	133.0333333	1.01707642	2.03415284
3	136.7	135.7	135.6	136	0.351188458	0.70237692
4	135.5	134.9	133.5	134.6333333	0.592546294	1.18509259
5	135.4	138.4	137.1	136.966667	0.868587615	1.73717523
6	138.5	138.9	137.7	138.366667	0.352766841	0.70553368
7	136.1	134.4	135.9	135.466667	0.536449231	1.07289846
8	134.7	137.9	137.5	136.7	1.006644591	2.01328918
9	138.3	140.4	138.5	139.066667	0.669161997	1.33832399

FC	O (°)	R2 (°)	R3 (°)	Promedio	Desv. Media	Error
1	139.9	137.4	135.6	137.633333	1.246773614	2.49354723
2	142.9	138.8	140.5	140.733333	1.189304185	2.37860837
3	139.9	141.7	142.8	141.466667	0.845248156	1.69049631
4	139.5	140.9	141.3	140.566667	0.545690185	1.09138037
5	143.3	140.8	143.8	142.633333	0.927960727	1.85592145
6	144.6	143.8	142.4	143.6	0.642910051	1.2858201
7	140.6	139.3	143	140.966667	1.08371788	2.16743576
8	141.8	142	143.8	142.533333	0.635959468	1.27191894
9	146.2	143	144.8	144.666667	0.926162933	1.85232587