

**EVALUACIÓN DEL PUNTO DE CONGELAMIENTO DE LAS MEZCLAS ENTRE JET
FUEL A-1 CON BIOCOMBUSTIBLES Y ADITIVOS**

**MARIA XIMENA BARREIRO RAMÍREZ
ERIKA ALEJANDRA OBANDO LOZADA**

**Proyecto integral de grado para optar al título de
Ingeniero Químico**

Director

**Manuel Alejandro Mayorga Betancourt
Ing. Químico, M.Sc., Ph.D (c)**

Codirector

**MY. Mauricio López Gómez
Ing. Químico, MBA**

Codirector

**David Leonardo Sotelo
Químico, M. Sc.**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ**

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nombre
Firma del Director

Nombre
Firma del presidente del jurado

Nombre
Firma del jurado

Nombre
Firma del jurado

Bogotá D.C, Febrero de 2021

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectoría Académica de Investigaciones

Dra. María Claudia Aponte González

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretaría General

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Decano de la Facultad de Ingenierías

Ing. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director del Programa de Ingeniería Química

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

DEDICATORIA

A nuestros padres por ser nuestro apoyo incondicional, pues son ellos quienes nos han brindado su luz y sabiduría para convertir cada una de nuestras metas en éxitos.

A nuestros hermanos, Natalia Barreiro, Erik Obando y Sandy Obando por motivarnos y aconsejarnos durante esta etapa de formación profesional.

A Ana Celia Robayo por ser mi ejemplo a seguir y anhelar con tanto amor ver a su primera nieta profesional.

A Daniela Cortés por acompañarnos desde el cielo y unirnos para culminar de la mejor manera esta etapa tan importante para nosotras.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco infinitamente a Dios por guiarme con tanto amor en el camino que él escogió para mí con personas maravillosas que han hecho de mí la Ingeniera Química que desde mis inicios quise ser.

Al equipo de investigación del proyecto por depositar su confianza en mi compañera y en mí, enseñándonos con tanta paciencia, criterio y pasión por la I.Q.

Gracias a mis padres, Humberto Barreiro y Martha Ramírez, por su apoyo incondicional y por enseñarme a nunca darme por vencida; también gracias por darme a mi hermanita, Natalia Barreiro, quien hoy es mi complemento y mi motivo para ser el ejemplo de hermana mayor que siempre he querido darle. Gracias por las palabras correctas, por la corrección fraterna y por los sabios consejos, a mi abuelita, Ana Celia Robayo. A mi pareja, Nicolás Medrano, gracias por caminar de mi mano, disfrutar de este proceso junto a mí y apoyarme siempre en cada decisión tomada.

A mi compañera, Erika Obando, por su apoyo, su paciencia en el transcurso de este proyecto y por su amistad que tanto valoro.

Gracias al Ministerio Musical Hesed por estar para mí y enseñarme que todo es mejor cuando oras dos veces por medio de la música.

Finalmente, quiero agradecer a todas las personas que fueron partícipes de mi crecimiento personal y profesional durante esta carrera, que, aunque no fue sencillo, quedó demostrado que la vida es más fácil vivirla si tienes con quién compartir, con quien apoyarte y con quien disfrutar esos pequeños momentos que hoy son esos recuerdos que llevaré conmigo por siempre, a todos ellos y de corazón, gracias.

María Ximena Barreiro Ramírez

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a Dios por iluminar mis conocimientos y por estar presente en cada paso que doy, llevándome a superar cada dificultad encontrada en el camino.

A los involucrados en este proyecto por aceptar nuestra colaboración en su equipo de trabajo, pero sobre todo por su paciencia, rigor, profesionalidad y consejos.

Agradecer a mi familia por su cariño, comprensión y respaldo en cada uno de los retos que me he propuesto, sin su apoyo no hubiese sido posible conseguir mis objetivos, pues son ellos quienes me fortalecen día a día.

A mi compañera Ximena, por su infinita paciencia, comprensión y confianza durante este último año.

Por último, quisiera agradecer a cada una de las personas que han compartido junto a mi durante este proceso de aprendizaje con sus altos y bajos, personas que no necesito mencionar porque tanto ellas como yo sabemos que desde lo más profundo de mi corazón les agradezco haberme brindado todo el apoyo, ánimo y sobre todo cariño y amistad.

Erika Alejandra Obando Lozada

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.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	13
INTRODUCCIÓN	14
OBJETIVOS	15
1. GENERALIDADES	16
1.1. Panorama general del biocombustible	16
1.2. Jet Fuel	18
1.2.1. Jet A1	18
1.3. Biodiésel	19
1.3.1. Palma Africana	19
1.3.2. Palmiste	19
1.3.3. Alcohol carburante	22
1.4. Aditivos	23
1.4.1. Aditivos combustibles	23
1.5 Norma ASTM	23
1.4.2. ASTM D-1655	24
1.4.3. ASTM D-2386	24
2. DISEÑO EXPERIMENTAL	25
2.1. Selección del diseño experimental	25
2.2. Desarrollo experimental	28
2.3. Imprevistos experimentales	32
2.3.1. Almacenamiento del biocombustible de palma	32
2.3.2. Formación de cristales de parafinas	33
2.4. Desarrollo del análisis de varianza	37

2.4.1. <i>Situación problema</i>	37
2.4.2. <i>Variable respuesta</i>	37
2.4.3. <i>Objetivo de experimentación</i>	37
2.4.4. <i>Distribución</i>	37
2.4.5. <i>Análisis del diseño de experimentos</i>	40
3. ANÁLISIS DE LAS MEZCLAS	41
3.1. Análisis de las mezclas con biocombustible de palma	42
3.2 Análisis de las mezclas con alcohol carburante	44
3.2. Análisis de las mezclas con biocombustible de palmiste	46
3.3. Análisis de las mezclas con el aditivo A2	49
3.4. Análisis de las mezclas con el aditivo A1	51
4. ANÁLISIS DE COSTOS	54
5. CONCLUSIONES	63
BIBLIOGRAFÍA	65
ANEXOS	71

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Evolución de las emisiones de CO2 por sector (1990 - 2016)	17
Figura 2. Principales países que producen y exportan aceite de palmiste mundialmente en el 2000 (miles de toneladas).	21
Figura 3. Árbol de decisión.	27
Figura 4. Evidencia de cristalización generada por reacción del alcohol con el aditivo A1.	34
Figura 5. Gráfica de columnas de los resultados del punto de congelamiento obtenidos en las mezclas.	41
Figura 6. Gráfica de columnas de los resultados del punto de congelamiento para el biodiesel de palma.	44
Figura 7. Gráfica de columnas de los resultados del punto de congelamiento para las mezclas con alcohol carburante.	46
Figura 8. Gráfica de columnas de los resultados del punto de congelamiento para las mezclas con biodiesel de palmiste.	49
Figura 9. Gráfica de columnas de los resultados del punto de congelamiento para las mezclas con presencia del aditivo A2.	51
Figura 10. Gráfica de columnas de los resultados del punto de congelamiento para las mezclas con presencia del aditivo A1.	53
Figura 11. Gráfica de columnas de los resultados del punto de congelamiento junto con los costos de las mejores opciones de las mezclas.	61
Figura 12. Gráfica comparativa del precio del Jet Fuel y la mejor opción de mezcla (mezcla 5).	62

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Especificaciones técnicas del Jet A1	18
Tabla 2. Composición de ácidos grasos (%).	20
Tabla 3. Plantas productoras de etanol en funcionamiento en Colombia.	22
Tabla 4. Datos del diseño de un factor y un bloque.	27
Tabla 5. Materiales utilizados en el laboratorio.	28
Tabla 6. Reactivos utilizados en el laboratorio.	28
Tabla 7. Instrumentos utilizados en el laboratorio.	29
Tabla 8. Densidad determinada de las sustancias en estudio.	31
Tabla 9. Cantidad en masa de las sustancias a implementar en las mezclas.	32
Tabla 10. Resultados obtenidos del punto de congelamiento de las mezclas	36
Tabla 11. Diseño de un factor y un bloque.	38
Tabla 12. Análisis de varianza de un factor y un bloque para el biocombustible de palma.	39
Tabla 13. Análisis de varianza de un factor y un bloque para el biocombustible de palmiste.	39
Tabla 14. Análisis de varianza de un factor y un bloque para el alcohol carburante.	39
Tabla 15. Resultados obtenidos del punto de congelamiento de las mezclas con biodiesel de palma durante la contingencia.	43
Tabla 16. Resultados obtenidos del punto de congelamiento de las mezclas de biodiesel de palma antes de la contingencia.	43
Tabla 17. Análisis del punto de congelamiento para el alcohol carburante.	45
Tabla 18. Resultados obtenidos del punto de congelamiento de las mezclas con biodiesel de palmiste durante la contingencia.	47
Tabla 19. Resultados obtenidos del punto de congelamiento de las mezclas con biodiesel de palmiste antes de la contingencia.	48
Tabla 20. Resultados del punto de congelamiento de las mezclas con aditivo A2.	50
Tabla 21. Resultados del punto de congelamiento de las mezclas con aditivo A1.	52
Tabla 22. Talento humano, investigadoras.	55
Tabla 23. Costo de los reactivos implementados en las mezclas.	55

Tabla 24. Costo de los materiales utilizados para el almacenamiento de las mezclas.	56
Tabla 25. Dotación requerida para el acceso a los laboratorios.	56
Tabla 26. Costos de transportes.	57
Tabla 27. Costos operacionales.	58
Tabla 28. Costo de cada una de las mezclas de 500 mL.	60

RESUMEN

El siguiente trabajo de investigación presenta una propuesta de combustible aeronáutico competitivo en precio y desempeño, hecho en Colombia, que cumpla con la norma ASTM D-1655, implementando una mezcla entre jet fuel, tres diferentes tipos de biocombustibles producidos en el país y dos clases de aditivos inhibidores de hielo, con base a un diseño de experimentos de un factor y un bloque que consta de cuatro diferentes concentraciones de los biocombustibles y una concentración máxima de anticongelante regida por la ASTM. De manera análoga, se efectuó la realización de unas mezclas sin asistencia del anticongelante bajo las mismas concentraciones de biocombustible y mezclas de biocombustible con alcohol carburante como anticongelante, todas realizadas con las 4 concentraciones estipuladas y sin presencia del aditivo.

PALABRAS CLAVE: Aditivo, alcohol, anticongelante, ASTM, biocombustible, combustible aeronáutico, jet fuel, palma, palmiste, punto de congelamiento.

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto cuenta con un acuerdo de confidencialidad frente a información específica de las sustancias en estudio.

La Fuerza Aérea Colombiana es una de las tres instituciones de las Fuerzas Militares de Colombia, encargada de ejercer y mantener el dominio del espacio aéreo colombiano para defender la soberanía, integridad territorial y el orden constitucional. Cuenta con funciones investigativas en colaboración con instituciones educativas, como la Universidad ECCI, creando alianzas estratégicas que contribuyen al análisis y solución de los problemas más relevantes de la FAC, especialmente en las áreas que requieran de capacidades científicas y/o tecnológicas, promoviendo el reconocimiento de la investigación como uno de los ejes fundamentales para el soporte y evolución de la Fuerza.

En la actualidad, la actividad aeronáutica es una de las bases más importantes para el desarrollo socioeconómico, debido a esto, tiene un alto impacto en el medio ambiente global, principalmente sobre la calidad del aire a causa de las emisiones contaminantes que genera el combustible. Por consiguiente, Colombia presentó el compromiso de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero con respecto a las emisiones proyectadas en los próximos diez años, con el objetivo de tomar medidas eficaces para enfrentar el cambio climático.

A partir de estos problemas globales, y en la actual etapa de posconflicto, la industria está explorando alternativas viables frente a biocombustibles de aviación que sean sostenibles. En consecuencia de esto, se busca realizar un estudio sobre biocombustibles de origen vegetal, donde sus propiedades mejoren el funcionamiento del instrumento de aviación implementando aditivos que amplíen su punto de congelamiento.

En el presente proyecto se llevará a cabo el estudio de la incorporación de un combustible alternativo de aviación como propuesta económicamente viable en el mercado, iniciando desde su formulación hasta el comportamiento de las mezclas, cumpliendo con el punto de congelamiento establecido en la norma ASTM D-1655.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar el punto de congelamiento de las mezclas entre Jet A-1, biocombustibles y aditivos según los estándares establecidos en la norma ASTM D-1655.

Objetivos específicos

- Determinar el punto de congelamiento mediante los métodos sugeridos por la norma ASTM D-2386 de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (American Society for Testing and Materials or ASTM International).
- Establecer el efecto de la concentración de los aditivos diseñados en la modificación del punto de congelamiento en mezclas Jet Fuel A-1 y biocombustibles.
- Realizar el análisis de costos del proyecto respecto a los resultados del desarrollo experimental.

1. GENERALIDADES

Durante los últimos años se ha incrementado la influencia de los factores relacionados al uso de los recursos de manera eficiente, disponiendo de materias primas que se puedan transformar en componentes de desarrollo para contribuir a la conservación del medioambiente, es por esto que las diferentes entidades industriales buscan la incorporación de biocombustibles como alternativa frente a la generación de gases contaminantes que permitan progresar en materia de reducción de costos y de manera alterna, en la conservación del medio ambiente.

La industria aeronáutica es una de las más grandes industrias a nivel nacional con alto nivel en innovación y desarrollo, pues con base a las problemáticas que se generan dentro de la misma, ha enfocado su transformación en oportunidades para evolucionar en materia de desarrollo sostenible, sin embargo, en el desarrollo de biocombustibles para el sector aeronáutico se han observado ciertas desventajas, dentro de las cuales se encuentra la deficiencia de su desempeño a bajas temperaturas, lo cual proporciona de igual manera mayor deficiencia de calidad, convirtiéndose en un limitante para propiciar el uso de este combustible alternativo para la aviación.

1.1. Panorama general del biocombustible

En los últimos años el desarrollo a nivel mundial de los mercados ha impulsado el uso de biocombustibles desde las decisiones de las políticas públicas, aumentando su producción y expandiendo su uso en algunos países más que otros, en donde prevalecen factores como la seguridad energética y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

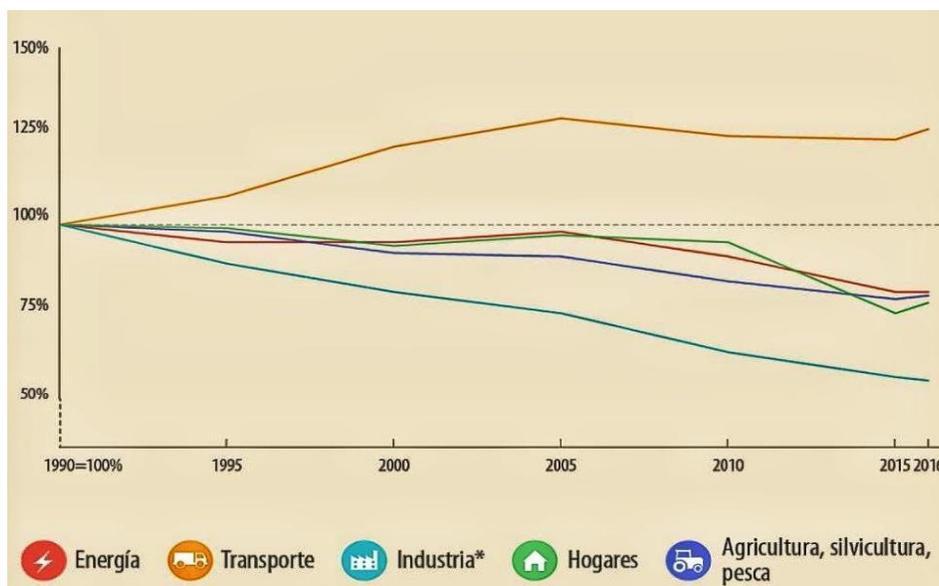
El dióxido de carbono (CO_2) es el principal precursor del efecto invernadero, dado que suele liberarse con mayor frecuencia a la atmósfera especialmente en la quema de carbono en la industria para la producción de energía, la cual es responsable del 80.7% de las emisiones de gases de efecto invernadero [1], sin embargo, dentro de este porcentaje se encuentra un tercio de emisiones causadas por el sector el transporte que genera la quema de petróleo y diésel. “La quema de 1 kg de Jet Fuel emite hasta 3.2 kg

de CO₂, los motores de gasolina emiten 2.3 kg de CO₂ por cada litro de gasolina quemado y los motores diésel 2.6 kg de CO₂ por cada litro de gasóleo” [2].

En la Figura 1, se evidencia que “el sector aéreo generó emisiones de CO₂ en el 2016 de 163 millones de toneladas, un 17% por encima de cifra registrada en el 2005” [3], por lo anterior se puede entender que la industria aeronáutica ha incrementado las emisiones de manera proporcional al aumento de la demanda aérea, en consecuencia a esto, las diferentes entidades que conforman el sector aéreo al inquietarse por estas cifras, dieron inicio a estudios de innovación con el fin de mitigar el riesgo ambiental.

Figura 1.

Evolución de las emisiones de CO₂ por sector (1990 - 2016)



Nota. Evolución de las emisiones de CO₂ por sector. Tomado de: Agencia Europea de Medio Ambiente (Parlamento Europeo): Disponible en: <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20190313STO31218/emisiones-de-co2-de-los-coches-hechos-y-cifras-infografia>

1.2. Jet Fuel

Es el término establecido globalmente para describir los tipos de combustible líquido de diversas especificaciones que se utilizan comúnmente en aviación. Estos combustibles están conformados por una mezcla compleja la cual consta principalmente de hidrocarburos [4].

1.2.1. Jet A1

El Jet A-1, también conocido como turbocombustible, turbosina o JP-1A, es un destilado medio proveniente de la destilación atmosférica del petróleo y tratado químicamente para eliminar compuestos azufrados. Está diseñado para utilizarse como combustible para aviones con turbinas tipo propulsión o jet. Este combustible se utiliza principalmente en motores de turbina implementados por el transporte aéreo.

En la tabla 1 se muestran las especificaciones técnicas donde el jet A-1 tiene una temperatura de inflamación superior a los 38°C y un punto de congelación de -47°C, demostrando así su buena capacidad de combustión y alto contenido energético [5].

Tabla 1.

Especificaciones técnicas del Jet A1

Propiedades	Unidades	Método ASTM	Valores
Punto de inflamación	°C	D56 ó D3828	38
Punto de congelamiento	°C	D2386, D4305, D5901 ó D5972	-47
Viscosidad a - 20°C	mm ² /s	D445	8.0 máx

Nota. Ficha de especificaciones técnicas Jet A-1. Tomado de: Refinadora costarricense de petróleo (RECOPE). Disponible en: <https://www.recope.go.cr/productos/calidad-y-seguridad-de-productos/jet-a-1/>

1.3. Biodiésel

Combustible elaborado a partir de aceites vegetales mediante un proceso sustentable. Es apto para su empleo como sustituyente parcial o total del gasoil en motores diésel, sin que resulten necesarias conversiones, ajustes o regulaciones especiales del motor [6].

1.3.1. Palma Africana

Es una planta del trópico húmedo, la cual en la actualidad es vista como la mejor opción para las tierras bajas de las regiones tropicales puesto que además ayuda a prevenir la erosión de los suelos. Es originaria del Golfo de Guinea (África occidental) y se extiende hasta 15° de latitud norte y sur. Su cultivo tarda entre 2 y 3 años para empezar a producir frutos y puede hacerlo durante más de 25 años. “Dentro de los cultivos de semillas oleaginosas es el que produce mayor cantidad de aceite por hectárea. Con un contenido del 50% en el fruto, puede rendir de 3000 a 5000 kg de aceite de pulpa por hectárea y 600 a 1000 kg de aceite de palmiste” [7].

La palma es una fuente vegetal con alto nivel de triglicéridos y con mayores ventajas competitivas para la producción de biodiesel a nivel nacional. En Colombia la producción de biodiesel se ha enfocado en el aceite extraído de la palma, dado que en el país se tiene un enorme potencial de siembra de esta y en la actualidad se obtiene aproximadamente el 87% de la producción nacional de aceites y grasas con base a la palma [8].

1.3.2. Palmiste

El fruto de la palma africana es utilizado para extraer el aceite de palma y palmiste, pues la capa externa y carnosa del fruto que produce el aceite de palma y el palmiste se encuentra dentro de un cuesco duro del fruto donde se extrae para producir el aceite de palmiste el cual tiene un índice de yodo máximo de 21. El aceite de palmiste se mantiene en un estado semisólido en climas templados y se puede separar en fracciones sólida y líquida, conocidas como estearina y oleína, respectivamente [9].

La extracción del aceite de palma de la fruta requiere una recolección y prensado cuidadosos de la fruta de la palma, mientras que, en el caso del aceite de palmiste, las semillas se maceran, se clarifican y posteriormente pasan por una etapa de recuperación de las almendras del palmiste resultante, de donde se extrae el aceite [9]. En la Tabla 2 se encuentra la composición de ácidos grasos del aceite de palmiste indicando la similitud que existe con el aceite de coco y las diferencias con el aceite de palma.

Tabla 2.

Composición de ácidos grasos (%).

Ácidos grasos	Aceite de Palmiste	Aceite de coco	Aceite de palma
C6	0.3	0.4	-
C8	4.2	7.3	-
C10	3.7	6.6	-
C12	48.7	47.8	0.2
C14	15.6	18.1	1.1
C16	7.5	8.9	44.1
C18	1.8	2.7	4.4
Otros	0.1	0.1	0.75

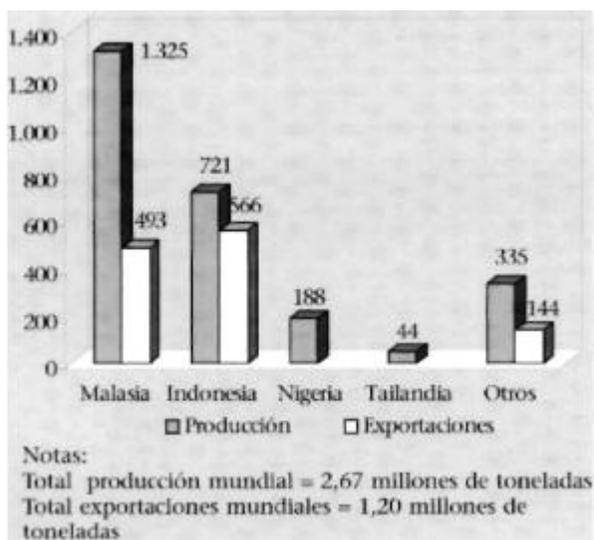
Nota. Tabla de ácidos grasos de los aceites de palmiste, coco y palma media. Tomado de: T.P. Pantzaris; Mohd Jaaffar Ahmad. Properties and Utilization of Palm Kernel Oil.

Los ácidos grasos que se presentan en el aceite de palmiste en mayor cantidad son el C12 (ácido láurico), representando aproximadamente el 48%, el C14 (ácido mirístico), aproximadamente el 16% y el C18 (ácido oleico), alrededor del 15% que representa aproximadamente el 48% [10].

“La palma de aceite sólo crece bien en climas tropicales y por lo tanto, todos los países productores de palmiste se encuentran en el Sureste Asiático, el África subsahariana y América del Sur” [11]. En la Figura 2 se encuentran las producciones y exportaciones de los cuatro principales países productores: Malasia, correspondiente de más del 50% de la producción mundial, Nigeria, Indonesia y otros.

Figura 2.

Principales países que producen y exportan aceite de palmiste mundialmente en el 2000 (miles de toneladas).



Nota. Principales países productores y exportadores. Tomado de: Oil World ISTA Mielke GmbH. Disponible en: <https://www.oilworld.biz/t/statistics/america>

1.3.3. Alcohol carburante

Compuesto inflamable incoloro, con olor característico de los alcoholes. Se produce a partir de maíz, papa, remolacha, yuca, sorgo o de la caña de azúcar, pues estos contienen carbohidratos que generan alcohol al fermentarse.

“El alcohol etílico o etanol usado como carburante tiene sus defensores y sus detractores. Para unos es muy importante por la reducción de la dependencia del petróleo y por su papel fundamental en la disminución de la contaminación ambiental, y para otros es inaceptable por el fomento a usar una fuente energética ineficiente, costosa y que genera más contaminación de la que evita” [12].

“El alcohol carburante producido en Colombia proviene exclusivamente del procesamiento de caña de azúcar del valle geográfico del río Cauca. Por las condiciones agroclimáticas ideales, esta región permite colecta y molienda de caña de azúcar durante todo el año” [12]. Actualmente Colombia dispone de 14 ingenios azucareros, ubicados en su mayoría en el valle del río Cauca y en el departamento de Risaralda. La Tabla 3 muestra las plantas productoras de azúcar y etanol que funcionan actualmente, adicionalmente enseña su capacidad diaria y el área plantada.

Tabla 3.

Plantas productoras de etanol en funcionamiento en Colombia.

N°	Región	Inversionista	Capacidad (L/día)	Producción de Azúcar cruda (Ton/año)	Área plantada (Ha)
1	Miranda, Cauca	Incauca	35000	97690	11942
2	Palmira, Valle	Ingenio Providencia	300000	65126	9287
3	Palmira, Valle	Manuelita	250000	81408	8721
4	Candelaria, Valle	Mayaguez	250000	48845	6587
5	La Virginia, Risaralda	Ingenio Risaralda	100000	32563	3004
6	Canto Claro, Puerto Lopez	GPC	25000	41000	1200
Total en producción			1275000	366632	40742

Nota. Tabla de plantas productoras de etanol. Tomado de: Federación Nacional de Biocombustibles (FEDEBIOCOMBUSTIBLES). 2019. Disponible en: <http://www.fedebiocombustibles.com/v2/nota-web-id-990.htm>

1.4. Aditivos

Los aditivos son sustancias que se agregan a otras sustancias en pequeñas cantidades para mejorar cualidades específicas que estas carecen; dichas sustancias se agregan para poder asignar una cualidad específica a un producto final [13].

1.4.1. Aditivos combustibles

Son sustancias activas solubles en petróleo que se añaden a los combustibles con la finalidad de alcanzar, optimizar o mejorar las propiedades naturales de un combustible y modificar los elementos fisicoquímicos que no poseían y que son necesarias para cumplir su objetivo.

A los productos que contienen petróleo se añaden los aditivos combustibles en pequeños porcentajes (0.08 - 0.3 %, en volumen) y a los lubricantes (15 - 20 %, en peso), estos mejoran una o varias de sus propiedades naturales o añaden nuevas características físicas, químicas o de aplicación [14].

1.5 Norma ASTM

ASTM International (American Society for Testing and Materials) es una de las organizaciones internacionales de desarrollo de normas a nivel mundial, donde se reúnen productores, usuarios y consumidores, entre otros, para crear normas de consenso voluntarias.

La ASTM International está fomentando el uso de una fuente de energía renovable alternativa con especificaciones nuevas y revisadas para el biodiésel, brindándole a la industria una herramienta valiosa que garantiza la calidad y el comportamiento del producto estableciendo parámetros claramente definidos por las mismas, haciendo uso de ellas en investigaciones y proyectos de desarrollo, sistemas de calidad, comprobación y aceptación de productos alrededor del mundo [15].

1.4.2. ASTM D-1655

Es la norma estándar de especificación para los combustibles implementados en las turbinas de aviación, dirigida a aplicaciones civiles y militares que define los requisitos mínimos de las propiedades del combustible de turbina de aviación, como lo es la temperatura más baja a la cual el combustible permanece libre de cristales sólidos de hidrocarburos. Ofrece los requisitos de los combustibles tipo Jet A y Jet A-1, siendo utilizada como una norma estándar para la calidad del combustible de turbinas de aviación [16].

1.4.3. ASTM D-2386

Describe el método de prueba para la determinación del punto de congelamiento del combustible para aviación con el cual se puede reportar la temperatura medible más baja alcanzada antes del punto de cristalización [17].

2. DISEÑO EXPERIMENTAL

Para llevar a cabo el desarrollo experimental se realizó un estudio previo en el cual se dispuso la selección de los biocombustibles producidos a nivel nacional con base a los productos agrícolas colombianos. Así mismo, se efectuó la elección de dos aditivos a esperas de la mejora del punto de congelamiento de las mezclas con Jet.

2.1. Selección del diseño experimental

El objetivo de este estudio consiste en encontrar la influencia del aditivo sobre las diferentes concentraciones del biocombustible de palma, palmiste y alcohol carburante, con el fin de alcanzar la temperatura de congelamiento que exige la norma ASTM D-1655 (-47°C). Para ello se realizó una planificación con base en un diseño de un factor y un bloque, el cual muestra la combinación entre los factores, dando como respuesta la aleatoriedad en 12 muestras por cada aditivo.

Este diseño experimental se seleccionó dado que es un diseño que no requiere de réplicas y se basa en una variable de respuesta dependiente de los factores de interés que, para este caso, son los tres diferentes biocombustibles utilizados en las mezclas. También, se establece la concentración de los aditivos como factor de bloqueo, este se incluye con el fin de detallar la influencia que tiene sobre el resultado. Y ya por último se tiene en cuenta el jet fuel como variable dependiente, aunque no se incluye en la tabla del ANOVA, dado que es un factor no controlable que depende de la concentración de los demás factores; el plan de ensayos consiste en la realización de mezclas específicas variando la concentración de biocombustible en 5%, 10%, 15% y 20% junto con el aditivo a una concentración de 0.15%, teniendo una alteración en la concentración del Jet Fuel A-1 que depende de las concentraciones antes mencionadas.

Las diferentes concentraciones de biocombustible fueron establecidas con base a los artículos titulados "*Biokerosene from coconut and palm kernel oils: Production and properties of their blends with fossil kerosene*" y "*Light biodiesel from macaúba and palm kernel: Properties of their blends with fossil kerosene in the perspective of an alternative aviation fuel*", los cuales sugieren un porcentaje v/v de mínimo 5% [18] y máximo 20%

[19], mostrando valores consistentes según norma al mezclarse con Jet A1. De igual manera, se tuvo en cuenta la variación del punto de congelamiento respecto a la concentración de combustible, pues con solo un 10% de este, cambia el punto de congelación de la mezcla desde -51 hasta -29°C [19].

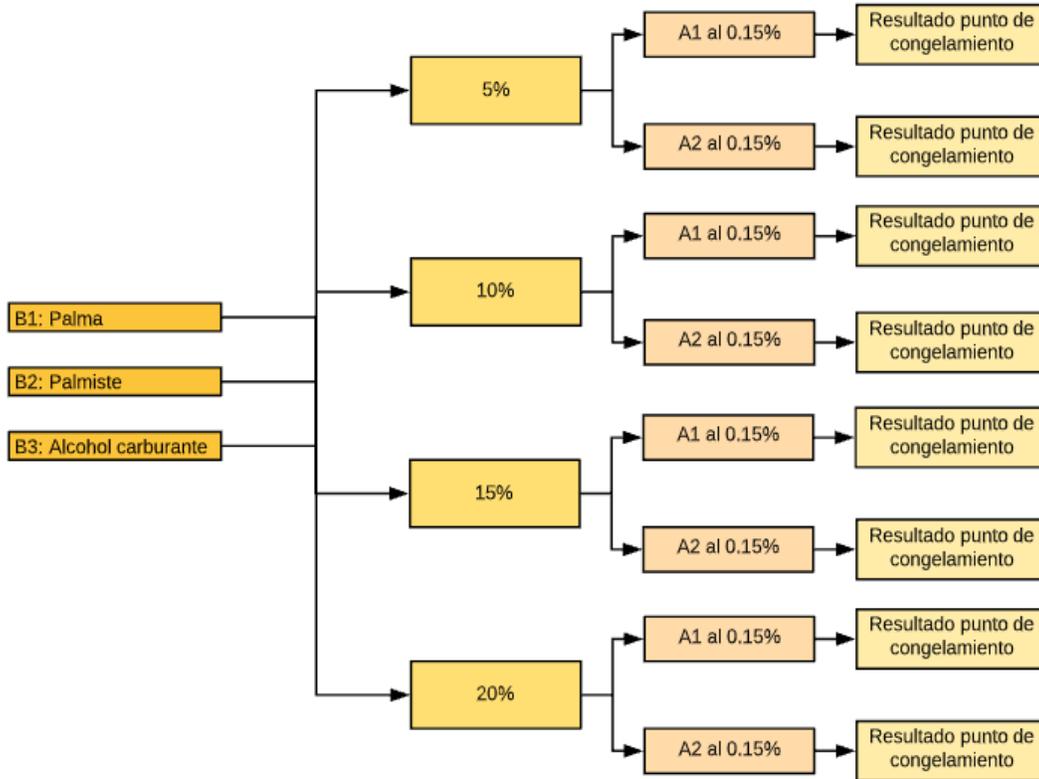
El aditivo anticongelante A2 auspiciado por la empresa Rendimax, es un anticongelante de última generación que cuenta con compuestos anticorrosivos y antiespumantes orgánicos que se encuentran libre de aminas, nitritos y fosfato. Por otra parte, se seleccionó el aditivo A1 de la empresa LSI Chemical, el cual está compuesto por di-EtilenoGlicol mono-Metil-Eter, el cual se encarga de absorber el agua presente en el combustible y así mismo, cuenta con aromáticos tanto ligeros como pesados encargados de brindar una alta capacidad de disolverse y evitar la formación de cristales por la afinidad con el Jet Fuel.

Para la selección de la concentración de aditivo a implementar en la mezcla de Jet Fuel A-1 y biocombustible, se tomó como base los requerimientos de la especificación ASTM D-4171 la cual menciona que se puede implementar como valor máximo un 0.15% en volumen de aditivo anticongelante.

La Figura 3 es una herramienta que permite visualizar la totalidad de las mezclas que se realizaron, donde posteriormente se selecciona la mezcla que más se adecúa a los resultados del punto de congelamiento exigido por la norma ASTM D-1655.

Figura 3.

Árbol de decisión.



Nota. Árbol de decisión del diseño de un factor y un bloque.

La Tabla 4 señala las cantidades en volumen (mL) que deben ser implementadas con base a los porcentajes seleccionados previamente en el diseño de experimentos.

Tabla 4.

Datos del diseño de un factor y un bloque.

MEZCLA JET FUEL, BIOFUEL, ADITIVOS					
JET A1 en (1) Muestra de 500 mL					
% JET FUEL	CANTIDAD DE JET FUEL			%	ADITIVO
JET - (%AD+%BIO)	B1	B2	B3	BIOCOMBUSTIBLE	
95%	474.25	474.25	474.25	5%	A1
90%	449.25	449.25	449.25	10%	
85%	424.25	424.25	424.25	15%	
80%	399.25	399.25	399.25	20%	
95%	474.25	474.25	474.25	5%	A2
90%	449.25	449.25	449.25	10%	
85%	424.25	424.25	424.25	15%	
80%	399.25	399.25	399.25	20%	

Nota: Diseño de experimentos de un factor y un bloque, en volumen (mL).

2.2. Desarrollo experimental

Se realizó la selección de los materiales, instrumentos y reactivos a utilizar en el laboratorio, los cuales están representados en las Tablas 5, 6 y 7.

Tabla 5.

Materiales utilizados en el laboratorio.

MATERIALES		
CANTIDAD	MATERIAL	CAPACIDAD
5	Embudos	-
10	Erlenmeyer	500 mL
2	Gotero	-
4	Picnómetro	10 mL
2	Pipeta graduada	0.5 mL
2	Pipeta graduada	1.5 mL
2	Pipeta graduada	5 mL
2	Pipeta graduada	10 mL
8	Succionador de pipeta	-
2	Probeta	25 mL
2	Probeta	50 mL
3	Probeta	500 mL
3	Probeta	100 mL

Nota. Materiales utilizados en el desarrollo experimental.

Tabla 6.

Reactivos utilizados en el laboratorio.

REACTIVOS	
REACTIVO	CANTIDAD
Biocombustible de palma	1 Gal
Biocombustible de	1 Gal
Alcohol carburante	1 Gal
Aditivo A1	12 mL
Aditivo A2	12 mL
Jet Fuel A-1	18 Gal
Agua destilada	1 L
Jabón para implementos	-
Acetona	500 mL

Nota: Reactivos utilizados en el desarrollo experimental.

Tabla 7.

Instrumentos utilizados en el laboratorio.

INSTRUMENTOS	
EQUIPOS	CANTIDAD
Agitador magnético	2
Balanza analítica	1

Nota. Instrumentos utilizados en el desarrollo experimental.

Inicialmente se utilizó un picnómetro con capacidad de 10 mL para medir la densidad de cada líquido involucrado en el desarrollo de las mezclas. Este procedimiento requiere de tres medidas las cuales deben determinarse en una balanza analítica y con la tapa del picnómetro:

- Pesar el picnómetro vacío (m_p) y tomar registro de la masa.
 - a. Enrasar con agua (llenar completamente evitando burbujas en su interior) y registrar su masa (m_{p+H_2O}). Al taponarlo, el nivel de agua deberá subir por el capilar y rebosar, haciendo que el capilar también esté lleno de agua. Una vez el agua se haya rebosado, se procede a secar el picnómetro por fuera antes de pesarlo.
 - b. Enrasar el picnómetro con el líquido cuya densidad se desea hallar, y anotar su masa (m_{s+d}). Al taponarlo, el nivel de la sustancia deberá subir por el capilar y rebosar, haciendo que el capilar también se llene con la sustancia. Una vez que esta se haya rebosado, se procede a secar el picnómetro por fuera antes de pesarlo.

La densidad de una sustancia se define como la cantidad de masa que posee por unidad de volumen:

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_p}$$

Ecuación 1. Densidad de una sustancia determinada con el picnómetro.

El valor de la masa de la disolución se halla restando el valor del picnómetro lleno de sustancia y el valor de la masa del picnómetro vacío dando como resultado la siguiente ecuación:

$$\rho_s = \frac{m_{p+s} - m_p}{V_p}$$

Ecuación 2. Densidad de una sustancia reemplazando el término de la masa.

En el momento en el que el picnómetro se encuentra con el fluido de referencia (agua) se cumple que:

$$\rho_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{V_{H_2O}} = \frac{m_{H_2O}}{V_p}$$

Ecuación 3. Densidad del agua con relación al volumen del picnómetro.

En donde se asume que el volumen del picnómetro (V_p) es igual al volumen del agua (V_{H_2O}) dado que el picnómetro está enrasado con agua y el volumen que está ocupando es el del picnómetro.

A partir de la expresión mostrada anteriormente se puede despejar V_p dando como resultado:

$$V_p = \frac{m_{H_2O}}{\rho_{H_2O}} = \frac{m_{p+H_2O} - m_p}{\rho_{H_2O}}$$

Ecuación 4. Despeje del volumen del picnómetro.

Finalmente se sustituye la expresión del volumen del picnómetro en la ecuación de ρ_s dando como resultado la ecuación que permite calcular la densidad de la disolución:

$$\rho_s = \frac{m_{p+s} - m_p}{m_{p+H_2O} - m_p} * \rho_{H_2O}$$

Ecuación 5. Sustitución de la ecuación 4 en la ecuación 2.

La ecuación obtenida permite determinar la densidad de la disolución al sustituir los valores de masa determinados inicialmente (m_p , m_{p+H_2O} y m_{p+s}).

Tabla 8.

Densidad determinada de las sustancias en estudio.

$d=(m \text{ sust}/m_{\text{agua}})*d_{\text{agua}}$	M VACÍO (g)	M AGUA (g)	M SUST (g)	DENSIDAD (g/mL)
A1	11.98	22.26	21.32	0.91
A2	15.88	25.70	24.91	0.92
B1	15.87	25.62	24.51	0.89
B2	14.70	24.83	23.56	0.88
B3	10.51	20.88	18.75	0.80
JET	15.88	25.71	23.80	0.81

Nota. Densidad de cada sustancia.

Con base a la densidad determinada se obtiene la masa de la disolución, despejando m_s :

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$$

Ecuación 6. Densidad de una sustancia.

$$m_s = \rho_s * V_s$$

Ecuación 7. Masa de la disolución.

Esto con el fin de realizar una conversión del porcentaje volumen a peso para obtener mayor precisión en los resultados, es decir, con base a los resultados teóricos determinados por fórmula, hacer una comparación de los datos prácticos documentados de las sustancias agregadas a la mezcla, los cuales son obtenidos por medio de la medición en peso con una balanza analítica, alcanzando un porcentaje de error de mayor exactitud.

Una vez obtenidos los valores máxicos por componente mostrados en la Tabla 9, se procedió a formular cada una de las mezclas siguiendo los principios de aditivación, los cuales sugieren la adición de cada uno de estos, desde el componente de menor concentración hasta el de mayor concentración, generando así una mezcla homogénea.

Tabla 9.

Cantidad en masa de las sustancias a implementar en las mezclas.

CANTIDADES EN VOLUMEN DE LAS SUSTANCIAS		
COMPUESTO	CONCENTRACIÓN	CANTIDAD (g)
B1	5%	22.2
	10%	44.3
	15%	66.5
	20%	88.6
B2	5%	21.9
	10%	43.8
	15%	65.6
	20%	87.5
B3	5%	19.9
	10%	39.8
	15%	59.6
	20%	79.5
JETFUEL	95%	382.0
	90%	361.9
	85%	341.7
	80%	321.6
A1	0.15%	0.7
A2	0.15%	0.7

Nota. Cantidad en masa (g) de las sustancias.

2.3. Imprevistos experimentales

2.3.1. Almacenamiento del biocombustible de palma

En el caso del biocombustible de palma se realizó un tratamiento previo a ser implementado en el desarrollo experimental dado que este fue almacenado en la planta de Bio D durante más de 9 meses por temas de contingencia a causa del COVID-19.

Debido a esto, el biocombustible de palma generó una separación de sus fases las cuales, bajo las condiciones de almacenamiento, formaron dos fracciones en diferente estado, esto se debe al estado semisólido en el que permanece el aceite de palma en temperaturas entre 10 y 18°C, pues este tiende a separar sus fases en fracciones conocidas como estearina causante de la fase sólida y oleína presente en la fase líquida.

El tratamiento previo para homogenizar las fases del biodiesel de palma consistió en llevar el compuesto a 20°C mientras se realizaba la debida agitación, evitando el ingreso de aire, a 125 rpm durante 20 minutos.

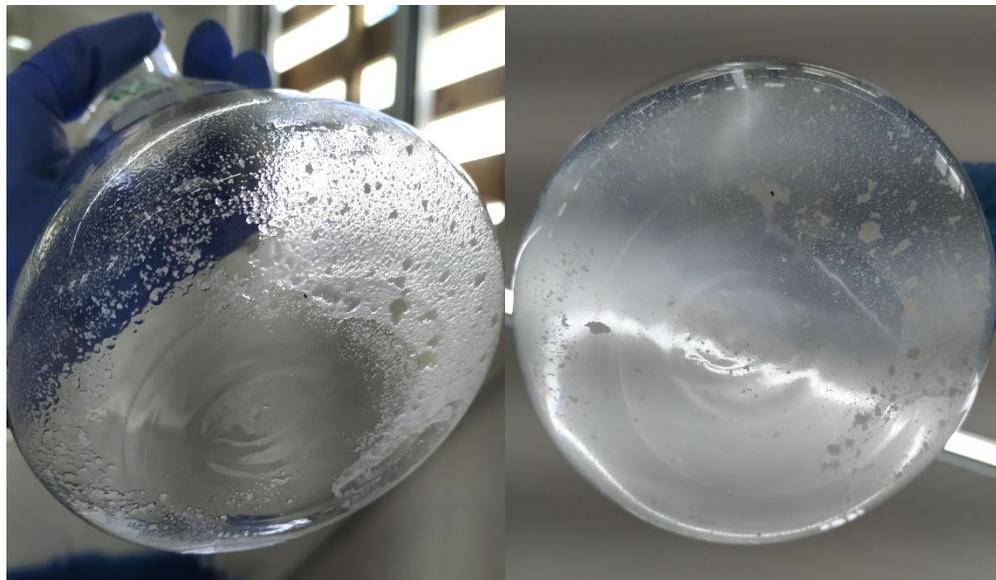
Posterior al tratamiento del biodiesel de palma y a la obtención de los valores máxicos a implementar en las mezclas, se pesaron los erlenmeyer vacíos correspondientes a cada componente con ayuda de una balanza analítica, Traveler Ohaus - TA501. Seguido a esto, se retiraron los recipientes de la balanza para adicionar el aditivo, biocombustible y jet fuel respectivamente basándonos en las concentraciones dadas por el diseño de experimentos para así volver a pesar cada recipiente y efectuar su respectiva lectura. Luego de esto, se adiciona cada uno de ellos en el recipiente de la mezcla y se determinó el valor entre la lectura pesada y la tara, dando como resultado el peso de cada variable. Una vez obtenida la mezcla se procedió a realizar agitación magnética por medio de un agitador Fisher Scientific 00781 a 125 rpm durante 20 minutos.

2.3.2. Formación de cristales de parafinas

Al poner en contacto el alcohol carburante al 15 y 20% junto con el aditivo A1 se evidenció la formación de cristales como se puede observar en la Figura 4, por lo cual fue necesario agitar la mezcla durante 30 minutos, es decir, 10 minutos por encima del tiempo en el que se mantuvieron las demás mezclas.

Figura 4.

Evidencia de cristalización generada por reacción del alcohol con el aditivo A1.



Nota: Cristalización de la mezcla de alcohol carburante al 15% y 20%, aditivo 1 y jet fuel.

Se estima que la presente formación de cristales de parafinas se dio por la existencia de puentes de hidrógeno entre las moléculas de agua presentes en el alcohol carburante debido a la humedad absorbida por las condiciones ambientales de almacenamiento dentro del laboratorio de la Universidad ECCI y la presencia de otra especie molecular, en este caso, el aditivo A1.

El módulo de enseñanza de fenómenos interfaciales especifica que el agua actúa como la estructura receptora u hospedadora constituida por espacios regulares tipo “jaulas” que entrapan a las moléculas huéspedes o formadoras. Este tipo de estructuración molecular es denominada clatrato [20], en cuyo caso la conjunción del aditivo A1 y alcohol carburante con las impurezas aportadas por la humedad presente en el laboratorio, promueve a la generación de hidratos en forma cristal. La estructura del hidrato y la estructura del agua sólida es muy semejante, pues la apariencia de ambas especies es similar a la del hielo. El hidrato es estabilizado por una atracción tipo Van der Waals entre las moléculas del huésped y el agua [21].

Una vez terminado el proceso de mezcla con aditivos, se realizó el mismo procedimiento con las mezclas al 5%, 10%, 15% y 20%, las cuales contienen 50% biocombustible y 50% alcohol carburante dentro de estos porcentajes, tomando el jet fuel como solvente. También se realizaron mezclas en los mismos porcentajes, pero con la discrepancia del manejo únicamente del jet fuel y biocombustible, es decir, sin aditivo.

Las 40 muestras se enviaron a los laboratorios de Terpel, sede Mansilla, en donde se determinó el punto de congelación para cada una de ellas siguiendo los estándares establecidos por la norma ASTM D-2386, los resultados se pueden apreciar en la Tabla 10. Este método de prueba determina la temperatura por debajo de la cual se pueden formar cristales de hidrocarburos sólidos en los combustibles de aviación. “Si no se puede medir el punto de cristalización o el punto de congelación, esta prueba se puede utilizar para determinar la temperatura más baja que se puede medir antes del punto de cristalización” [22].

Tabla 10.

Resultados obtenidos del punto de congelamiento de las mezclas

TABLA DE RESULTADOS DE LAS MEZCLAS							
Nº muestra	B1 []	B2 []	B3 []	JET []	Ax []	Ax	Punto Cong
1	5			94.85	0.15	A1	-19
2	10			89.85	0.15	A1	-10.5
3	15			84.85	0.15	A1	6.5
4	20			79.85	0.15	A1	9.5
5		5		94.85	0.15	A1	-42
6		10		89.85	0.15	A1	-34
7		15		84.85	0.15	A1	-21
8		20		79.85	0.15	A1	-17.5
9			5	94.85	0.15	A1	-24.5
10			10	89.85	0.15	A1	-18.5
11			15	84.85	0.15	A1	-17.5
12			20	79.85	0.15	A1	-15
13	5			94.85	0.15	A2	-15.5
14	10			89.85	0.15	A2	-8
15	15			84.85	0.15	A2	-1.5
16	20			79.85	0.15	A2	2
17		5		94.85	0.15	A2	-34.5
18		10		89.85	0.15	A2	-31.5
19		15		84.85	0.15	A2	-17
20		20		79.85	0.15	A2	-30.5
21	-	-	5	94.85	0.15	A2	-15
22	-	-	10	89.85	0.15	A2	-20
23	-	-	15	84.85	0.15	A2	-13.5
24	-	-	20	79.85	0.15	A2	-11.5
25	2.5	-	2.5	95	-	-	-25
26	10	-	10	80	-	-	-12
27	-	2.5	2.5	95	-	-	-35.5
28	-	10	10	80	-	-	-31.5
29	5	-	-	95	-	-	-20.5
30	10	-	-	90	-	-	-13
31	15	-	-	85	-	-	-10
32	20	-	-	80	-	-	-5.5
33	-	5	-	95	-	-	-41
34	-	10	-	90	-	-	-33
35	-	15	-	85	-	-	-27
36	-	20	-	80	-	-	-24
37	-	-	5	95	-	-	-22.5
38	-	-	10	90	-	-	-15.5
39	-	-	15	85	-	-	-14
40	-	-	20	80	-	-	-11.5

Punto de congelamiento cercano al punto establecido por la norma
Puntos de congelamientos bajos
Resultado menos favorable para el caso de estudio
Puntos superiores al 0°C

Nota. Punto de congelamiento determinado según la norma ASTM D - 2386-18.

2.4. Desarrollo del análisis de varianza

En el análisis de varianza (ANOVA) es necesario describir cada uno de los factores involucrados en el desarrollo experimental. Se toma como factor de interés la **concentración** de biocombustible, siendo una variable central con la cual se debe plantear la hipótesis nula y alternativa. Por otra parte, se establece la **concentración** de los aditivos como factor de bloqueo debido a que este factor controlable puede generar variabilidad en los resultados, sin embargo, este no es el eje central del caso de estudio, pues se incluye con el fin de detallar la influencia que tiene sobre el resultado. Por último, se tiene en cuenta el jet fuel como variable dependiente, aunque no se incluye en la tabla del ANOVA, dado que es un factor no controlable que depende de la concentración de los demás factores.

2.4.1. Situación problema

Formular un combustible alternativo para aviación que cumpla con el punto de congelación requerido por la norma ASTM D-1655.

2.4.2. Variable respuesta

Punto de congelamiento.

2.4.3. Objetivo de experimentación

Determinar la muestra con mejor punto de congelamiento.

2.4.4. Distribución

F.

Se plantea una hipótesis nula y alternativa sobre el factor de respuesta:

- H_0 : Todos los biocombustibles generan el mismo punto de congelamiento.
- H_A : Los resultados en los niveles de los biocombustibles son diferentes entre sí.

El diseño de experimentos de un factor y un bloque está compuesto por tres diseños de experimentos, es decir, el diseño macro contiene los 3 diseños micro que corresponden a las tres diferentes **clases** de biocombustibles. Esto con el fin de ver el efecto que tiene cada aditivo en las mezclas y así poder llevar a cabo el cumplimiento del segundo objetivo específico del presente proyecto, por consiguiente, los tres diseños tienen la misma hipótesis nula.

A continuación, se presentan las tablas de los resultados de interés acotados en el diseño de experimentos de un factor y un bloque descrito en la Tabla 11.

Tabla 11.

Diseño de un factor y un bloque.

TABLAS DE RESULTADOS				
BIOCOMBUSTIBLE		ADITIVO		
	[]	A1	A2	SIN
B1	5	0.5	-15.5	-20.5
	10	3.5	-8.0	-13.0
	15	6.5	-1.5	-10.0
	20	9.5	2.0	-5.5
B2	5	-42.0	-34.5	-41.0
	10	-34.0	-31.5	-33.0
	15	-21.0	-17.0	-27.0
	20	-17.5	-30.5	-24.0
B3	5	-24.5	-15.0	-22.5
	10	-18.5	-20.0	-15.5
	15	-17.5	-13.5	-14.0
	20	-15.0	-11.5	-11.5

Nota. Tabla de resultados del diseño de experimentos de un factor y un bloque.

El valor a tener en cuenta para aceptar o rechazar la hipótesis planteada es el valor de F del biocombustible, resaltado en la columna 5, de las tablas 12, 13 y 14, el cual indica si hay diferencias significativamente estadísticas entre los niveles de biocombustible al compararlo con el valor crítico, es decir, el mismo valor de tabla de la distribución F, resaltado en la columna 7 de las mismas tablas, basado en los grados de libertad totales.

Tabla 12.

Análisis de varianza de un factor y un bloque para el biocombustible de palma.

ANÁLISIS DE VARIANZA (B2)						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Biocombustible	588.4167	3	196.1389	7.7829	0.0172	4.7571
Aditivo	20.2917	2	10.1458	0.4026	0.6854	5.1433
Error	151.2083	6	25.2014			
Total	759.9167	11				

Nota. Tabla del ANOVA para el biocombustible de palma. Cálculo del análisis de varianza con un factor y un bloque. Herramientas de análisis de datos, Excel 2019.

Tabla 13.

Análisis de varianza de un factor y un bloque para el biocombustible de palmiste.

ANÁLISIS DE VARIANZA (B1)						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Biocombustible	317.1667	3	105.7222	25.0395	0.0009	4.7571
Aditivo	607.1667	2	303.5833	71.9013	0.0001	5.1433
Error	25.3333	6	4.2222			
Total	949.6667	11				

Nota. Tabla del ANOVA para el biocombustible de palmiste. Cálculo del análisis de varianza con un factor y un bloque. Herramientas de análisis de datos, Excel 2019.

Tabla 14.

Análisis de varianza de un factor y un bloque para el alcohol carburante.

ANÁLISIS DE VARIANZA (B3)						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Biocombustible	109.5833	3	36.5278	4.8390	0.0483	4.7571
Aditivo	33.0417	2	16.5208	2.1886	0.1933	5.1433
Error	45.2917	6	7.5486			
Total	187.9167	11				

Nota. Tabla del ANOVA para el alcohol carburante. Cálculo del análisis de varianza con un factor y un bloque. Herramientas de análisis de datos, Excel 2019.

2.4.5. Análisis del diseño de experimentos

En la variable de interés, es decir los tres biocombustibles, se encuentran divergencias entre las combinaciones con y sin la presencia de aditivos, mostrando que hay diferencias significativamente estadísticas entre los 4 niveles de biocombustible (5%, 10%, 15%, 20%), por lo cual se puede concluir que al ser mayor el valor de F en comparación al valor crítico, señalados en las tablas 12, 13 y 14, se rechaza la hipótesis nula para nuestros tres diseños de experimentos.

Con base a la hipótesis nula y alternativa sobre el factor de respuesta se deduce que:

- H_0 : Todos los biocombustibles **NO** generan el mismo punto de congelamiento.
- H_A : Los resultados en los niveles de los biocombustibles son **diferentes** entre sí.

3. ANÁLISIS DE LAS MEZCLAS

Por definición se conoce que los aditivos anti-hielo absorben el agua presente en la solución, disminuyendo la temperatura de congelamiento con el fin de evitar la formación de cristales sólidos a temperaturas de vuelo. Por este motivo, en este capítulo se estudia el efecto de la concentración de los aditivos implementados en las mezclas para disminuir el punto de congelamiento.

La Figura 5 logra dejar en evidencia el comportamiento de cada una de las mezclas a bajas temperaturas, mostrando que el biocombustible de palmiste es el más apto para ser implementado en condiciones extremas.

Figura 5.

Gráfica de columnas de los resultados del punto de congelamiento obtenidos en las mezclas.



Nota. Resultados del punto de congelamiento de las mezclas.

Al tener biocombustibles que no cumplen con el punto de congelamiento exigido en la norma ASTM D-1655, se puede presentar cristalización de algunos ésteres constituyentes, lo que quiere decir que a medida que la temperatura ambiente disminuye, las moléculas con ésteres de ácidos grasos saturados en el biodiesel pueden dar inicio a la formación de cristales [23], por lo cual el uso de aditivos anticongelantes es fundamental para mejorar el comportamiento del combustible aeronáutico mezclado con biocombustibles a bajas temperaturas.

3.1. Análisis de las mezclas con biocombustible de palma

La Tabla 15 muestra los resultados del punto de congelamiento evaluado para las mezclas con biocombustible de palma, la cual indica el peor escenario en la muestra 4, seguido de las muestras 3 y 16 con un desempeño deficiente a bajas temperaturas con la presencia del aditivo A1. Adicional a esto, un bajo desempeño en la muestra 16 por la presencia del aditivo A2; el punto de congelamiento se vio altamente afectado por las condiciones de almacenamiento previas al momento de la experimentación, pues dada las restricciones por la contingencia de ese momento, el biocombustible de palma tuvo que ser almacenado durante un tiempo de 9 meses, generando separación entre sus fases y disminuyendo el punto de congelamiento en los resultados de las muestras.

Es importante destacar las muestras 29 y 31, las cuales se pueden comparar con los resultados del punto de congelamiento de la mezcla del biocombustible de palma evaluada antes de la contingencia con Terpel (Tabla 16) en donde se logra observar el incremento de error al aumentar la concentración de biodiésel de palma de 0.5°C al 5%, 6°C al 15%, es decir, hay una variabilidad en los resultados a pesar de manejar la misma concentración.

Tabla 15.

Resultados obtenidos del punto de congelamiento de las mezclas con biodiesel de palma durante la contingencia.

TABLA DE RESULTADOS DE LAS MEZCLAS DE BIODIESEL DE PALMA								
Nº muestra	Nº muestra	B1 []	B2 []	B3 []	JET []	Ax []	Ax	Punto Cong
1	41	5			94.85	0.15	A1	-19
2	42	10			89.85	0.15	A1	-10.5
3	43	15			84.85	0.15	A1	6.5
4	44	20			79.85	0.15	A1	9.5
13	53	5			94.85	0.15	A2	-15.5
14	54	10			89.85	0.15	A2	-8
15	55	15			84.85	0.15	A2	-1.5
16	56	20			79.85	0.15	A2	2
25	65	2.5	-	2.5	95	-	-	-25
26	66	10	-	10	80	-	-	-12
29	69	5	-	-	95	-	-	-20.5
30	70	10	-	-	90	-	-	-13
31	71	15	-	-	85	-	-	-10
32	72	20	-	-	80	-	-	-5.5

Puntos de congelamientos bajos
Resultado menos favorable para el caso de estudio
Puntos superiores al 0°C

Nota. Resultados de análisis del punto de congelamiento para biodiesel de palma según estándares de la norma ASTM D - 2386 - 18. Tomado de: Reporte de resultados mejorador de punto de congelamiento, Terpel, 04 de noviembre de 2020.

Tabla 16.

Resultados obtenidos del punto de congelamiento de las mezclas de biodiesel de palma antes de la contingencia.

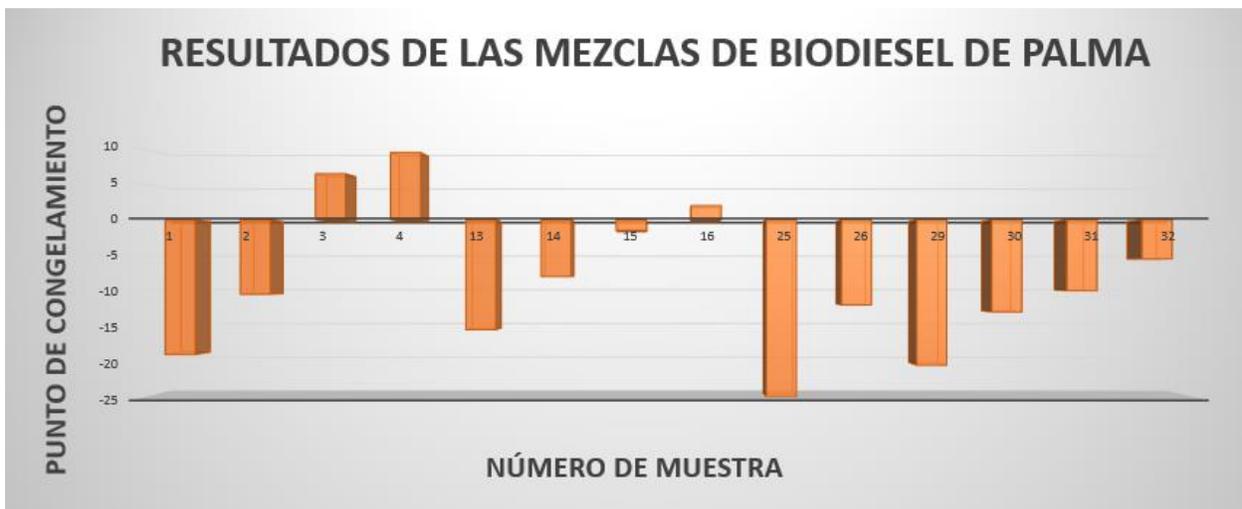
MEZCLAS JET FUEL A1- BIODIESEL DE PALMA REALIZADAS ANTES DE LA CONTINGENCIA				
PRUEBA	5%	15%	25%	100%
APARIENCIA	CLARO Y BRILLANTE	CLARO Y BRILLANTE	CLARO Y BRILLANTE	
API	41.4	40.1	39.0	36.7
CORROSION A LA LAMINA DE	1A	1A	1A	
DENSIDAD	817.5	823.8	829.1	841.1
PUNTO DE CONGELAMIENTO	-20.0	-16.0	-10.0	
HUMEDAD	92.0	123.0	126.0	102.0
CONTAMINACIÓN TOTAL	<6	<6	<6	
VISCOSIDAD CINEMÁTICA	1.5	1.7	1.9	4.5

Nota. Resultados de análisis del punto de congelamiento para biodiesel de palma según estándares de la norma ASTM D - 2386 - 18. Tomado de: Reporte de resultados mejorador de punto de congelamiento, Terpel, 03 de septiembre de 2020.

La gráfica de columnas representada en la Figura 6 demuestra el comportamiento del biodiesel de palma en las mezclas con aditivo, con alcohol y únicamente con jet que a pesar de que la literatura planteaba un escenario favorecedor, este demostró todo lo opuesto, pues el valor de la temperatura de congelamiento tan solo logró mejorar 5°C por las características que adquirió el biocombustible durante el tiempo de almacenamiento durante la contingencia, dado a que su estabilidad química se ve afectada al ser almacenado por un tiempo prolongado, pues el biocombustible no sólo se encuentra en contacto con materiales propios de los contenedores [24] sino que también es expuesto a diferentes condiciones ambientales, lo cual va a producir reacciones de oxidación [25], formación de ácidos indeseables y por ende, depósitos que pueden causar la obstrucción de filtros de combustible [26].

Figura 6.

Gráfica de columnas de los resultados del punto de congelamiento para el biodiesel de palma.



Nota. Resultados del punto de congelamiento de las mezclas con biodiesel de palma.

3.2 Análisis de las mezclas con alcohol carburante

El alcohol carburante se tomó como biocombustible base del caso de estudio, dado que tiene una fórmula molecular conocida, de manera que se puede obtener un comportamiento predictivo frente a otras sustancias y con esto llegar a cumplir las expectativas que se tienen de las mezclas frente a su estabilidad a bajas temperaturas.

Con base a esta información se llevaron a cabo las muestras donde al poner el alcohol en contacto con el Jet y aditivos, se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 17.

Análisis del punto de congelamiento para el alcohol carburante.

TABLA DE RESULTADOS DE LAS MEZCLAS DEL ALCOHOL CARBURANTE							
Nº muestra	B1	B2	B3	JET	Ax ()	Ax	Punto Cong
9			5	94.85	0.15	A1	-24.5
10			10	89.85	0.15	A1	-18.5
11			15	84.85	0.15	A1	-17.5
12			20	79.85	0.15	A1	-15
21	-	-	5	94.85	0.15	A2	-15
22	-	-	10	89.85	0.15	A2	-20
23	-	-	15	84.85	0.15	A2	-13.5
24	-	-	20	79.85	0.15	A2	-11.5
25	2.5	-	2.5	95	-	-	-25
26	10	-	10	80	-	-	-12
27	-	2.5	2.5	95	-	-	-35.5
28	-	10	10	80	-	-	-31.5
37	-	-	5	95	-	-	-22.5
38	-	-	10	90	-	-	-15.5
39	-	-	15	85	-	-	-14
40	-	-	20	80	-	-	-11.5

Puntos de congelamientos bajos

Nota. Resultados de análisis del punto de congelamiento para el alcohol carburante según estándares de la norma ASTM D - 2386 - 18. Tomado de: Reporte de resultados mejorador de punto de congelamiento, Terpel, 04 de noviembre de 2020.

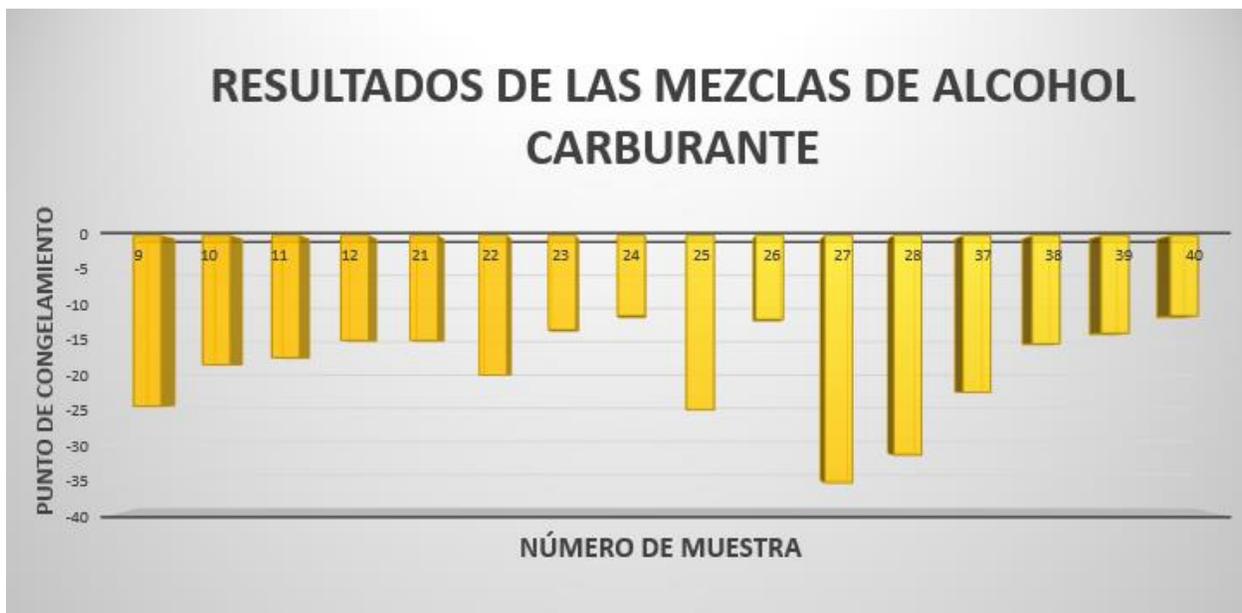
En la Tabla 17 se puede evidenciar que la presencia de alcohol carburante con jet fuel no presentó un comportamiento relevante, puesto que no presenta una modificación considerable en la propiedad a estudiar. Por otro lado, al ser implementado en mezclas con otros biocombustibles, en este caso palma y palmiste, refleja mejores resultados, debido a su capacidad de elevar el índice de octanaje al entrar en contacto con otros combustibles.

En el caso del alcohol carburante, la formación de cristales en situaciones desfavorables se da a partir de una temperatura de -11.5°C a una concentración de 20% en presencia de aditivos, como lo señala la Figura 7, mientras que en el mejor de los

casos se implementa en una concentración de 2.5% de alcohol carburante en una mezcla con biodiesel de palmiste al 2.5%, dando como variable de respuesta una temperatura de congelamiento de -35.5°C sin presencia de aditivos.

Figura 7.

Gráfica de columnas de los resultados del punto de congelamiento para las mezclas con alcohol carburante.



Nota. Resultados del punto de congelamiento de las mezclas con alcohol carburante.

3.2. Análisis de las mezclas con biocombustible de palmiste

Uno de los mayores problemas asociados con el uso de biodiesel, especialmente de palma, es el bajo desempeño que tiene en frío debido a su elevado punto de nube y punto de fluidez. El biodiesel de palmiste tiene un mejor desempeño en comparación al de palma, sin embargo, fue necesario evaluar qué tan convenientes son sus propiedades de flujo en frío a temperaturas extremas una vez se pone en contacto con queroseno, aditivos y alcohol carburante de manera que se obtuvieron los siguientes datos:

Los resultados de las pruebas (ver Tabla 18) muestran que la temperatura de congelamiento de la mezcla aumenta al tener mayor porcentaje de biodiesel, este

comportamiento es lógico debido a que con sólo un 10% de biocombustible puede variar el punto de congelación de la mezcla hasta 20°C [19]. Así mismo se puede observar que la mezcla con el mejor punto de congelación (muestra 5) se obtiene con la menor concentración de biocombustible adicional a la presencia del aditivo A1, seguida de la mezcla 33, que con una diferencia de 1°C obtiene una temperatura un tanto superior pero esta vez sin presencia de aditivos.

Tabla 18.

Resultados obtenidos del punto de congelamiento de las mezclas con biodiesel de palmiste durante la contingencia.

TABLA DE RESULTADOS DE LAS MEZCLAS DE BIODIESEL DE PALMISTE							
Nº muestra	B1	B2	B3	JET	Ax ()	Ax	Punto Cong
5		5		94.85	0.15	A1	-42
6		10		89.85	0.15	A1	-34
7		15		84.85	0.15	A1	-21
8		20		79.85	0.15	A1	-17.5
17		5		94.85	0.15	A2	-34.5
18		10		89.85	0.15	A2	-31.5
19		15		84.85	0.15	A2	-17
20		20		79.85	0.15	A2	-30.5
27	-	2.5	2.5	95	-	-	-35.5
28	-	10	10	80	-	-	-31.5
33	-	5	-	95	-	-	-41
34	-	10	-	90	-	-	-33
35	-	15	-	85	-	-	-27
36	-	20	-	80	-	-	-24

Punto de congelamiento cercano al punto establecido por la norma
Puntos de congelamientos bajos

Nota. Resultados de análisis del punto de congelamiento para biodiesel de palmiste según estándares de la norma ASTM D - 2386 - 18. Tomado de: Reporte de resultados mejorador de punto de congelamiento, Terpel, 04 de noviembre de 2020.

La tabla 19 muestra los puntos de congelamiento obtenidos en los laboratorios de Terpel antes de la contingencia para las mezclas de biocombustible de palmiste y jet fuel sin presencia de aditivos en las concentraciones de 10% y 20% señaladas en los recuadros rojo y azul respectivamente.

Tabla 19.

Resultados obtenidos del punto de congelamiento de las mezclas con biodiesel de palmiste antes de la contingencia.

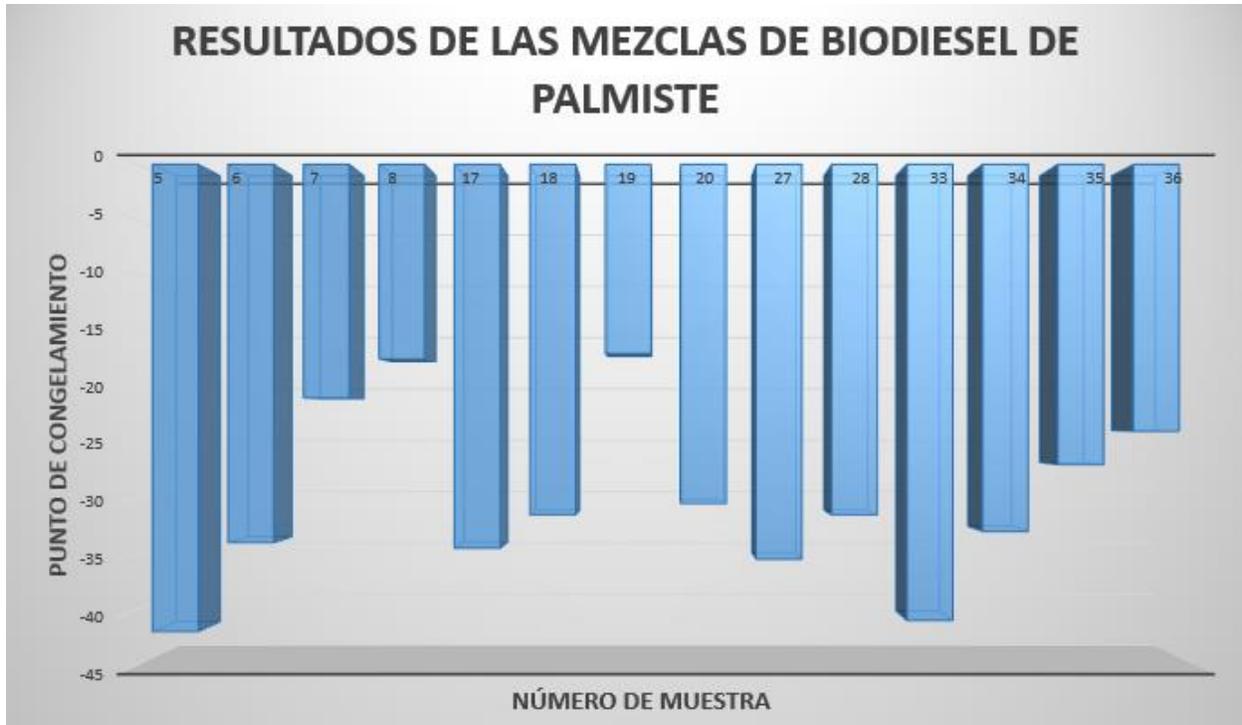
MEZCLAS JET FUEL A1- BIODIESEL DE PALMISTE REALIZADAS ANTES DE LA CONTINGENCIA		
PRUEBA	10%	20%
CORROSION A LA LAMINA DE COBRE	1a	1a
DENSIDAD	824.6	831.9
PUNTO DE INFLAMACION	45.5	48.5
PUNTO DE CONGELAMIENTO	-26.5	-18.5
CALOR NETO DE COMBUSTIÓN	43.0	42.9
VISCOSIDAD CINEMÁTICA	5.3	5.9

Nota. Resultados de análisis del punto de congelamiento para biodiesel de palmiste según estándares de la norma ASTM D - 2386 - 18. Tomado de: Reporte de resultados mejorador de punto de congelamiento, Terpel, 03 de septiembre de 2020.

El biodiesel de palmiste cuenta con los mejores resultados bajo condiciones extremas dado que tiene bajo contenido de humedad a comparación del biodiesel de palma, reduciendo la alteración de las propiedades fisicoquímicas de las mezclas y así mismo, inhibiendo los procesos antioxidantes del biocombustible. Esta afirmación se puede evidenciar en la Figura 8, donde se muestra un punto de congelamiento mínimo de -17°C en presencia del aditivo A2 con una concentración del 15% del biocombustible estudiado, y un valor de punto de congelamiento máximo de -42°C con el aditivo A1, teniendo una concentración del 5% de palmiste.

Figura 8.

Gráfica de columnas de los resultados del punto de congelamiento para las mezclas con biodiesel de palmiste.



Nota. Resultados del punto de congelamiento de las mezclas con biodiesel de palmiste.

3.3. Análisis de las mezclas con el aditivo A2

El aditivo A2 se implementó para evitar la cristalización de las parafinas y reducir la temperatura en el que el combustible deja de fluir y operar. Este aditivo se seleccionó gracias a la eficiencia frente a los biodiesel típicos en automotores.

La Tabla 20 muestra el comportamiento a bajas temperaturas de las mezclas con aditivo A2, donde se puede observar que a pesar de que los antecedentes sugerían que este aditivo era una de las mejores alternativas para mejorar la propiedad a estudiar, no hay un cambio significativo en la reducción en el punto de congelamiento debido a que las proporciones de biocombustible fueron muy altas haciendo inapropiada la opción de implementarlo en el caso de estudio.

Tabla 20.

Resultados del punto de congelamiento de las mezclas con aditivo A2.

TABLA DE RESULTADOS DE LAS MEZCLAS DEL ADITIVO A2							
Nº muestra	B1	B2	B3	JET	Ax (j)	Ax	Punto Cong
13	5			94.85	0.15	A2	-15.5
14	10			89.85	0.15	A2	-8
15	15			84.85	0.15	A2	-1.5
16	20			79.85	0.15	A2	2
17		5		94.85	0.15	A2	-34.5
18		10		89.85	0.15	A2	-31.5
19		15		84.85	0.15	A2	-17
20		20		79.85	0.15	A2	-30.5
21	-	-	5	94.85	0.15	A1	-24.5
22	-	-	10	89.85	0.15	A1	-18.5
23	-	-	15	84.85	0.15	A1	-17.5
24	0	-	20	79.85	0.15	A1	-15

Puntos de congelamientos bajos
Puntos superiores al 0°C

Nota. Resultados de análisis del punto de congelamiento de las mezclas con aditivo A2 siguiendo los estándares de la norma ASTM D - 2386 - 18. Tomado de: Reporte de resultados mejorador de punto de congelamiento, Terpel, 03 de septiembre de 2020 y 04 de noviembre de 2020.

Los resultados experimentales de la evaluación del punto de congelamiento para las mezclas con 0.15% de aditivo A2 expuestos en la Figura 9, muestran el incremento de la temperatura de congelamiento al implementar la menor concentración de biocombustible (5%). Sin embargo, no resulta óptimo su uso en el caso de estudio dado que la máxima temperatura alcanzada es de -34.5°C y según la norma ASTM D-1655 es necesario alcanzar una temperatura de -47°C.

Figura 9.

Gráfica de columnas de los resultados del punto de congelamiento para las mezclas con presencia del aditivo A2.



Nota: Resultados del punto de congelamiento de las mezclas con presencia del aditivo A2.

3.4. Análisis de las mezclas con el aditivo A1

Es claro que la mezcla con el aditivo A1 con biocombustible de palmiste mejora notoriamente el comportamiento de las propiedades de flujo en frío en comparación a los demás resultados, sin embargo, para obtener mejores resultados y cumplir los estándares, es necesario implementar una concentración de biocombustible por debajo del 5%.

Tabla 21.

Resultados del punto de congelamiento de las mezclas con aditivo A1.

TABLA DE RESULTADOS DE LAS MEZCLAS DEL ADITIVO A1							
Nº muestra	B1 []	B2 []	B3 []	JET []	Ax []	Ax	Punto Cong
1	5			94.85	0.15	A1	-19
2	10			89.85	0.15	A1	-10.5
3	15			84.85	0.15	A1	6.5
4	20			79.85	0.15	A1	9.5
5		5		94.85	0.15	A1	-42
6		10		89.85	0.15	A1	-34
7		15		84.85	0.15	A1	-21
8		20		79.85	0.15	A1	-17.5
9			5	94.85	0.15	A1	-24.5
10			10	89.85	0.15	A1	-18.5
11			15	84.85	0.15	A1	-17.5
12			20	79.85	0.15	A1	-15

	Punto de congelamiento cercano al punto establecido por la norma
	Puntos de congelamientos bajos
	Resultado menos favorable para el caso de estudio
	Puntos superiores al 0°C

Nota. Resultados de análisis del punto de congelamiento de las mezclas con aditivo A1 siguiendo los estándares de la norma ASTM D - 2386 - 18. Tomado de: Reporte de resultados mejorador de punto de congelamiento, Terpel, 04 de noviembre de 2020.

La Figura 10 evidencia que el aditivo 1 a pesar de tener el mejor panorama en la muestra 5 con un punto de congelamiento de -42°C, también tiene el peor escenario señalado en la muestra 4 con el biodiesel de palma el cual llega a una temperatura de 9.5°C manejando un incremento de 15°C con respecto a la mezcla sin biocombustible, esto por las circunstancias desfavorables mencionadas anteriormente en las que se encontraba el biodiesel de palma.

Figura 10.

Gráfica de columnas de los resultados del punto de congelamiento para las mezclas con presencia del aditivo A1.



Nota: Resultados del punto de congelamiento de las mezclas con presencia del aditivo A1.

4. ANÁLISIS DE COSTOS

El estudio económico es parte fundamental del desarrollo de proyectos en el ámbito de la ingeniería dado que gracias a este se pueden obtener estimaciones que pueden guiar a los involucrados hacia la viabilidad del proyecto según los resultados experimentales obtenidos; este caso determinado, no implica un proceso de gran escala, sino un proyecto de investigación enfocado hacia el desarrollo experimental, el cual brinda una base de conocimientos para futuros estudios.

Para el desarrollo de este objetivo se dividieron los costos involucrados en el proyecto en dos grupos, los costos de operación, los cuales incluyen el precio de la materia prima, materiales, talento humano y laboratorio, y el costo del producto, el cual describe su precio final tomando el porcentaje de cada una de las fracciones por su costo unitario.

A continuación, se detallan los costos en relación al talento humano. Estos datos fueron registrados conforme se desarrolló el trabajo de grado, tomando como variable el costo por hora de cada uno de los involucrados según sus funciones.

La propuesta del trabajo de grado se inició el 27 de febrero del 2020, la cual tuvo un trabajo de 220 horas en su desarrollo para alcanzar la aprobación por parte del comité de proyectos de ingeniería química de la Fundación Universidad de América. Una vez aprobada la propuesta del trabajo de grado, se designó un horario establecido para la investigación de dicho trabajo abarcando un promedio de 4 horas diarias, 4 días a la semana. Con base a la investigación, se llevaron a cabo las prácticas de laboratorio realizadas en un lapso de 9 días con un horario de 10:00 - 17:00 hrs, donde se desarrollaron las mezclas planteadas previamente por el diseño experimental. Posterior al desarrollo experimental, se prosiguió con la investigación en el horario anteriormente descrito para efectuar el análisis de dichas mezclas teniendo un total de horas, junto con las horas del anteproyecto, de 551 horas como se puede observar en la tabla 22.

Tabla 22.

Talento humano, investigadoras.

TALENTO HUMANO INVESTIGADORAS			
ANTEPROYECTO: 220 HORAS			
PROYECTO: LUNES- JUEVES 9:00 - 13:00			
INVESTIGACIÓN	17 SEMANAS	67 DÍAS	268 HORAS
EXPERIMENTAL	2 SEMANAS	9 DÍAS	63 HORAS
TRABAJO DE GRADO	19 SEMANAS	76 DÍAS	331 HORAS
TOTAL HORAS ANTEPROYECTO Y TRABAJO DE GRADO			551

Nota. Tiempo invertido de las investigadoras.

Por otra parte, se toma la consideración de los elementos esenciales o básicos, los cuales se describen los insumos donde se encuentran los componentes implementados en la elaboración de las mezclas, materiales y dotación.

En la Tabla 23 se encuentran los costos por litro de los reactivos utilizados en el caso de estudio con base a las cantidades estipuladas en capítulos anteriores.

Tabla 23.

Costo de los reactivos implementados en las mezclas.

REACTIVOS	
SUSTANCIA	COSTO (\$ COP/L)
A1	\$ 13,066.5
A2	\$ 573,707.74
Palma	\$ 12,333.1
Palmiste	\$ 12,333.1
Alcohol	\$ 8,286.3
Jet	\$ 10,000.0
TOTAL	\$ 629,726.7

Nota. Costo de cada reactivo por cada litro.

El costo de los materiales requeridos para el almacenamiento de las mezclas está relacionado con la capacidad de cada uno de los recipientes y las unidades de accesorios, los cuales se pueden evidenciar en la Tabla 24.

Tabla 24.

Costo de los materiales utilizados para el almacenamiento de las mezclas.

MATERIALES			
CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	VALOR UNIDAD	VALOR TOTAL (COP)
3	Garrafa no apilable blanca	\$ 5,000	\$ 15,000
3	Tapa 58 Blanca con Tapon	\$ 200	\$ 600
195	Garrafa rectangular 500 traslucida	\$ 546	\$ 106,470
195	Tapa Rosca 28 Negra	\$ 66	\$ 12,870
90	Muestras cristal	\$ 150	\$ 13,500
90	Tapon 20 natural	\$ 26	\$ 2,340
4	Pág rótulos	\$ 2,000	\$ 8,000
TOTAL			\$ 158,780

Nota. Costo de materiales.

La Tabla 25 establece los gastos de dotación requeridos para el desarrollo experimental debido a que los implementos de seguridad deben ser de un solo uso por protocolos exigidos en el laboratorio, generando así un incremento en los gastos por práctica de laboratorio.

Tabla 25.

Dotación requerida para el acceso a los laboratorios.

DOTACIÓN			
CANTIDAD	IMPLEMENTOS DE PROTECCIÓN	VALOR UNIDAD	VALOR TOTAL (COP)
18	Par de guantes	\$ 1,800	\$ 32,400
18	Cofia desechable	\$ 500	\$ 9,000
18	Tapabocas desechable	\$ 800	\$ 14,400
TOTAL			\$ 55,800

Nota: Implementos de protección.

Llegar al laboratorio para la realización de las muestras, el desplazamiento hacia la planta de Bio D para la entrega de las mismas y las reuniones por efecto de la investigación, es el tema a tratar en la Tabla 26 pues el transporte es un costo se debe tener en cuenta y debe ser resaltado.

Tabla 26.

Costos de transportes.

TRANSPORTES						
SERVICIO	CANTIDAD	DIURNO	NOCTURNO	PEAJES	GASOLINA	TOTAL (COP)
Transporte laboratorio	18	\$ 7,000	-	-	-	\$ 28,000
	18	-	\$ 21,000	-	-	
Transporte planta BioD	4	-	-	\$ 8,300	\$ 40,000	\$ 193,200
Transporte investigación	20	\$ 6,000	-	-	-	\$ 120,000
TOTAL						\$ 341,200

Nota. Transportes utilizados.

La Tabla 27 indica los costos generales que fueron necesarios para ejecutar el proyecto, mostrando la inversión total requerida para dar cumplimiento a los objetivos, siendo el valor de esta inversión de \$73 '456.213 (COP).

Tabla 27.

Costos operacionales.

ÍTEMS	UNIDAD	\$/UNIDAD	CANTIDAD (horas)	TOTAL (COP)	FUENTE FINANCIERA
TALENTO HUMANO					
Investigador	2	\$ 11,000	551	\$ 12,122,000	Propia
Director	1	\$ 29,167	20	\$ 583,340	Empresa
Codirector	2	\$ 29,167	18	\$ 1,050,012	Empresa/ Universidad América
Asesor	1	\$ 18,750	50	\$ 937,500	Universidad América
TOTAL				\$	14,692,852
MAQUINARIA Y EQUIPOS					
Laboratorios	-	-	-	\$ 24,930,000	Empresa
Insumos	-	-	-	\$ 25,774,307	Empresa/ Propia
Computador	2	\$ 3,000	488	\$ 2,928,000	Propia
Software	2	\$ 1,400	488	\$ 1,366,400	Propia
TOTAL				\$	54,998,707
OTROS GASTOS					
Servicios	2	\$ 5,000	280	\$ 2,800,000	Propia
Resma de papel	3	\$ 10,000	-	\$ 30,000	Propia
Impresiones	800	\$ 60	-	\$ 48,000	Propia
Transporte y viajes	-	-	-	\$ 341,200	Propia
Normas	6	\$ 30,000	-	\$ 180,000	Propia
Imprevistos	0.5%	-	-	\$ 367,281	Propia
TOTAL				\$	3,764,654

Nota. Costos operacionales.

Para la descripción de las horas de talento humano, donde se tuvo en cuenta el tiempo invertido en las reuniones tanto sincrónicas como asincrónicas con el director, los codirectores, el asesor y entre las mismas investigadoras.

La estimación de los costos tanto de software como de equipos constituyó la identificación de recursos adicionales necesarios para la realización del proyecto de manera eficiente, los cuales junto a los laboratorios e insumos da un valor total de \$54'998.707 (COP).

En la sección de otros gastos presentados en la Tabla 27 se encuentran los costos de las diferentes inversiones realizadas de manera indirecta, los cuales constan de servicios, resma de papel, impresiones, transporte y viajes, normas e imprevistos.

Debido a que un biocombustible en su formulación para ser empleado en la industria aeronáutica requiere de la adición de varios compuestos, su precio final está dado por el precio de cada uno de los componentes que forman parte de la mezcla, determinando el costo total del combustible para hacer una comparación respecto a la variable de respuesta del desarrollo experimental (punto de congelamiento).

Los costos por fracción de cada una de las materias primas implementadas en las mezclas mostrados en la Tabla 28 permitieron realizar el análisis de los diferentes resultados, siendo las muestras 5 y 33 las mezclas con el mejor punto de congelamiento y la mejor opción en el caso de estudio, las cuales pertenecen al biocombustible de palmiste en concentración del 5% con y sin la presencia de aditivo respectivamente. Es importante aclarar que la selección de la mejor opción es con base al punto de congelamiento establecido por la norma ASTM D-1655 y que el valor total de las muestras es dado en pesos colombianos (\$COP).

Tabla 28.

Costo de cada una de las mezclas de 500 mL.

COSTOS DE LAS MEZCLAS													
Nº muestra	Ax	Ax []	Ax (mL)	Ax (\$)	BIOFUEL	BIOFUEL []	BIOFUEL (mL)	BIOFUEL (\$)	JET []	JET (mL)	JET (\$)	TOTAL	
1	A1	0.15	0.75	\$ 9.80	B1	5	25	\$ 308.33	94.85	474.25	\$ 4,742.50	\$ 5,060.63	
2		0.15	0.75	\$ 9.80		10	50	\$ 616.66	89.85	449.25	\$ 4,492.50	\$ 5,118.95	
3		0.15	0.75	\$ 9.80		15	75	\$ 924.98	84.85	424.25	\$ 4,242.50	\$ 5,177.28	
4		0.15	0.75	\$ 9.80		20	100	\$ 1,233.31	79.85	399.25	\$ 3,992.50	\$ 5,235.61	
5		0.15	0.75	\$ 9.80	B2	5	25	\$ 308.33	94.85	474.25	\$ 4,742.50	\$ 5,060.63	
6		0.15	0.75	\$ 9.80		10	50	\$ 616.66	89.85	449.25	\$ 4,492.50	\$ 5,118.95	
7		0.15	0.75	\$ 9.80		15	75	\$ 924.98	84.85	424.25	\$ 4,242.50	\$ 5,177.28	
8		0.15	0.75	\$ 9.80		20	100	\$ 1,233.31	79.85	399.25	\$ 3,992.50	\$ 5,235.61	
9		0.15	0.75	\$ 9.80	B3	5	25	\$ 207.16	94.85	474.25	\$ 4,742.50	\$ 4,959.46	
10		0.15	0.75	\$ 9.80		10	50	\$ 616.66	89.85	449.25	\$ 4,492.50	\$ 5,118.95	
11		0.15	0.75	\$ 9.80		15	75	\$ 924.98	84.85	424.25	\$ 4,242.50	\$ 5,177.28	
12		0.15	0.75	\$ 9.80		20	100	\$ 1,233.31	79.85	399.25	\$ 3,992.50	\$ 5,235.61	
13	A2	0.15	0.75	\$ 430.28	B1	5	25	\$ 308.33	94.85	474.25	\$ 4,742.50	\$ 5,481.11	
14		0.15	0.75	\$ 430.28		10	50	\$ 616.66	89.85	449.25	\$ 4,492.50	\$ 5,539.44	
15		0.15	0.75	\$ 430.28		15	75	\$ 924.98	84.85	424.25	\$ 4,242.50	\$ 5,597.76	
16		0.15	0.75	\$ 430.28		20	100	\$ 1,233.31	79.85	399.25	\$ 3,992.50	\$ 5,656.09	
17		0.15	0.75	\$ 430.28	B2	5	25	\$ 308.33	94.85	474.25	\$ 4,742.50	\$ 5,481.11	
18		0.15	0.75	\$ 430.28		10	50	\$ 616.66	89.85	449.25	\$ 4,492.50	\$ 5,539.44	
19		0.15	0.75	\$ 430.28		15	75	\$ 924.98	84.85	424.25	\$ 4,242.50	\$ 5,597.76	
20		0.15	0.75	\$ 430.28		20	100	\$ 1,233.31	79.85	399.25	\$ 3,992.50	\$ 5,656.09	
21		0.15	0.75	\$ 430.28	B3	5	25	\$ 207.16	94.85	474.25	\$ 4,742.50	\$ 5,379.94	
22		0.15	0.75	\$ 430.28		10	50	\$ 616.66	89.85	449.25	\$ 4,492.50	\$ 5,539.44	
23		0.15	0.75	\$ 430.28		15	75	\$ 924.98	84.85	424.25	\$ 4,242.50	\$ 5,597.76	
24		0.15	0.75	\$ 430.28		20	100	\$ 1,233.31	79.85	399.25	\$ 3,992.50	\$ 5,656.09	
25	-	-	-	B1 + B3	2.5	2.5	12.5	12.5	\$ 257.74	95	475	\$ 4,750.00	\$ 5,007.74
26	-	-	-		10	10	50	50	\$ 1,030.97	80	400	\$ 4,000.00	\$ 5,030.97
27	-	-	-	B2 + B3	2.5	2.5	12.5	12.5	\$ 257.74	95	475	\$ 4,750.00	\$ 5,007.74
28	-	-	-		10	10	50	50	\$ 1,030.97	80	400	\$ 4,000.00	\$ 5,030.97
29	-	-	-	B1	5	25	\$ 308.33	95	474.25	\$ 4,742.50	\$ 5,050.83		
30	-	-	-		10	50	\$ 616.66	90	449.25	\$ 4,492.50	\$ 5,109.16		
31	-	-	-		15	75	\$ 924.98	85	424.25	\$ 4,242.50	\$ 5,167.48		
32	-	-	-		20	100	\$ 1,233.31	80	399.25	\$ 3,992.50	\$ 5,225.81		
33	-	-	-	B2	5	25	\$ 308.33	95	474.25	\$ 4,742.50	\$ 5,050.83		
34	-	-	-		10	50	\$ 616.66	90	449.25	\$ 4,492.50	\$ 5,109.16		
35	-	-	-		15	75	\$ 924.98	85	424.25	\$ 4,242.50	\$ 5,167.48		
36	-	-	-		20	100	\$ 1,233.31	80	399.25	\$ 3,992.50	\$ 5,225.81		
37	-	-	-	B3	5	25	\$ 207.16	95	474.25	\$ 4,742.50	\$ 4,949.66		
38	-	-	-		10	50	\$ 616.66	90	449.25	\$ 4,492.50	\$ 5,109.16		
39	-	-	-		15	75	\$ 924.98	85	424.25	\$ 4,242.50	\$ 5,167.48		
40	-	-	-		20	100	\$ 1,233.31	80	399.25	\$ 3,992.50	\$ 5,225.81		

Nota. Costos de las mezclas.

En la Figura 11 se observa que las mezclas con biocombustible a base de palmiste ofrecen un mejor rendimiento en lo que respecta el punto de congelación, obteniendo como resultado un recorrido de costos no tan variable respecto al costo de Jet Fuel, representando un valor menor para la mezcla 5, la cual brinda un punto óptimo en el caso de estudio.

Figura 11.

Gráfica de columnas de los resultados del punto de congelamiento junto con los costos de las mejores opciones de las mezclas.



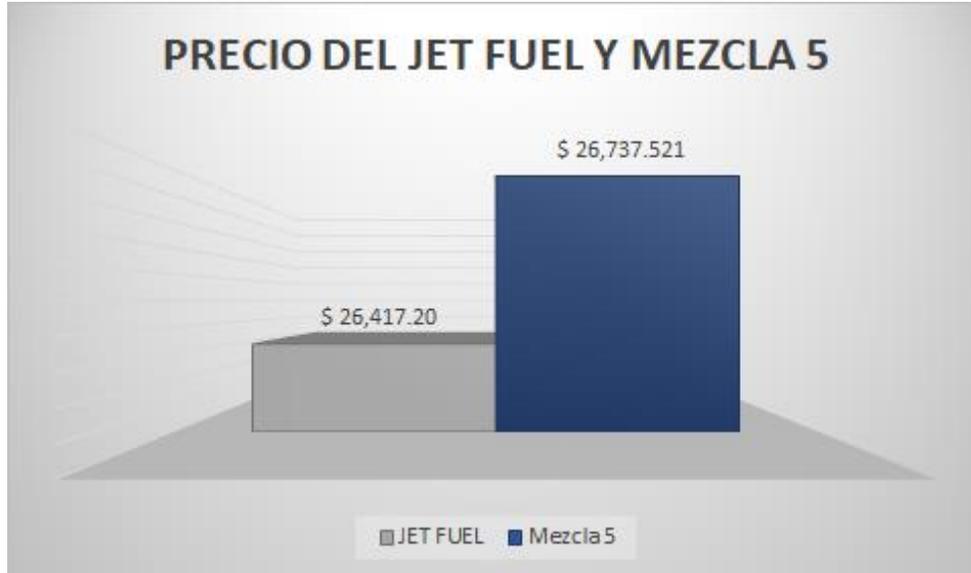
Nota. Gráfica de columnas de los resultados del punto de congelamiento junto con los costos de las cinco mejores opciones de las mezclas.

El precio nacional del jet fuel A1 se ubica por encima del precio extranjero, por lo cual ha generado importantes sobre costos a las empresas aéreas. “En el 2010, por ejemplo, este sobrecosto alcanzó los \$138 mil millones de pesos, equivalentes a un 8,4 por ciento adicional del pago de combustible” [27], lo que lleva a las empresas a buscar alternativas para evitar posibles incrementos en el costo del combustible aeronáutico.

En la Figura 12 se encuentra el costo por galón del Jet Fuel convencional comparado con el precio del mejor resultado del punto de congelamiento del combustible alternativo.

Figura 12.

Gráfica comparativa del precio del Jet Fuel y la mejor opción de mezcla (mezcla 5).



Nota. Gráfica comparativa de columnas de los precios por galón del Jet Fuel convencional y el precio de la mezcla con mejor punto de calentamiento (mezcla 5).

Esta muestra resulta como alternativa para incorporar un biocombustible aeronáutico hecho en Colombia y competitivo en precio frente a otras industrias internacionales, teniendo en cuenta que el implemento de biocombustibles mejoraría la seguridad energética y reduciría las emisiones de los gases de efecto invernadero [28], reduciendo de igual manera los costos del combustible sobre el impuesto Nacional al Carbono descrito en el artículo 222 de la Ley 1819 de 2016, el cual establece una tarifa específica para cada factor de emisión de dióxido de carbono, donde en el caso del kerosene y jet fuel cuenta con un valor de \$170 COP por galón de CO₂ emitido.

5. CONCLUSIONES

Siguiendo los estándares de la norma ASTM D-1655, se asume que los datos obtenidos en la evaluación del punto de congelamiento son fuente de información importante en la etapa previa a la modelación del proceso de producción de combustible aeronáutico en mezcla con biocombustibles y aditivos, permitiendo la obtención de alternativas de investigación. Cabe resaltar que los resultados muestran uno de los principales inconvenientes en la industria aeronáutica, el cual es la restricción de incorporar biocombustibles de inestabilidad a bajas temperaturas, impidiendo su uso directo con las proporciones planteadas en este caso de estudio. Es un requisito obligatorio tener estabilidad térmica que cumpla con la norma para poder implementar un biocombustible que genere seguridad en el trayecto, con menores riesgos de accidentalidad y viable en precio.

Con la determinación del punto de congelamiento mediante los métodos de la norma ASTM D-2386, se evidenció que los resultados obtenidos no fueron completamente satisfactorios dado que no cumplieron con las características esperadas en un principio, llegando a una temperatura máxima de -42°C , es decir 5°C por debajo de la temperatura estipulada por la norma, limitando su aplicación en la industria aeronáutica para este caso de estudio.

A diferencia del aditivo A2, el aditivo A1 cuenta con disolventes aromáticos tanto ligeros como pesados, los cuales hacen que se genere una alta tensión superficial, efectuando de manera inversamente proporcional un cambio en la temperatura, es decir, una disminución en la misma; esto con el fin de alcanzar una temperatura de congelación muy baja, lo cual hace que sea la mejor opción para aditivar, sin embargo, no cumplió en su totalidad con las expectativas del estudio.

Los análisis de costos del proyecto respecto a los resultados obtenidos en la experimentación determinaron la calidad y cantidad de los recursos necesarios que se abarcaron en el desarrollo del proyecto en términos económicos, es decir, los gastos generales permitieron la ejecución de cada una de las actividades que componen el

presente trabajo de grado, brindando un panorama concreto de los costos de inversión que se requirieron para cumplir con los objetivos del caso de estudio.

De igual manera, al tener una diferencia poco significativa respecto al jet fuel implementado en las aeronaves, se tiene una ventaja en el uso de biocombustibles en presencia de aditivos al tener una posible reducción del impuesto al carbono generando en los resultados de las muestras elegida una disminución de los costos del producto por la eficiencia y economía del aditivo A1.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Comisión de las comunidades Europeas, “Emisiones de gases de efecto invernadero por país y sector (infografía)”, *Parlamento Europeo*, marzo, 2018, doi: <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20180301STO98928/emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-por-pais-y-sector-infografia> [Acceso: Ag. 19, 2020]
- [2] L. Bredeson, R. Quiceno G., X. Riera P., A. Harrison, “Factors driving refinery CO2 intensity, with allocation into products”, *Int J Life Cycle Assess* 15, 817–826, junio, 2010, doi: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-010-0204-3> [Acceso: Ag. 19, 2020]
- [3] Portal de actualidad y noticias de la Agencia Europa Press, enero, 2019. “Las emisiones de CO2 del sector de la aviación crecerán un 21% hasta 2040”. [En línea]. Disponible: <https://www.europapress.es/turismo/transportes/aerolineas/noticia-emisiones-co2-sector-aviacion-creceran-21-2040-20190124124805.html>
- [4] B. Kelechava, “Especificaciones de combustible para aviones”, *American National Standards Institute*, junio, 2020, doi: <https://blog.ansi.org/2020/06/jet-fuel-specifications-astm-d1655-aviation/#gref> [Acceso: Ag. 24, 2020]
- [5] Oiltanking GmbH, “Combustibles de aviación (jet fuel, gasolina de aviación (avgas), jet B, bioqueroseno)”, *Oiltanking*, diciembre, 2015, doi: <https://www.oiltanking.com/es/publicaciones/glosario/detalles/term/combustibles-de-aviacion-jet-fuel-gasolina-de-aviacion-avgas-jet-b-bioqueroseno.html> [Acceso: Ag. 24, 2020]
- [6] G. López, “Biodiesel, una alternativa de combustión limpia y eficiente”, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), doi: <http://www.santafe-conicet.gov.ar/servicios/comunica/biodiesel.htm> [Acceso: Ag. 24, 2020]

- [7] J.E. Murillo, *Producción de Biodiesel a partir de aceite de palma*, trabajo de grado. Facultad de Ingenierías, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia, 2003. [En línea]. Disponible:
<http://www.bdigital.unal.edu.co/1191/1/jorgeeduardomurillovaldes.2003.pdf>
- [8] F. G. Miriam, V. P. Rogelio, B. S. Amadis, “El aceite de palma africana *elae guineensis*: Alternativa de recurso energético para la producción de biodiesel en Colombia y su impacto ambiental”, *Scielo*, marzo, 2014, doi:
<http://www.scielo.org.co/pdf/prosp/v12n1/v12n1a11.pdf> [Acceso: Ag. 24, 2020]
- [9] T.P. Pantzaris, J. Mohd, “Properties and Utilization of Palm Kernel Oil”, *Publicaciones Fedepalma*, vol. 23, no. 3, 2002, doi:
<https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/download/925/925/>
[Acceso: Ag. 27, 2020]
- [10] Comisión del Codex Alimentarius (1999). Programa conjunto FAO/OMS sobre normas alimentarias: Informe de la 46ª reunión del comité ejecutivo de la comisión del Codex Alimentarius. Viale delle Terme di Caracalla. [En línea]. Disponible:
http://www.fao.org/input/download/report/496/AL99_04s.pdf
- [11] D. Juan, S. Jose, P. Ronaldo, “Perspectivas de los biocombustibles en Colombia”, *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, mayo, 2015, doi:
<http://www.scielo.org.co/pdf/rium/v14n27/v14n27a02.pdf> [Acceso: Ag. 27, 2020]
- [12] A. Ocampo, “Alcohol carburante: Actualidad Tecnológica”, *Revista EIA*, no. 1, junio, 2004, doi:
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372004000100005 [Acceso: Ag. 27, 2020]
- [13] Real Academia de la Lengua Española. Diccionario de la lengua española. [En línea]. RAE, 23.ª ed. Disponible en: <https://dle.rae.es/aditivo>

- [14] A. I. Herguedas, C. Taranco, E. Rodríguez G., P. Prieto P., E. Sanz G., M. Sánchez M., “Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad”, *Centro Tecnológico Instituto Universitario de Investigación en Gestión Forestal Sostenible*, 2012, doi: <http://sostenible.palencia.uva.es/system/files/publicaciones/Biomasa%2C%20Biocombustibles%20y%20Sostenibilidad.pdf> [Acceso: Sep. 01, 2020].
- [15] ASTM International. “ASTM establece las normas para el biodiésel”. American Society for Testing and Materials. [En línea]. Disponible: https://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPJF09/nelson_spjf09.html [Acceso: Sept. 29, 2020].
- [16] ASTM International. “Historical Standard: Especificación estándar de combustible para turbinas de aviación”. American Society for Testing and Materials. [En línea]. Disponible: <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D1655-19-SP.htm> [Acceso: Sept. 29, 2020].
- [17] ASTM International. “Método de prueba estándar para punto de congelación de combustibles para aviación”. American Society for Testing and Materials. [En línea]. Disponible: <https://www.astm.org/Standards/D2386-SP.htm> [Acceso: Sept. 29, 2020].
- [18] A. Llamas, M.J. García Martínez, A.M. Al-Lal, L. Canoira, M. Lapuerta, “Biokerosene from coconut and palm kernel oils: production and properties of their blends with fossil kerosene”, *Fuel*, vol. 102, pp. 483-490, diciembre, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.06.108> [Acceso: Ag. 24, 2020].
- [19] J.Q da Silva, D.Q Santos, J.D Fabrics, L. V Leonardi Harter, S. Peres Chagas, “Light biodiesel from macaúba and palm kernel: Properties of their blends with fossil kerosene in the perspective of an alternative aviation fuel” *Renewable Energy*, vol. 151, pp. 426-433, noviembre, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.035> [Acceso: Ag. 24, 2020].

- [20] Hollingsworth, M.D., Zwanzinger U.W., Brown M.E., Chaney J.D., Huffman J.C., Harray K. Spring-Loading at the Molecular Level: Relaxation of Guest-Induced Strain in Channel Inclusion Compounds. *Journal of the American Chemical Society*. 121, 41, 9732–9733. 04 de octubre de 1999.
- [21] Universidad de los Andes Mérida - Venezuela. “Módulo de enseñanza en fenómenos interfaciales”. Universidad de los Andes, facultad de ingeniería; escuela de ingeniería química. [En línea]. Disponible:
http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/S363A_Hidratos.pdf [Acceso: Ene. 29, 2021]
- [22] ASTM International. “Standard test method for freezing point of aviation fuels”. American Society for Testing and Materials. [En línea]. Disponible:
<https://eshop.normservis.cz/norma/astm-d2386-18-1.12.2018.html> [Acceso: Nov. 30, 2020].
- [23] CR. Krishna, K. Thomassen, C. Brown, T. A. Carnicero, M.A. Devinder Mahajan, “Cold Flow Behavior of Biodiesels Derived from Biomass Sources”, *Industrial and Chemical Engineering Research*, vol. 46, no. 26, pp. 8846-8851, oct, 2007, doi:
<https://doi.org/10.1021/ie070110f> [Acceso: Nov. 10, 2020].
- [24] Zuleta, E., Rios, L., & Calderón, J. Estudio de la estabilidad oxidativa de biodiésel de aceite de palma en contacto con materiales metálicos y poliméricos automotrices. *Ingeniería y Competitividad*. Volumen 14, No. 2, p. 83 - 90. 19 de noviembre de 2012.
- [25] Rodríguez, M., Sierra, M., Cantor, L. Uso potencial de las mezclas de biodiesel de *Jatropha* y de palma en Colombia. *Studiositas*. Volumen 5, No. 3, p. 75-87. Diciembre de 2010.

- [26] Focke, W., Nshoane, K., derWesthuizen, I., Lofté, G., Reddy, J. The effect of synthetic antioxidants on the oxidative stability of biodiesel. *Journal of the Brazilian Chemical Society*. Volumen 23, No. 12, p 227–233. São Paulo diciembre de 2012.
- [27] D.C. Briceño M., O. López S., *Importancia del combustible en el transporte aéreo colombiano*, ensayo. Facultad de ciencias económicas, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia, 2011.
- [28] Delgado, J. E., Salgado, J. J., & Pérez, R. Perspectivas de los biocombustibles en Colombia. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*. Volumen 14, No. 27, p 13-28. 2015.

GLOSARIO

Aditivo: es una sustancia química agregada a la mezcla del combustible en una dosis mínima para mejorar sus propiedades fisicoquímicas.

Biodiésel: es un combustible alternativo de combustión limpia hecho con grasa o aceite, compuesto de ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de aceites vegetales.

Biomasa: hace referencia a cualquier tipo de materia orgánica que haya tenido su origen inmediato en el proceso biológico de organismos recientemente vivos; comprende productos como por ejemplo la caña de azúcar, palma y palmiste.

Combustible líquido: sustancia que tiene la capacidad de arder con facilidad al combinarse con oxígeno, liberando energía de su estado potencial a un estado utilizable, originando como residuo el calor. Contiene petróleo, sus destilados y no derivados del petróleo como la gasolina, el gasóleo, y el queroseno; se emplean principalmente en motores de combustión interna de los vehículos de transporte.

Jet fuel (tipo jet A1): combustible de aviación (queroseno), es una mezcla de hidrocarburos que se obtiene de la destilación de petróleo natural empleado por lo general en los motores de turbina en la aviación civil.

Punto de congelación: temperatura más baja a la cual un combustible permanece libre de cristales sólidos de hidrocarburos que puedan restringir el flujo de combustible por los filtros.

ANEXOS

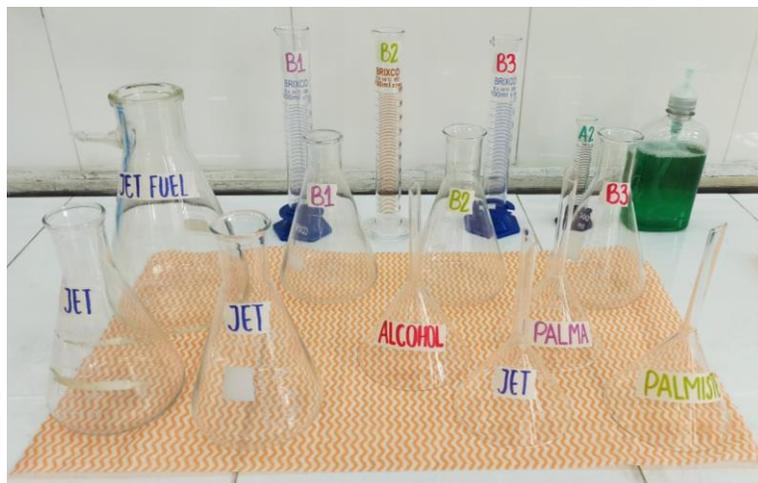
ANEXO 1.

PICNÓMETROS IMPLEMENTADOS EN EL CÁLCULO DE DENSIDADES



Nota. Fotografía de los picnómetros implementados en el desarrollo experimental para realizar el cálculo de las densidades de cada compuesto.

ANEXO 2.
INSTRUMENTOS DE LABORATORIO UTILIZADOS EN LA REALIZACIÓN DE LAS
MEZCLAS



Nota. Fotografía de los instrumentos de laboratorio utilizados en el desarrollo experimental para realizar el cálculo de las densidades de cada compuesto.

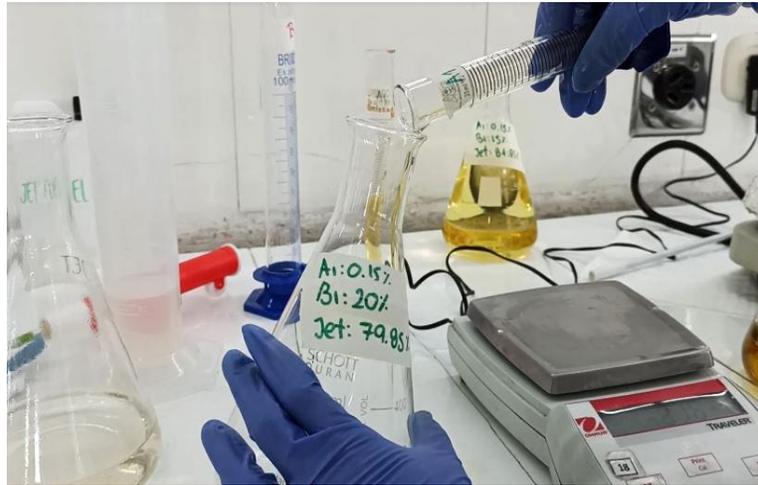
ANEXO 3.
PESAJE DEL ADITIVO A1



Nota. Fotografía del pesaje del aditivo A1 en la balanza analítica.

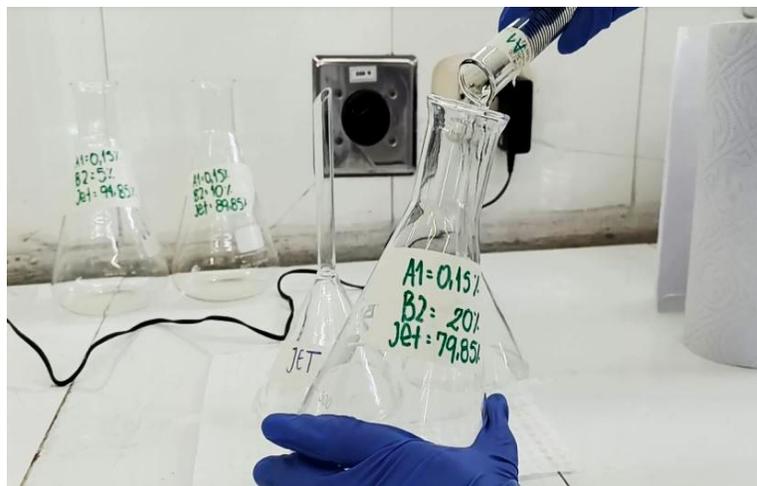
ANEXO 4.

PROCESO DE ADITIVACIÓN CON ADITIVO A1



Nota. Fotografía del proceso de aditivación para el caso del biocombustible de palma en presencia del aditivo A1.

ANEXO 5.
PROCESO DE ADITIVACIÓN PARA EL CASO DEL BIOCOMBUSTIBLE DE
PALMISTE



Nota. Fotografía del proceso de aditivación para el caso del biocombustible de palmiste en presencia del aditivo A1.

ANEXO 6.

ADICIÓN DEL BIOCOMBUSTIBLE DE PALMISTE EN LA MEZCLA AL 20% (V/V)



Nota. Fotografía de la adición del biocombustible de palmiste en la mezcla al 20% (v/v) con presencia del aditivo A1.

ANEXO 7.
**ADICIÓN DEL JET FUEL A1 A LA MEZCLA 20% (V/V) DE BIOCOMBUSTIBLE
DE PALMISTE**



Nota. Fotografía de la adición del jet fuel A1 a la mezcla 20% (v/v) de biocombustible de palmiste en presencia del aditivo A1.

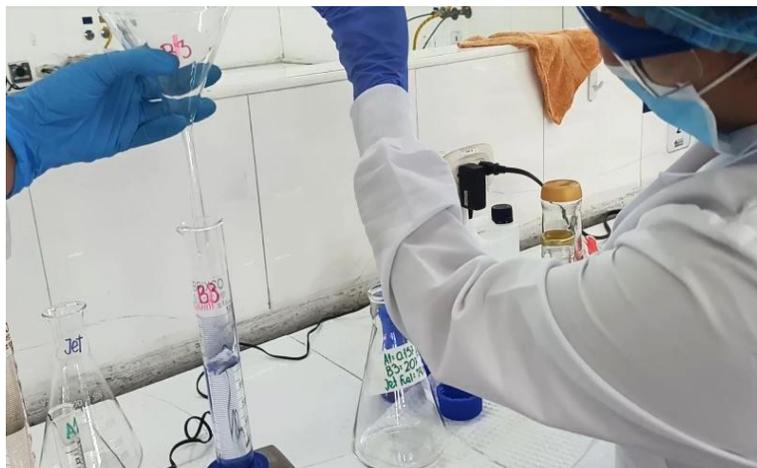
ANEXO 8.

PROCESO DE ADITIVACIÓN PARA EL CASO DEL ALCOHOL CARBURANTE



Nota. Fotografía del proceso de aditivación para el caso del alcohol carburante en presencia del aditivo A1.

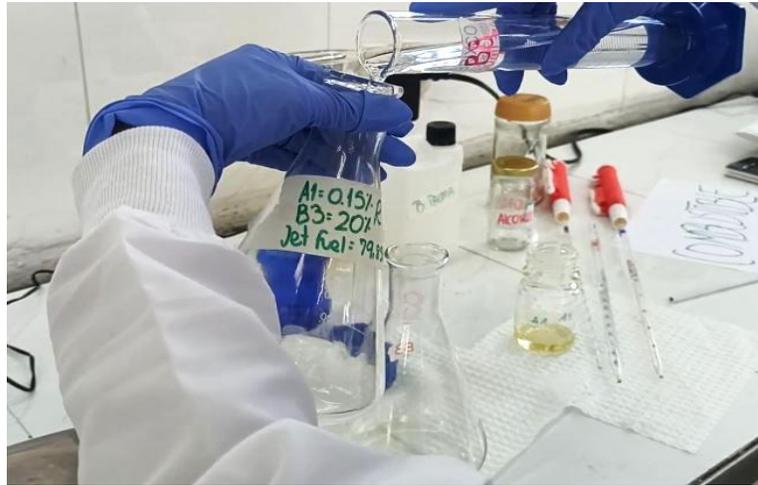
ANEXO 9.
PESAJE DEL ALCOHOL CARBURANTE



Nota. Fotografía del pesaje del alcohol carburante en la balanza analítica.

ANEXO 10.

ADICIÓN DEL ALCOHOL CARBURANTE EN LA MEZCLA 20% (V/V)



Nota. Fotografía de la adición del alcohol carburante en la mezcla 20% (v/v) con presencia del aditivo A1.

ANEXO 11.
PESAJE DEL JET FUEL A1



Nota. Fotografía del pesaje del jet fuel A1 en la balanza analítica.

ANEXO 12.
ADICIÓN DEL JET FUEL A1 A LA MEZCLA 20% (V/V) DE ALCOHOL
CARBURANTE



Nota. Fotografía de la adición del jet fuel A1 a la mezcla 20% (v/v) de alcohol carburante en presencia del aditivo A1.

ANEXO 13.
PROCESO DE ADITIVACIÓN CON ADITIVO A2



Nota. Fotografía del proceso de aditivación para el caso del biocombustible de palmiste en presencia del aditivo A2.

ANEXO 14.

ADICIÓN DEL BIOCOMBUSTIBLE DE PALMISTE EN LA MEZCLA 20% (V/V)



Nota. Fotografía de la adición del biocombustible de palmiste en la mezcla 20% (v/v) con presencia del aditivo A2.

ANEXO 15.
**ADICIÓN DEL JET FUEL A1 A LA MEZCLA 20% (V/V) DE BIOCOMBUSTIBLE
DE PALMISTE**



Nota. Fotografía de la adición del jet fuel A1 a la mezcla 20% (v/v) de biocombustible de palmiste en presencia del aditivo A2.

ANEXO 16.
OPERACIÓN DE MEZCLA DE LOS COMPONENTES



Nota. Fotografía de la operación de mezcla del jet fuel, biocombustible y aditivo.

ANEXO 17.

ADICIÓN DEL BIOCOMBUSTIBLE DE PALMA EN LA MEZCLA 20% (V/V) SIN PRESENCIA DE ADITIVO



Nota. Fotografía de la adición del biocombustible de palma en la mezcla 20% (v/v) sin la presencia de aditivos.

ANEXO 18.

ADICIÓN DEL JET FUEL A1 A LA MEZCLA 20% (V/V) DE BIOCOMBUSTIBLE DE PALMA SIN PRESENCIA DE ADITIVOS



Nota. Fotografía de la adición del jet fuel A1 a la mezcla 20% (v/v) de biocombustible de palma sin la presencia de aditivos.

ANEXO 19.
OPERACIÓN DE MEZCLA DE LOS COMPONENTES SIN PRESENCIA DE
ADITIVOS



Nota. Fotografía de la operación de mezcla del jet fuel y biocombustible.

ANEXO 20.
ADICIÓN DEL BIOCOMBUSTIBLE DE PALMISTE A LA MEZCLA 50/50 SIN
PRESENCIA DE ADITIVO



Nota. Fotografía de la adición del biocombustible de palmiste al 10% sin la presencia de aditivos.

ANEXO 21.

ADICIÓN DEL ALCOHOL CARBURANTE A LA MEZCLA 50/50 SIN PRESENCIA DE ADITIVO



Nota. Fotografía de la adición del alcohol carburante al 10% sin la presencia de aditivos.

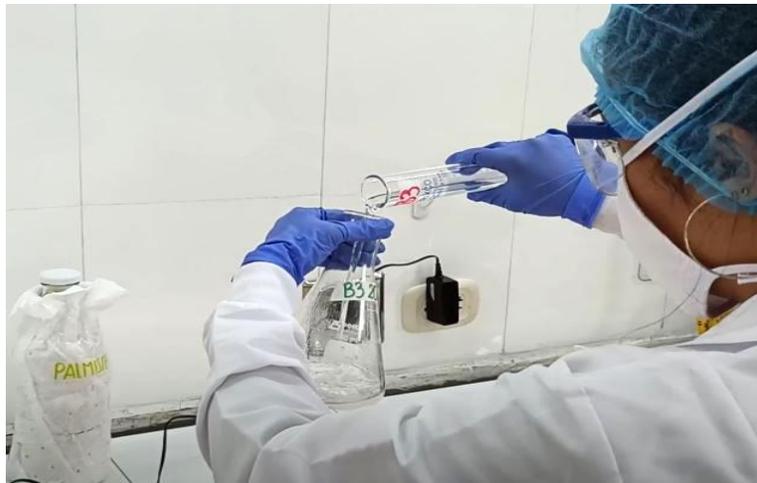
ANEXO 22.

ADICIÓN DEL JET FUEL A1 A LA MEZCLA 50/50 DE BIOCOMBUSTIBLE DE PALMISTE Y ALCOHOL CARBURANTE SIN PRESENCIA DE ADITIVO



Nota. Fotografía de la adición del jet fuel A1 a la mezcla con 10% de biocombustible de palmiste y 10% de alcohol carburante sin la presencia de aditivos.

ANEXO 23.
ADICIÓN DEL ALCOHOL CARBURANTE EN LA MEZCLA 20% (V/V) SIN
PRESENCIA DE ADITIVO



Nota. Fotografía de la adición del alcohol carburante en la mezcla 20% (v/v) sin la presencia de aditivos.

ANEXO 24.
ADICIÓN DEL JET FUEL A1 A LA MEZCLA 20% (V/V) DE ALCOHOL
CARBURANTE SIN PRESENCIA DE ADITIVO



Nota. Fotografía de la adición del jet fuel A1 a la mezcla 20% (v/v) de alcohol carburante sin la presencia de aditivos.

ANEXO 25.
ESPECIFICACIÓN ESTÁNDAR PARA COMBUSTIBLES DE TURBINAS DE AVIACIÓN

Especificaciones NORMA ASTM D-1655	
Punto de congelamiento máx:	
JET A	-40°C
JET A-1	-47°C
Concentración máx diethylene Glycol Monomethyl Ether (aditivo):	0.15%

Nota. Requisitos mínimos para combustibles de turbinas de aviación según la norma ASTM D1655.
Elaboración propia.

ANEXO 26.

RECOMENDACIONES

En vista del comportamiento notoriamente desfavorable para el caso del biocombustible de palma, no es recomendable implementarlo después de un almacenamiento prolongado en vista de que se puede ver afectada su estabilidad química al estar en contacto con el ambiente y materiales propios de los contenedores, generando reacciones de oxidación, formación de ácidos indeseables (Rodríguez, Sierra, & Cantor, 2010) y por ende depósitos en los tanques que pueden afectar significativamente la calidad del biocombustible. Por este motivo el sector industrial colombiano sugiere almacenar el biocombustible a una temperatura máxima de 20°C y bajo contenido de humedad.

Para poder hacer uso del biodiesel de palma es necesario evaluar otros aditivos supresores de hielo y de manera alterna realizar un estudio de la concentración de biocombustible a equipar.

Se recomienda realizar un muestreo y un análisis de la capacidad de absorción de agua de los compuestos utilizados en el estudio, el cual, notablemente, puede alterar los resultados de punto de congelamiento.

Se recomienda estudiar a profundidad la reacción que ocurre al poner en contacto el alcohol carburante en concentraciones del 15 % y 20% con el aditivo A1 y Jet fuel, por la formación de cristales que genera esta mezcla.

Es aconsejable realizar un estudio frente a las alternativas de obtención de aceite de palmiste para la comercialización en masa del biocombustible, con el fin de reducir costos en la producción.

Se sugiere indagar el tipo de motor en el cual se implementa cada aditivo para así conocer si trabaja bajo condiciones extremas en transportes comerciales o militares.

Se recomienda realizar un estudio de los componentes químicos de los aditivos para verificar e indicar si las sustancias que emplea son perjudiciales tanto para la salud humana como para el medio ambiente.

Se recomienda analizar el punto de congelamiento entre 0% y 5% de biocombustible, para determinar el punto adecuado entre estos porcentajes, con el fin de involucrar los biocombustibles colombianos en porcentajes bajos, para que brinden una confiabilidad alta y la posibilidad al país de aparecer en el escenario internacional.