

Evaluación de la tensión superficial en mezclas de Jet A1 con terpenos hidrogenados y no hidrogenados para determinar su posible aplicación como biocombustible

Luna Sofia Dávila Ortiz y Lauren Mayerly Mora Fuentes

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Químico

Director:

Duban Fabián García Navas
Doctor en Ingeniería Química

Codirector:

Ronald Alfonso Mercado Ojeda
Doctor en Ingeniería de Productos y Procesos

Tutor:

Magín Lapuerta Amigo
Doctor en Ingeniería

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas
Escuela de Ingeniería Química
Bucaramanga

2025

Dedicatoria

Dedico este trabajo a Dios, por darme la sabiduría, fortaleza y la guía necesaria en cada desafío que enfrenté.

A mi mamá, Carmen Fuentes, cuyo amor incondicional, esfuerzo y sacrificio han sido el pilar que me ha permitido llegar hasta aquí, siempre a mi lado con sus palabras de aliento, enseñándome el valor de la dedicación.

A mi papá, Dimas Mora, por siempre brindarme lo mejor de él y acompañarme en cada paso de este proceso, por su sabiduría y por ser un ejemplo constante de trabajo y esfuerzo incansable.

A mis hermanos, Sara Mora y Sebastián Mora, quienes han sido mi mayor motivación y mis compañeros de vida.

A mi compañera de proyecto, Luna Dávila. Sin su dedicación, esfuerzo y colaboración, este logro no habría sido posible.

A mis amigos, Vanesa Medina, Junior Romero y Juan Céspedes, quienes con su amistad, apoyo y complicidad hicieron que esta etapa universitaria se convirtiera en una experiencia invaluable.

Lauren Mayerly Mora Fuentes

Dedicatoria

Esta dedicatoria expresa un profundo agradecimiento a todas las personas que han sido un pilar fundamental en mi camino académico y personal. En primer lugar, reconozco a Dios como fuente de fortaleza y sabiduría para superar los desafíos encontrados a lo largo del proceso.

Asimismo, dedico este trabajo a mi padre, Carlos Dávila, resaltando su esfuerzo, sacrificio y amor, elementos clave en mi formación y crecimiento. A mi madre, Nhora Ortiz, le agradezco por su apoyo incondicional, compañía y palabras de aliento, que han sido un refugio constante.

También agradezco a mis hermanos, Carlos Felipe y Juan Manuel, destacando su papel como confidentes y fuente de ánimo en los momentos más difíciles. De igual manera, reconozco a mi pareja, Juan Quintero, por brindarme amor, comprensión y apoyo en cada etapa del proceso.

Finalmente, extiendo mi gratitud a mi compañera de proyecto, Lauren Mora, por su amistad y dedicación, así como a mis amigos, quienes con su compañía y respaldo contribuyeron a mi perseverancia en los momentos más retadores.

Luna Sofía Dávila Ortiz

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más profundo agradecimiento a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de este proyecto de grado.

En primer lugar, extendemos nuestra gratitud al profesor Duban García, quien, como director, nos brindó su guía, paciencia y apoyo incondicional a lo largo de todo el proceso. Asimismo, agradecemos a los profesores Ronald Mercado y Magín Lapuerta, nuestros codirectores, por su invaluable conocimiento, orientación y colaboración en cada etapa del trabajo.

A la Universidad Industrial de Santander, y en particular a la Escuela de Ingeniería Química, le reconocemos el haber proporcionado las herramientas y el entorno académico que fueron esenciales para nuestra formación. También queremos destacar la labor del laboratorio Grupo Recobro Mejorado y del grupo FIRST, por facilitarnos los recursos y el espacio necesario para llevar a cabo este estudio.

De igual manera, agradecemos a la Universidad de Castilla-La Mancha por su apoyo académico y a Ecopetrol S.A., cuya contribución fue fundamental para el desarrollo de esta investigación.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	
1. Objetivos	13
1.1 Objetivo General	13
1.2 Objetivos Específicos	13
2. Marco conceptual	13
2.1 Tensión superficial	13
2.2 Efecto de diversas variables en la tensión superficial	14
3. Estado del arte	15
4. Metodología	18
4.1 Materiales y equipos	18
4.3 Protocolos de medición	21
4.3.1 Densidad	21
4.3.2 Tensión superficial	22
4.4 Análisis estadístico	23
5. Resultados y análisis	25
5.1 Tensión superficial de las sustancias	25
5.2 Tensión superficial de las mezclas	29
5.3 Efecto de las interacciones de factores en la tensión superficial	35
6. Conclusiones	45
7. Recomendaciones	47
Referencias Bibliográficas	
Apéndices	

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Propiedades de las materias primas a 25°C	18
Tabla 2. Factores y niveles para el análisis estadístico	23

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Estructura molecular de los terpenos hidrogenados	18
Figura 2. Gráficos de cubo para la representación del número de experimentos por tipo de diseño	24
Figura 3. Tensión superficial experimental y de referencia a 25°C	26
Figura 4. Tensión superficial a 25°C según: a) número de carbonos y b) porcentaje de hidrógeno	27
Figura 5. Tensión superficial a 25°C según: a) relación C/H y b) cantidad de insaturaciones	28
Figura 6. Perfil de tensión superficial a 25°C en función de las concentraciones en mezclas Jet A1 según: a) trementina, b) aceite de naranja y c) CST	30
Figura 7. Tensión superficial en mezclas con Jet A1, con variaciones en concentración e hidrogenación, a temperaturas de: a) 25°C, b) 42.5°C y c) 60°C	32
Figura 8. Análisis residual para: a) Trementina, b) CST y c) Aceite de naranja	34
Figura 9. Análisis de probabilidad normal para: a) Trementina, b) CST y c) Aceite de naranja	35
Figura 10. Pareto de efectos estandarizados para: a) Trementina b) CST y c) Aceite de naranja	36
Figura 11. Influencia de factores simples para: a) Trementina, b) CST y c) Aceite de naranja	39
Figura 12. Influencia de factores combinados AB, AC y BC para: a) Trementina, b) CST y c) Aceite de naranja	40
Figura 13. Gráfico de superficie de respuesta a 25 °C para la trementina	42
Figura 14. Gráfico de superficie de respuesta a 25 °C para el CST	44
Figura 15. Gráfico de superficie de respuesta a 25 °C para el CST	45

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Sustancias usadas en la experimentación: A) Jet A1 y B) sustancias hidrogenadas y no hidrogenadas	49
Apéndice B. Muestras de sustancias: A) mezclas y B) balón aforado	49
Apéndice C. Herramientas usadas para el lavado: A) acetona y B) vasos precipitados	50
Apéndice D. Equipos para la medición de la densidad: A) plancha de calentamiento, B) balanza y C) horno	50
Apéndice E. Instrumentos para la medición de la densidad: A) termómetro, B) picnómetro y C) micropipeta	51
Apéndice F. Equipos para la medición de la tensión superficial: A) OCA 25 y B) baño termostatzado	52
Apéndice G. Instrumentos para la medición de la tensión superficial: A) jeringa y B) aguja	52
Apéndice H. Datos técnicos del equipo OCA 25	53
Apéndice I. Interfaz del software dpiMAX	54

Resumen

Título: Evaluación de la tensión superficial en mezclas de Jet A1 con terpenos hidrogenados y no hidrogenados para determinar su posible aplicación como biocombustible^{1*}

Autor: Luna Sofia Dávila Ortiz y Lauren Mayerly Mora Fuentes^{2*}

Palabras Clave: Tensión superficial, moléculas terpénicas, Jet A1, temperatura, concentración, nivel de hidrogenación.

Descripción:

El presente proyecto estudió el comportamiento de la tensión superficial de Jet A1 al mezclarse con moléculas terpénicas, considerando el efecto de su contenido, la temperatura y la concentración. El objetivo del análisis es evaluar el potencial de estos compuestos como aditivos o constituyentes de combustibles para motores a través del efecto de la tensión superficial en el desempeño del combustible. Su incorporación puede contribuir a la reducción de emisiones como el material particulado y a mejorar la sostenibilidad de su uso. El estudio se llevó a cabo mediante un diseño experimental factorial completo 3³, en el que se evaluaron los sustratos trementina, aceite de naranja y CST, tanto en su forma hidrogenada como no hidrogenada, bajo diferentes condiciones de temperatura y concentración. Los resultados mostraron que tanto la temperatura como la concentración de cada sustrato generan cambios notorios en la tensión superficial de la mezcla, además del nivel de hidrogenación, el cual puede modular las propiedades interfaciales del combustible. Finalmente, aunque todos los factores estudiados influyeron en la tensión superficial, el nivel de hidrogenación tiene un impacto sobresaliente en comparación a la concentración de sustrato en la mezcla, siendo el factor predominante en las variaciones observadas.

^{1*} Trabajo de Grado

^{2**} Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Programa académico. Director: Duban Fabián García Navas. Doctor en Ingeniería Química. Codirector: Ronald Alfonso Mercado Ojeda. Doctor en Ingeniería de Productos y Procesos. Tutor: Magín Lapuerta Amigo. Doctor en Ingeniería.

Abstract

Title: Evaluation of surface tension in mixtures of Jet A1 with hydrogenated and non-hydrogenated terpenes to determine its possible application as biofuel^{3*}

Author(s): Luna Sofía Dávila Ortiz y Lauren Mayerly Mora Fuentes^{4**}

Key Words: Surface tension, terpene molecules, Jet A1, temperature, concentration, hydrogenation level.

Description:

This project studied the surface tension behavior of Jet A1 when mixed with terpene molecules, considering the effects of their content, temperature, and concentration. The objective of the analysis is to evaluate the potential of these compounds as additives or constituents of fuels for aviation engines, such as turbines. Their incorporation can contribute to the reduction of emissions, such as particulate matter, and to improve the sustainability of its use as fuel. The study was carried out using a 3³ full factorial experimental design, in which turpentine, orange oil, and CST were evaluated, both in their hydrogenated and non-hydrogenated forms, under different temperature and concentration conditions. The results showed that both the temperature and concentration of each substrate generate notable changes in the surface tension of the mixture, in addition to the level of hydrogenation, which can modulate the interfacial properties of the fuel. Finally, although all the factors studied influenced surface tension, the level of hydrogenation has a significant impact compared to the substrate concentration in the mixture, being the predominant factor in the observed variations.

^{3*} Degree Work

^{4**} Faculty of Physical and Chemical Engineering. School of Chemical Engineering. Chemical Engineering. Director: Duban Fabián García Navas. PhD in Chemical Engineering. Co-director: Ronald Alfonso Mercado Ojeda. PhD in Product and Process Engineering. Tutor: Magin Lapuerta Amigo. PhD in Engineering.

Introducción

El crecimiento acelerado de la industria de la aviación, con un aumento proyectado de pasajeros de 3.800 millones en 2016 a 8.200 millones en 2037, está generando un incremento significativo en el consumo de combustibles fósiles (Gunerhan, A., Altuntas, O., & Caliskan, H., 2023). Esta tendencia, junto con el agotamiento de los recursos petrolíferos, plantea una crisis energética para el sector en el mediano y largo plazo. Además, la quema de estos combustibles contribuye de manera considerable a las emisiones de CO₂, contribuyendo al cambio climático a través del efecto invernadero. La necesidad de fuentes de combustibles renovables y sostenibles se vuelve crucial, ya que estos combustibles alternativos no solo ofrecen una vía para garantizar el suministro energético en el futuro, sino que también representan una estrategia clave para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, contribuyendo así a mitigar el impacto ambiental de la aviación comercial. Sin embargo, a pesar de su potencial, el uso de combustibles alternativos en la aviación actualmente no supera el 1%, lo que resalta la urgencia de investigaciones y desarrollos en esta área (Quante, G., Bullerdiek, N., Bube, S., Neuling, U., & Kaltschmitt, M., 2023).

Por otra parte, las turbinas de aviación son los motores que impulsan la mayoría de los aviones comerciales. Funcionan a través de un proceso de compresión, combustión y expansión de aire, que genera empuje y proporciona la fuerza necesaria para el vuelo. El desempeño de la turbina depende del combustible y sus propiedades, por ejemplo, la tensión superficial (Rückert, M., Reinertz O. & Schmitz, K., 2021). La tensión superficial en los combustibles de avión determina propiedades importantes como el comportamiento del líquido en flujo en frío, la atomización de este, su rendimiento en la combustión, entre otras (Moldanová et al., 2025). Medir la tensión superficial en estos combustibles es de vital importancia para predecir el

comportamiento de dichas propiedades, ya que puede contribuir a alcanzar una combustión más completa y un mayor rendimiento, evitando la emisión de contaminantes a la atmósfera como monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y demás partículas (Quante, G., Bullerdiek, N., Bube, S., Neuling, U., & Kaltschmitt, M., 2023).

Por tanto, este trabajo tiene como objetivo estudiar el efecto de los terpenos hidrogenados y no hidrogenados en la tensión superficial en mezclas del combustible Jet A1, analizando tanto el contenido de los terpenos como su contenido de insaturaciones influyen en esta propiedad, ofreciendo así nuevas alternativas para mejorar el rendimiento del combustible y disminuir el impacto ambiental, respondiendo a la creciente demanda de soluciones sostenibles en la industria de los combustibles de aviación.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Analizar la tensión superficial de mezclas de Jet A1 con terpenos hidrogenados y no hidrogenados para determinar su posible aplicación como biocombustible.

1.2 Objetivos Específicos

Diseñar un esquema experimental que permita la medición de la tensión superficial de mezclas de Jet A1 con terpenos hidrogenados y no hidrogenados, estableciendo condiciones de temperatura, composición de la mezcla, fuente de materia prima y estado de hidrogenación.

Medir la tensión superficial de las mezclas de Jet A1 con terpenos hidrogenados y no hidrogenados, realizando experimentos bajo diferentes condiciones para recopilar datos que permitan evaluar su comportamiento en función de las variables estudiadas.

Analizar las principales variables que afectan la tensión superficial de mezclas de Jet A1 con terpenos hidrogenados y no hidrogenados mediante un análisis estadístico a partir de las mediciones experimentales.

2. Marco conceptual

2.1 Tensión superficial

La tensión superficial es una propiedad interfacial de los líquidos que muestra la tendencia elástica que se crea por las fuerzas de atracción de las moléculas en la superficie. Se mide mediante la cuantificación de la fuerza de atracción paralela a la superficie, derivada de las fuerzas de interacción molecular (σ en N/m). Esta propiedad es determinante para encontrar la forma de una gota de líquido, que influye sustancialmente en la transferencia de calor y de masa

de un sistema térmico (Mahbubul, 2019). Por lo tanto, el análisis del comportamiento de la tensión superficial implica la consideración de factores como presión, temperatura, la presencia de impurezas y el tipo de moléculas involucradas en las sustancias (Cengel & Cimbala, 2018).

2.2 Efecto de diversas variables en la tensión superficial

Una de las principales variables que influye en la tensión superficial es la temperatura. A medida que la temperatura aumenta, la energía cinética de las moléculas del líquido se incrementa, debilitando las fuerzas intermoleculares y reduciendo la tensión superficial. Este comportamiento se observa en líquidos como el agua, donde un aumento de temperatura disminuye su capacidad de formar gotas esféricas o soportar pequeñas cargas en su superficie (Zazueta & Sepúlveda, 2004).

Por otra parte, la composición química del líquido también desempeña un papel fundamental en la tensión superficial. Sustancias con enlaces intermoleculares fuertes presentan una tensión superficial elevada en comparación con líquidos con interacciones más débiles, como el etanol o los hidrocarburos. Además, la presencia de impurezas o aditivos puede alterar significativamente esta propiedad (J. A. D. García et al., 2012). En efecto, la estructura molecular influye en la tensión superficial según el tamaño de moléculas y las fuerzas intermoleculares presentes entre las mismas. Según Levin, la mayoría de los compuestos orgánicos e inorgánicos difieren su tensión superficial entre 15 y 50 mN/m en los cuales se encuentran incluidas las moléculas a trabajar en este proyecto junto al Jet A1. Además, se resalta que, en los casos de moléculas grandes, la sumatoria de fuerzas de Van Der Waals o London pueden superar a las fuerzas por enlaces de hidrógeno.

La concentración en las mezclas también es un factor importante sobre la tensión superficial, por lo que se debe tener en cuenta los efectos de la polaridad, debido a que, a su vez, estos permiten determinar si las fuerzas moleculares son afectadas por el mezclado. Por ejemplo, en el caso de las mezclas únicamente no polares (i.e., de fuerzas de Van Der Waals) las fuerzas entre moléculas son comparables a las de los líquidos puros, de la misma manera que las mezclas de líquidos no polares (i.e., de fuerzas dipolo–dipolo o fuerzas de enlace de hidrógeno) reflejan tensiones superficiales similares o incluso mayores. En cambio, las mezclas no semejantes (i.e., polar junto con no–polar) disminuyen las fuerzas de cohesión en la superficie, lo que afecta negativamente la tensión superficial (Chang & Goldsby, 2013).

En cuanto a la mezcla de moléculas terpénicas y Jet A1, se espera que especies como el α - pineno, β -pineno y limoneno modifiquen el comportamiento del Jet A1. En efecto, estas moléculas comúnmente encontradas en aceites esenciales de plantas y resinas poseen estructuras que incluyen múltiples unidades de isopreno (lo que les otorga una amplia gama de propiedades fisicoquímicas) que pueden ser capaces de alterar la cohesión del Jet A1 y junto a esto su tensión superficial (Meylemans et al., 2012).

3. Estado del arte

El uso de biocombustibles se presenta como una solución viable y urgente para la aviación, dado el creciente impacto ambiental provocado por este sector. Los biocombustibles, especialmente el combustible de aviación sostenible (SAF), tienen el potencial de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero hasta en un 94 % en comparación con los combustibles convencionales, lo que contribuye significativamente a los objetivos de desarrollo sostenible en la industria de la aviación (Xu et al., 2024). La aviación, que representa aproximadamente el 2%

de las emisiones globales de CO₂, enfrenta un aumento en la demanda de transporte aéreo que se prevé crezca un 5% anual en las próximas décadas, lo que amplifica la necesidad de soluciones efectivas para mitigar su impacto ambiental (Deane & Pye, 2018). Además, la introducción de biocombustibles no solo permite una disminución de la huella de carbono, sino que también proporciona estabilidad económica en un contexto de fluctuación de precios de los combustibles fósiles. Al producir biocombustibles a partir de recursos renovables, se pueden reducir costos y fomentar el desarrollo económico, especialmente en países en desarrollo, donde hay tierras inutilizables que pueden ser cultivadas con cultivos no alimentarios (Hari et al., 2014). Por lo tanto, los biocombustibles no solo representan una opción sostenible, sino que también son una estrategia crucial para abordar las preocupaciones sobre la seguridad energética y la sostenibilidad en el transporte aéreo, un sector que se considera uno de los más difíciles de descarbonizar (Wise et al., 2017).

Un factor clave en este proceso es la atomización, ya que es fundamental para lograr una buena combustión y un buen funcionamiento del motor. La atomización del combustible es un proceso en el cual se dispersa el fluido por medio de la energía entregada, transformándose en pequeñas gotas dentro de un rango de tamaños que dependen del tipo de atomizador, así como de las condiciones internas del motor y del combustible (Siccha, M., Lock, O., 2010). La importancia de las propiedades físicas en este proceso es de gran relevancia, siendo la atomización una propiedad muy importante para que el proceso de combustión sea eficiente. Una calidad inferior de atomización plantea problemas relacionados con la ignición, ineficiencia de la combustión, contaminación ambiental, entre otros (Dafsari et al., 2019). Un ejemplo de esto es la formación de depósitos de carbono en las cámaras de combustión o en las boquillas de inyección de combustible (Mansoor, M. & Ejaz, N., 2011), que son provocados por una mala combustión.

Por lo tanto, lograr una atomización óptima del combustible es clave para el desarrollo de cámaras de combustión avanzadas y, en consecuencia, la reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera.

Una de las propiedades que permite revisar la atomización es la tensión superficial, propiedad fundamental en los combustibles, ya que determina el comportamiento de estos en numerosos procesos y fenómenos. Esta propiedad fisicoquímica describe la fuerza de atracción entre moléculas semejantes y se relaciona con la estructura molecular y las interacciones de estas (Israelachvili, J., 2011). La tensión superficial puede afectar en gran parte el rendimiento y la eficiencia de los motores de aviación.

Una de las formas en la que la tensión superficial puede influir en el desempeño del motor es mediante la estabilidad del flujo de combustible. Un valor muy bajo en la tensión superficial puede provocar la formación de burbujas y espuma, lo que genera fluctuaciones en la presión y afecta la estabilidad del flujo dentro del motor. Por otro lado, la formación de depósitos y la contaminación son factores que se deben tener en cuenta cuando la tensión superficial es alta y la atomización dentro del motor es deficiente (Dafsari et al., 2019). En efecto, diversas sustancias pueden ayudar a mejorar la tensión superficial de los combustibles, por lo que es importante evaluar el efecto de sustancias renovables.

Por ejemplo, biomoléculas como la trementina, que es un producto natural compuesto principalmente por monoterpenos C10, puede influenciar esta propiedad. Los principales monoterpenos de la trementina son α -pineno y β -pineno, con cantidades muy pequeñas de D-limoneno, canfeno y mirceno. También, la trementina está compuesta en pequeñas partes de sesquiterpenos C15, como cariofileno y longifileno. Esta puede ser obtenida a partir de diferentes

procesos, como la destilación de resina de pino al vacío (Da Rocha et al., 2014) y como subproducto (CST) en la extracción pulpa blanda de madera.

4. Metodología

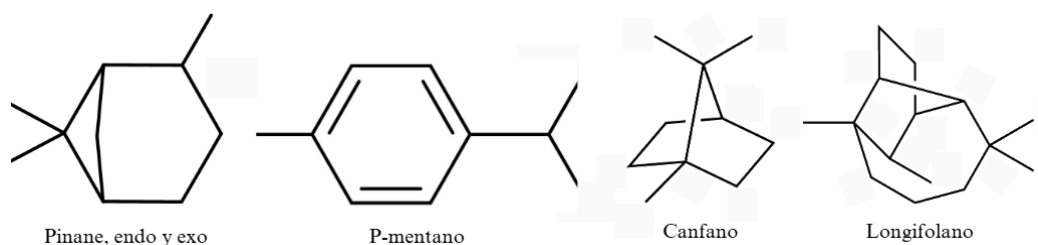
4.1 Materiales y equipos

Las muestras empleadas para el estudio son sustancias en grado técnico, tales como trementina adquirida de Resinas Naturales S.L. (Cuellar, España), aceite de naranja suplido por Industria Resinera Valcán SA (Cuenca, España); y trementina cruda sulfatada (CST) extraída durante el proceso de fabricación de pulpa Kraft de madera blanda, que se utiliza para la fabricación de papel y cartón (Smurfit-Kappa, Sangüesa, Navarra, España). Además, se usaron muestras hidrogenadas de estas sustancias en niveles bajos (0% - 5.5%), medios (50% - 55.8%) y altos (92% - 94%) (ver Apéndice A).

La hidrogenación de trementina, aceite de naranja y CST se realizó en trabajos anteriores mediante procesos catalíticos y puede ser consultadas en los trabajos de Donoso *et al* (Donoso et al., 2020, 2022, 2023). La composición de las muestras hidrogenadas varía entre sustrato, sin embargo, las principales moléculas obtenidas de la reacción química son endo y exo pinane, mentano, canfano y longifolano, cuyas estructuras se muestran en la Figura 1. Adicionalmente, se usaron muestras de Jet A1 sin aditivos, muestra suministrada por Ecopetrol S.A. y extraída directamente de la Refinería de Barrancabermeja, Colombia.

Figura 1.

Estructura molecular de los terpenos hidrogenados



Algunas de las propiedades de las sustancias anteriores se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1.

Propiedades de las materias primas a 25 °C

Propiedad	Jet A1	Hidro trementina	Trementina	Aceite de naranja	CST
Fórmula molecular media	$C_{12}H_{23}$	$C_{10}H_{18}$	$C_{10}H_{16}$	$C_{10}H_{16}$	$C_{12}H_{20}O_7$
Contenido de C [% peso]	86	79	88	87	86
Contenido de H [% peso]	14	11	12	12	11
Contenido de O [% peso]	0	0.02	0	1	2
Peso molecular [kg/kmol]	170	154	136	136	276
Densidad [kg/m ³]	780 – 840	860 – 880	860 – 900	830 – 850	855 – 870
Viscosidad cinemática [cSt]	1.8	2.0	2.5	2.0	2.2
Lubricidad (diámetro de desgaste) [μm]	440	350	ND	350	400
Poder calorífico inferior [MJ/kg]	43.1	40.0	44	41.3	39.5
Punto de nube [°C]	-40	-20	38	-30	-20
Punto de fluidez [°C]	-47	-30	ND	-60	-50
Punto de obstrucción del filtro frío [°C]	-40	-25	ND	-30	-25
Punto de cristalización [°C]	-50	-35	ND	-95	-60
Punto de inflamabilidad [°C]	38	35	38	38	32
Presión de vapor [kPa]	<1	<1	<1	<1	<1
Punto de humo [mm]	25.5	22.3	ND	ND	15

Nota: Adaptado de (D. Donoso, D. García, et al., 2020)

Además, se prepararon mezclas de Jet A1 con los sustratos evaluados en el presente trabajo (i.e., trementina, aceite de naranja y CST), así como las mezclas de Jet A1 con las

sustancias hidrogenadas (i.e., los productos de la reacción de hidrogenación de los tres sustratos) en concentraciones del 2.5%, 5%, 8.75%, 10%, 15%, 20%, 50% y 80% en volumen. Las cantidades fueron ajustadas dentro de los rangos de volumen adecuados para ser aforados en balones volumétricos de 10 ml, utilizando micropipetas Transferpipette modelo BRAND (1000 μ l y 10 ml) (ver Apéndice B). Por otra parte, para la manipulación de todas las sustancias se emplearon vasos de precipitado de 50 ml, previamente limpiados con agua y jabón, y enjuagados con acetona al 99.9% (proporcionada por SUQUIN S.A.S.).

Las mediciones se realizaron en los laboratorios del Grupo de Recobro Mejorado (GRM) y del Grupo de investigación de los Fenómenos Interfaciales, Reología y Simulación de Transporte (FIRST), en la sede Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander. Inicialmente, se utilizó un picnómetro LMS de 10 ml y una balanza analítica electrónica digital AGROTECH, con una capacidad de 0.1 a 2000 g para la medición de la densidad de las muestras. Por su parte, el control de la temperatura se llevó a cabo mediante una placa calefactora de cerámica AREC 7 (VELP SCIENTIFICA), equipada con un agitador magnético con capacidad volumétrica de 15 litros, un rango de velocidad de agitación de 50 a 1500 rpm y una temperatura máxima de 550 °C. Adicionalmente, para garantizar la estabilidad térmica de las muestras, se empleó un horno de convección por gravedad ThermoFisher Heratherm OGS60, el cual también fue utilizado para el secado de los materiales. (ver Apéndices D y E).

Para la medición de la tensión superficial, se empleó el método de la gota pendiente, esto debido a su rapidez, precisión y capacidad de resolución dentro de los rangos de trabajo, además de requerir una cantidad mínima de muestra. Estas características lo hacen adecuado para los compuestos analizados en el estudio (i.e., Jet A1 y terpenos). El equipo utilizado es el OCA 25

de DataPhysics Instruments GmbH, que ofrece una excelente estabilidad en la formación de la gota, lo que favorece la medición precisa de la curvatura y mejora la exactitud de los resultados.

El dispositivo está compuesto por cuatro elementos principales: una plataforma de muestras, una cámara de alta resolución, un sistema de dosificación y un baño termostatzado. La plataforma de muestras incorpora un mecanismo de ajuste en tres direcciones mediante ejes de precisión con volante, lo que permite la instalación de accesorios como cámaras ambientales, termostatos, y dispositivos de retención de muestra. Por otra parte, la cámara de alto rendimiento ofrece un aumento hasta de seis veces, con un enfoque fino continuo integrado y un ángulo de observación ajustable. Además, cuenta con un sistema de medición por vídeo, capaz de actualizarse hasta 3000 fotogramas por segundo.

Para la dosificación de líquidos, el equipo dispone de cuatro sistemas de inyección: un sistema manual simple y doble, el sistema electrónico directo múltiple y el sistema de dosificación de nanolitros. Este último, seleccionado para el estudio, permite generar gotas ultra pequeñas sin afectar la precisión de la medición. Por último, el baño termostatzado incluido en el equipo, regula la temperatura en el sistema de dosificación del líquido, permitiendo mediciones dentro de un rango operativo de 25°C a 70°C (ver Apéndices H e I).

4.3 Protocolos de medición

4.3.1 Densidad

La medición de la densidad debe realizarse antes de la determinación de la tensión superficial, ya que es un parámetro de entrada en su proceso de medición. Para ello, se siguió un esquema cíclico que incluyó la preparación de la muestra, el lavado y secado de los materiales (incluyendo el picnómetro), el ajuste de la temperatura y la medición, siguiendo los lineamientos de la norma ASTM D1475 (ASTM International, 2013).

El secado de los materiales se llevó a cabo en el horno a 65°C durante 5 minutos, previamente impregnados con una solución de acetona/agua al 30% y 70% v/v, respectivamente. Luego, el picnómetro se pesó en seco, se llenó con la muestra y se ajustó la temperatura a los valores establecidos previamente (35°C y 60°C) utilizando la placa calefactora. La temperatura se monitoreó con un termómetro para garantizar precisión. Finalmente, el picnómetro lleno se llevó a la balanza para registrar su peso total. A partir de la diferencia entre los pesos medidos, se determinó la densidad de la muestra (ver Ecuación 1). Este procedimiento se aplicó a cada una de las muestras puras y sus mezclas en diferentes concentraciones y temperaturas.

$$\rho = \frac{P_{\text{picnómetro lleno}} - P_{\text{picnómetro vacío}}}{V_{\text{picnómetro}}} \quad \text{Ecuación 1}$$

4.3.2 Tensión superficial

Se empleó una jeringa de precisión DS 500/GT de 500 µl de DataPhysics Instruments, junto con una jeringa dosificadora SNS 050/026 de la misma marca, con un diámetro interno de 0.26 mm y externo de 0.50 mm. El procedimiento de medición inicia con el ensamblaje de la jeringa y la aguja, asegurando un ajuste correcto entre ambos componentes. Posteriormente, se llevó a cabo el proceso de limpieza de la jeringa mediante un ciclo de llenado y vaciado con la solución de acetona/agua, repetido tres veces para garantizar su adecuado acondicionamiento. A continuación, se repitió el mismo procedimiento con la muestra, asegurando la purga del sistema para eliminar posibles contaminantes que pudieran alterar los resultados.

Luego, se llevó a cabo el llenado de la jeringa y su montaje en el sistema de dosificación, dejando reposar aproximadamente 5 minutos para que la muestra alcanzara la temperatura deseada, mientras se configuraba el software. Posteriormente, se realizó la dosificación de la muestra para la formación y evaluación de las gotas, repitiendo el procedimiento tres veces con

gotas distintas para considerar la variabilidad del ensayo. Finalmente, se recopilieron los datos generados por el software, incluyendo la tensión superficial, el volumen de dosificación de cada gota y la temperatura de medición.

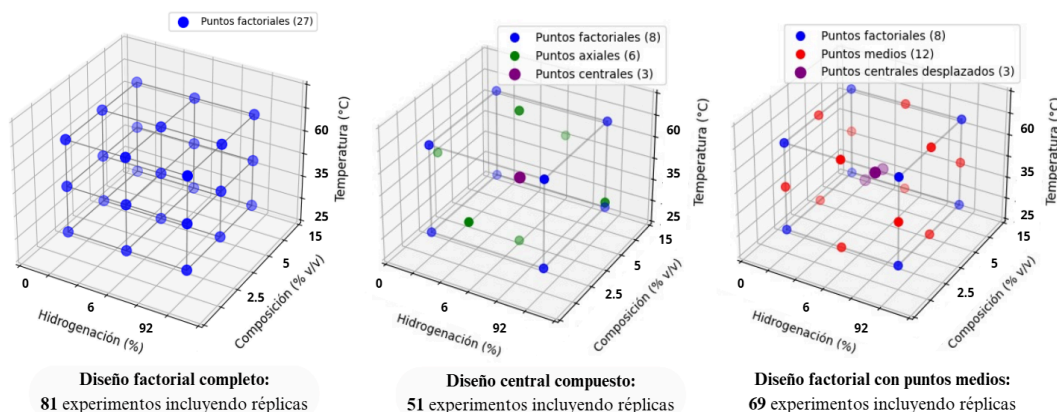
4.4 Análisis estadístico

Para el análisis de los efectos múltiples, se empleó un diseño factorial completo 3^3 , el cual permite evaluar simultáneamente factores, cada uno con tres niveles. Este tipo de diseño garantiza una exploración completa del espacio experimental, facilitando la identificación de tendencias y patrones en los datos. Además, al considerar todas las combinaciones posibles de los factores, se obtiene una mayor precisión en la estimación de los efectos, lo que contribuye a una mejor toma de decisiones en la optimización de las mezclas. En la Figura 2 se muestran los cubos que representan cada tipo de diseño de experimentos tomados en cuenta al momento de seleccionar, lo que permite visualizar mejor la distribución de los puntos experimentales.

Debido a la posible curvatura de la tensión superficial respecto a variables como la composición detectada en trabajos anteriores (Benavides, L. & Ortega, J., 2024), se decidió usar el diseño factorial completo, el cual permite evaluar simultáneamente tres factores, cada uno con tres niveles. Este tipo de diseño garantiza una exploración completa del espacio experimental, facilitando la identificación de tendencias y patrones en los datos, incluyendo comportamientos con curvaturas. Además, al considerar todas las combinaciones posibles de los factores, se obtiene una mayor precisión en la estimación de los efectos.

Figura 2.

Gráficos de cubo para la representación del número de experimentos por tipo de diseño



Por ende, se analizaron los efectos del tipo de sustrato presente en las mezclas con Jet A1 por separado, es decir, un cubo experimental por cada sustrato donde se analiza el grado de hidrogenación (no hidrogenado e hidrogenación media y alta, sujeto a las reacciones de hidrogenación), la temperatura (entre el rango de 25°C y 60°C debido a las limitaciones del equipo de medición) y la concentración de las muestras en el combustible (con concentraciones menores a 15% v/v debido a su relevancia en aplicaciones potenciales dentro del sector de los combustibles, ya que los compuestos hidrogenados pueden incorporarse hasta en un 15% v/v en mezclas con Jet A1 sin afectar el rendimiento de la turbina (Donoso et al., 2021)). Los valores de cada nivel para las variables estudiadas se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2.

Factores y niveles para el análisis estadístico

Variables de entrada	Nivel			Variable de salida
	Bajo	Medio	Alto	
Hidrogenación (%)	0-5	6-30	31-100	Tensión superficial
Concentración (%v/v)	2,5	8,75	15	
Materia prima	Trementina	Aceite de naranja	CST desulfurado	
Temperatura (°C)	25	42	60	

El diseño factorial abarca las 27 combinaciones posibles de niveles y factores, lo que permite estimar tanto los efectos individuales de cada factor como sus interacciones sobre la tensión superficial. En particular, se analizó cómo la variación de cada factor influye en los demás, identificando interacciones directas entre pares y combinaciones triples de factores. Adicionalmente, se llevó a cabo un análisis de varianza para evaluar la significancia de estas interacciones, con el objetivo de verificar que la variabilidad observada no se deba a errores en las mediciones. Para ello, se consideró un intervalo de confianza del 5%, lo que permite establecer un margen de error asociado a posibles imprecisiones manuales en la toma de datos (Montgomery, D., 2005)

5. Resultados y análisis

5.1 Tensión superficial de las sustancias

El estudio de la tensión superficial en sustancias “puras”, es decir, sin la presencia de disolventes, se lleva a cabo mediante mediciones experimentales de esta propiedad y su posterior comparación con valores de referencia extraídos de la literatura. Asimismo, los resultados se analizan en función de la estructura molecular y su influencia en la tensión superficial. Este análisis considera variables como el nivel de hidrogenación (que representa la cantidad de insaturaciones), la relación carbono-hidrógeno (C/H), el contenido de elementos como carbono e hidrógeno y el tamaño molecular, a través del número de átomos de carbono presentes.

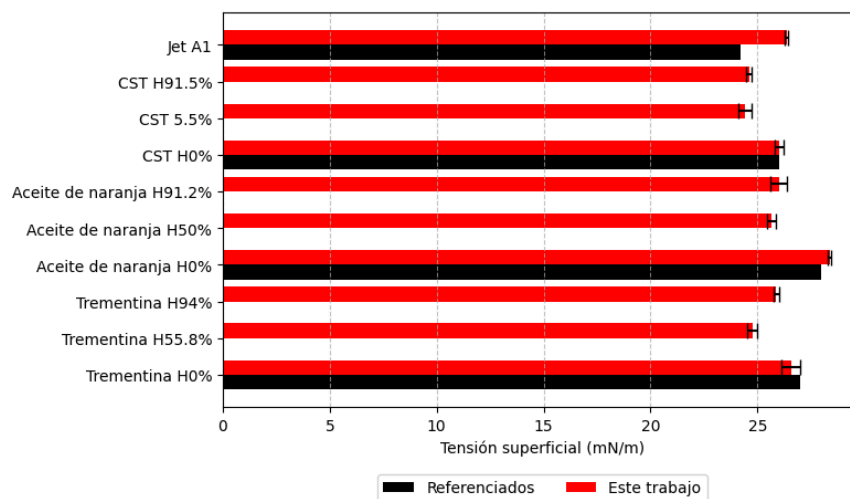
La Figura 3 muestra el comportamiento de la tensión superficial medida a 25 °C para cada muestra, comparándola con valores reportados en estudios previos (Wang et al., 2006; Yaws & Richmond, 1994). Las mediciones de las muestras que poseen valores reportados en la literatura (i.e., trementina, aceite de naranja y el mismo jet A1) muestran errores bajos, indicando una adecuada metodología experimental. En cualquier caso, también se debe considerar que estas

muestras dependen sustancialmente de la fuente, por lo que sus propiedades como la tensión superficial pueden diferir.

Adicionalmente, en la Figura 3 se observa que la trementina hidrogenada al 55.8% y el CST hidrogenado al 5.5% y 91.5% presentan una tensión superficial inferior a la de las demás sustancias, incluso a la del Jet A1. En contraste, el aceite de naranja puro exhibe la tensión superficial más alta, mientras que el CST sin hidrogenar, el aceite de naranja hidrogenado al 92% y la trementina hidrogenada al 94% muestran valores similares a los del Jet A1, lo que indica una mínima variación en la tensión superficial de sus mezclas.

Figura 3.

Tensión superficial experimental y de referencia a 25°C



Para evaluar el posible impacto de la estructura molecular en la tensión superficial, la Figura 4 muestra las mediciones realizadas a 25°C para diversas moléculas en función de la cantidad de carbonos y el contenido de hidrógeno. Este análisis es relevante, ya que distintos parámetros moleculares pueden influir en la tensión superficial, proporcionando información clave sobre posibles modificaciones en las materias primas de los combustibles de aviación. Por

ejemplo, se espera que el tamaño molecular tenga un efecto significativo en esta propiedad, dado que un aumento en la cantidad de puntos de contacto facilita la formación de enlaces intermoleculares más débiles en la superficie del líquido, lo que generalmente se asocia con una reducción en la tensión superficial (Patiño Camino, 2021).

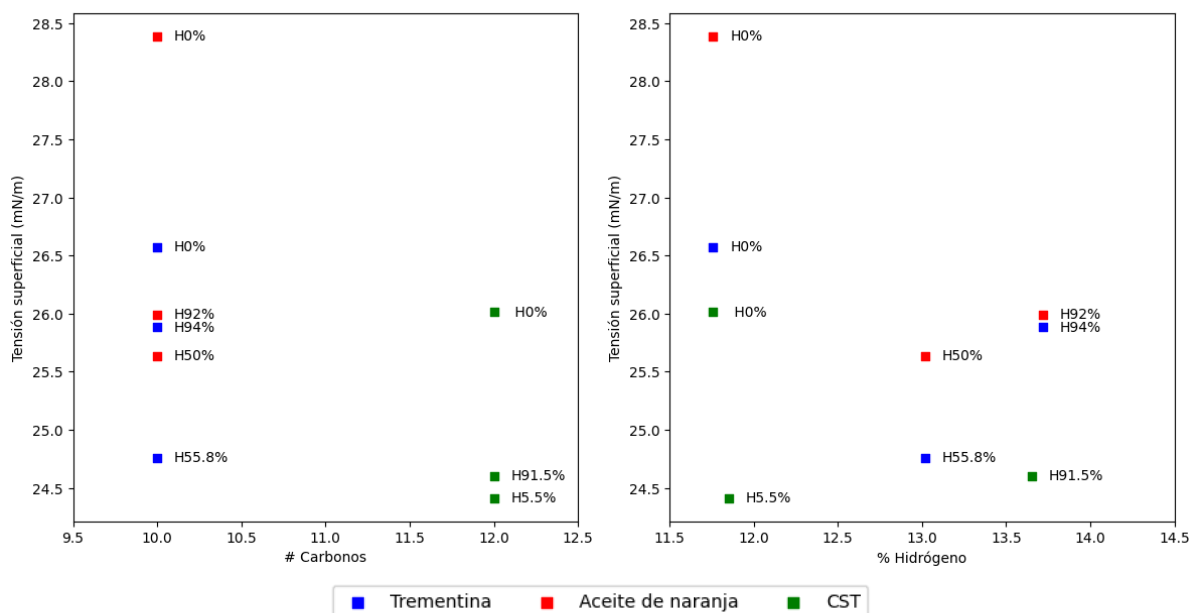
En la Figura 4a se presenta la relación entre la tensión superficial y el número de átomos de carbono en cada molécula analizada. Se observa que el aceite de naranja sin hidrogenar, con 10 carbonos en su estructura, posee la tensión superficial más elevada. Esto sugiere que la cantidad de carbonos en cada molécula, junto con la presencia de otros elementos como el hidrógeno, puede influir en este comportamiento. Por otro lado, el CST cuenta con 12 carbonos y 7 átomos de oxígeno en su estructura, lo que se traduce en tensiones superficiales menores cuando el compuesto es hidrogenado, debido a que muchos de los enlaces dobles pierden su cohesión e isometría molecular. Esta tendencia se confirma en la Figura 4b, donde se evidencia que el CST hidrogenado al 5.5% y 91.5% presenta tensiones superficiales de 24.4–24.6 mN/m, valor por debajo de la trementina y aceite de naranja sin hidrogenar (i.e., 26–28 mN/m).

Figura 4.

Tensión superficial a 25°C según: a) número de carbonos y b) porcentaje de hidrógeno

a)

b)



Adicionalmente, la relación carbono/hidrógeno también puede influir en la tensión superficial. Como se muestra en la Figura 5a, las sustancias con el mayor grado de hidrogenación presentan una menor relación C/H en comparación con las sustancias sin hidrogenar, cuyo valor en esta propiedad es mucho mayor. Esto puede indicar una menor intensidad en las interacciones internas de sus moléculas y, en consecuencia, una menor tensión superficial (Israelachvili, J., 2011).

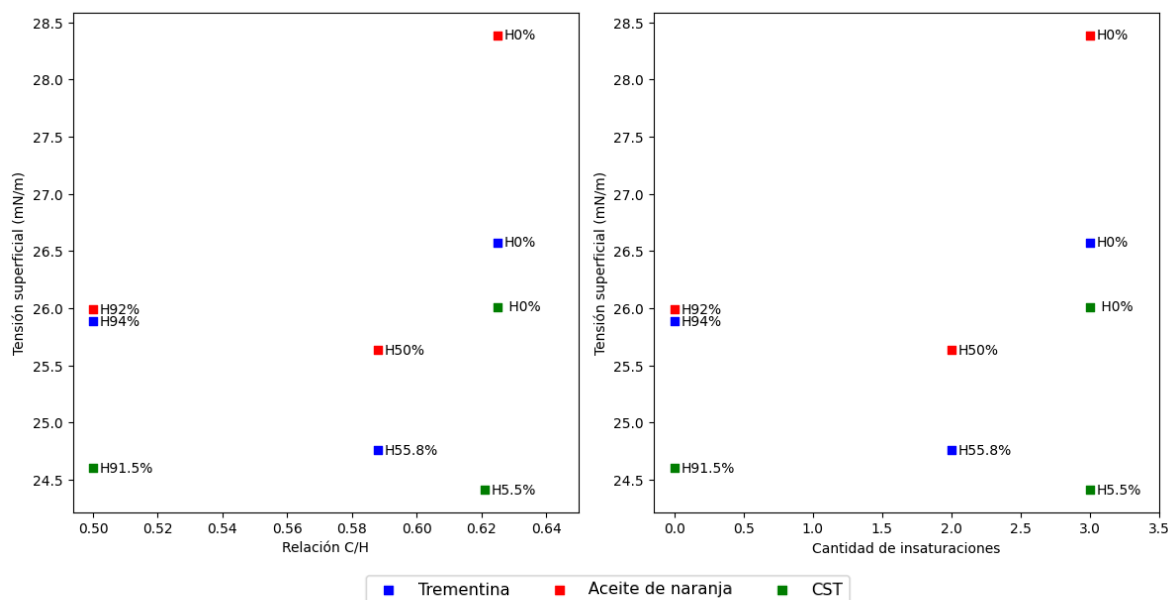
En cuanto a la cantidad de insaturaciones, la Figura 5b sugiere que este factor puede tener una influencia moderada en la tensión superficial. Por ejemplo, las sustancias sin hidrogenar tienden a presentar una tensión superficial alta (con tres insaturaciones en su estructura química, ver Figura 1) en comparación con las hidrogenadas en niveles medios (poseen solo dos).

Figura 5.

Tensión superficial a 25°C según: a) relación C/H y b) cantidad de insaturaciones

a)

b)



No obstante, el análisis también resalta que la ubicación de estas insaturaciones desempeña un papel clave. En el caso del aceite de naranja hidrogenado (p-mentano), ambas insaturaciones están dentro del anillo principal (ver Figura 1), mientras que en la misma sustancia sin hidrogenar (D- limoneno) una se encuentra dentro del anillo y la otra fuera de él. Esta diferencia estructural implica que el aceite de naranja hidrogenado al 50% tenga un mayor grado de conjugación en el anillo, lo que ocasiona que las moléculas sean menos compactas, reduciendo la fuerza cohesiva entre ellas en la interfase aire-líquido y, a su vez, la tensión superficial (Villegas, O., 2024).

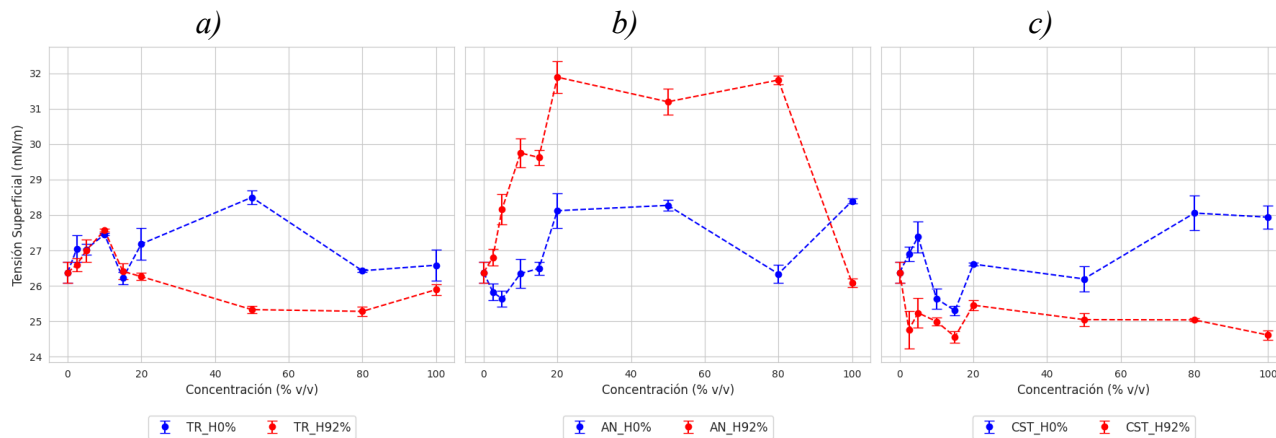
5.2 Tensión superficial de las mezclas

La Figura 6 muestra la variación de la tensión superficial en función de la concentración (% v/v) para dos mezclas diferentes, trementina/Jet A1 y trementina hidrogenada al 92%/Jet A1 a una temperatura de 25°C.

Figura 6.

Perfil de tensión superficial a 25°C en función de las concentraciones en mezclas Jet A1 según:

a) trementina, b) aceite de naranja y c) CST



En la Figura 6 se observan diferencias en el comportamiento de ambos sistemas a lo largo del rango de concentraciones, con fluctuaciones y tendencias particulares en cada caso. Una posible causa de la desviación de la tendencia en los dos tipos de mezclas evaluados para cada materia prima a partir de una concentración de 20% v/v es la disposición molecular de los terpenos, que, al tener una estructura cíclica y ramificada, podrían alterar la disposición de las moléculas en la interfase aire-líquido. Si las moléculas de trementina en la superficie se orientan de manera que aumentan la cohesión entre las moléculas cercanas, esto podría provocar el aumento de la tensión superficial.

Además, en la Figura 6b se aprecia una tendencia distinta al de las Figuras 6a y 6c, con valores de tensión superficial para la mezcla de Jet A1 con la sustancia hidrogenada mayores que para la no hidrogenada. Lo anterior podría explicarse debido al efecto de impurezas como algunos compuestos oxigenados presentes en el aceite de naranja sin hidrogenar, tales como aldehídos o alcoholes en pequeñas cantidades, que podrían actuar como tensoactivos y así

disminuir la tensión superficial de la mezcla (Israelachvili, J., 2011). En el aceite de naranja hidrogenado estas impurezas pueden eliminarse, reduciendo este efecto.

Por otro lado, la Figura 7 presenta la relación entre la tensión superficial y la concentración en mezclas de trementina/Jet A1 evaluadas a 25°C, 42.5°C y 60°C y con distintos niveles de hidrogenación. En las Figuras 7a, 7b y 7c se observa una tendencia en la que la tensión superficial aumenta con la concentración, alcanzando un pico alrededor de 8-10% v/v y luego disminuye. A medida que la temperatura aumenta, se presentan fluctuaciones más marcadas, con algunos descensos bruscos, incluyendo comportamientos más irregulares, con algunos picos a concentraciones bajas (i.e., 2.5%) y caídas posteriores.

Por ejemplo, la tensión superficial de la trementina incrementa progresivamente y muestra mayor estabilidad, mientras que a 60°C hay más variabilidad (ver Figura 7a). Esto puede deberse a diversos efectos como los viscosos o sinérgicos de las especies de la mezcla. En efecto, la viscosidad puede limitar la reorganización molecular, mientras que a temperaturas altas la movilidad molecular permite fluctuaciones más marcadas. Además, el aumento de tensión superficial en mezclas con trementina hidrogenada sugiere interacciones moleculares fuertes a concentraciones intermedias a 25°C. El posterior descenso en la curva podría deberse a la disolución de agregados moleculares o cambios en la distribución superficial.

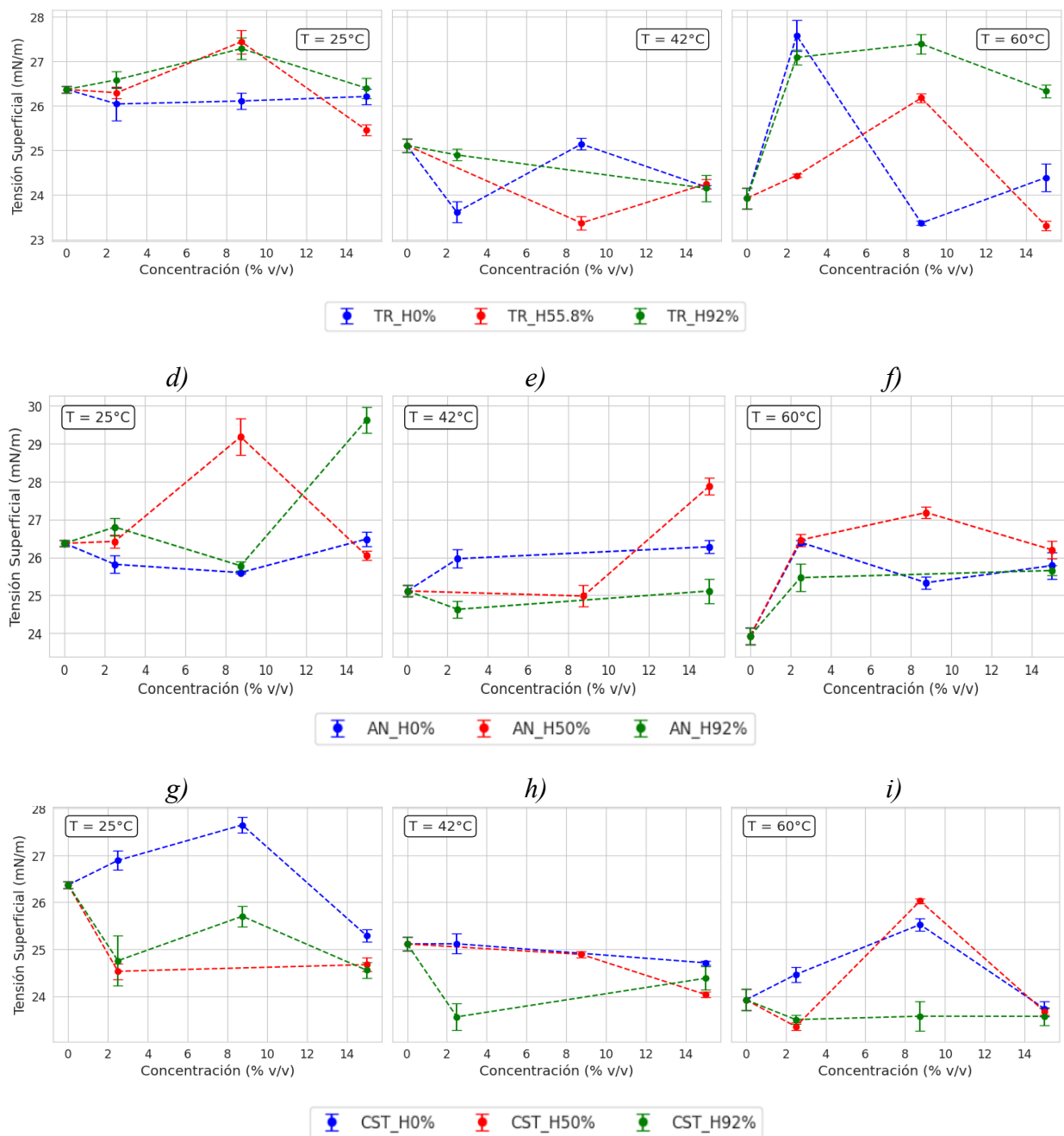
Figura 7.

Tensión superficial en mezclas con Jet A1, con variaciones en concentración e hidrogenación para: a) Trementina a 25°C, b) Trementina a 42°C, c) Trementina a 60°C, d) Aceite de naranja a 25°C, e) Aceite de naranja a 42°C, f) Aceite de naranja a 60°C, g) CST a 25°C, h) CST a 42 °C y i) CST a 60°C

a)

b)

c)



Por otra parte, para el caso del aceite de naranja en las Figuras 7d, 7e y 7f se presenta un comportamiento menos predecible, con aumentos y descensos más marcados a diferentes temperaturas. Como se mencionó anteriormente, a bajas temperaturas, los compuestos oxigenados presentes en el aceite de naranja sin hidrogenar permanecen en la mezcla, afectando

la organización en la superficie actuando como tensoactivos y modificando la tensión superficial de manera no lineal. Además, se debe considerar que la mezcla de aceite de naranja con Jet A1 es una mezcla de hidrocarburos con moléculas de diferente tamaño, por lo que se puede generar segregación parcial en la superficie, afectando la tensión superficial de forma no uniforme.

De igual manera, en la Figura 7g, la cual muestra la variación de la tensión superficial para el CST a 25°C, se observa un máximo en la tensión superficial alrededor del 8% v/v para el compuesto sin hidrogenar. Por otra parte, el compuesto hidrogenado al 50% muestra un comportamiento más estable, con menor variación, mientras que el CST hidrogenado al 92% presenta valores más bajos de tensión superficial en comparación con las otras mezclas. El pico en la curva del CST no hidrogenado a 25°C podría deberse a la formación de estructuras temporales en la interfase que estabilizan la tensión superficial. También podría indicar una segregación parcial de fases, donde algunos compuestos tienden a concentrarse en la superficie.

No obstante, a medida que la temperatura aumenta, como se aprecia en la Figura 7i, la volatilidad de ciertos compuestos podría estar afectando la distribución en la superficie del líquido. El aumento en la tensión superficial en el 8% v/v para CST parcialmente hidrogenado puede estar relacionado con la formación de microestructuras en la interfase.

En cualquier caso, el comportamiento de las gráficas presentadas en la Figura 7 no sigue una tendencia clara (con la presencia de picos para algunas composiciones), por lo cual no es posible predecir el comportamiento de la tensión superficial en concentraciones mayores a 15 % v/v. Una explicación a este patrón puede ser la presencia de dipolos inducidos (al mezclar dos moléculas apolares) (i.e., compuestos hidrogenados y no hidrogenados), lo que ocasiona la

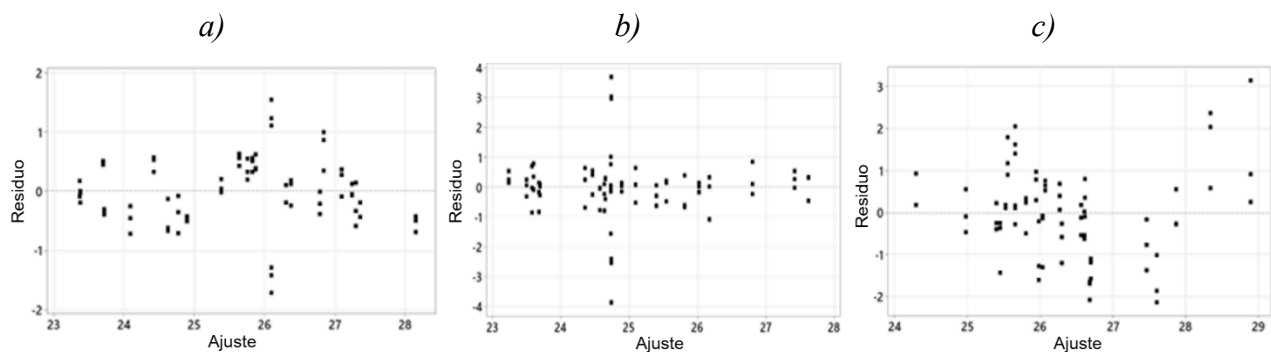
aparición de fuerzas de London y, por ende, una mayor cohesión molecular en la mezcla (Rössler, B., & Van Rijn, J., 2018).

5.3 Efecto de las interacciones de factores en la tensión superficial

El análisis se centra en examinar los principales factores que influyen en la tensión superficial del combustible. Para ello, se analizaron los efectos de la concentración temperatura e hidrogenación sobre las tres sustancias sustrato: trementina, aceite de naranja y CST. Por ende, la Figura 8 muestra la distribución de los valores residuales entre el modelo estadístico y las mediciones.

Figura 8.

Análisis residual para: a) Trementina, b) CST y c) Aceite de naranja



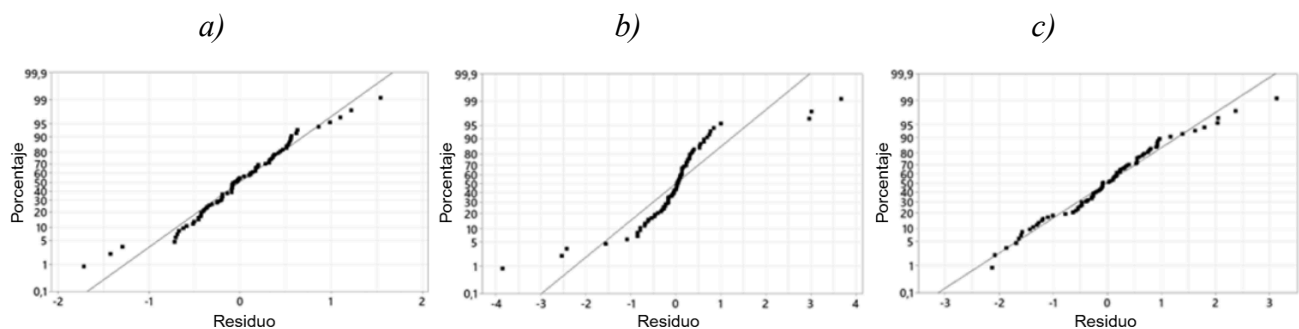
En general, para las tres materias primas, en la Figura 8 se observa una distribución aleatoria de los datos que sugiere que el modelo empleado es consistente con los datos experimentales. Sin embargo, en la Figura 8c, correspondiente a la trementina, se identifica una leve heterocedasticidad en el rango de ajuste entre 26 y 27. Esto podría indicar la influencia de factores no considerados en el modelo, generando valores atípicos que afectan estos puntos. De manera similar, en la Figura 8b, correspondiente al CST, se presenta una variación puntual en los

residuos entre los ajustes de 24 a 25. No obstante, este gráfico es el que muestra la varianza más constante en general, siendo el caso donde el modelo ofrece el mejor ajuste. En cuanto al aceite de naranja (Figura 8a), se evidencia una mayor dispersión de los residuos en el rango de 25 a 27, junto con un patrón levemente curvilíneo, lo cual podría sugerir la necesidad de incluir términos no lineales o de interacción en el modelo. Así, aunque existen ligeras desviaciones en algunos rangos, la dispersión de los residuos se mantiene mayormente uniforme, lo que refuerza la validez del modelo y la confiabilidad de los resultados obtenidos

La Figura 9 muestra el análisis de probabilidad normal de los residuos, empleado para verificar el cumplimiento del supuesto de normalidad. En los tres casos, la mayoría de los puntos se alinean adecuadamente con la línea de referencia, con coeficientes de ajuste mayores a 0.90, lo que indica que los residuos presentan una distribución aproximadamente normal.

Figura 9.

Análisis de probabilidad normal para: a) Trementina, b) CST y c) Aceite de naranja



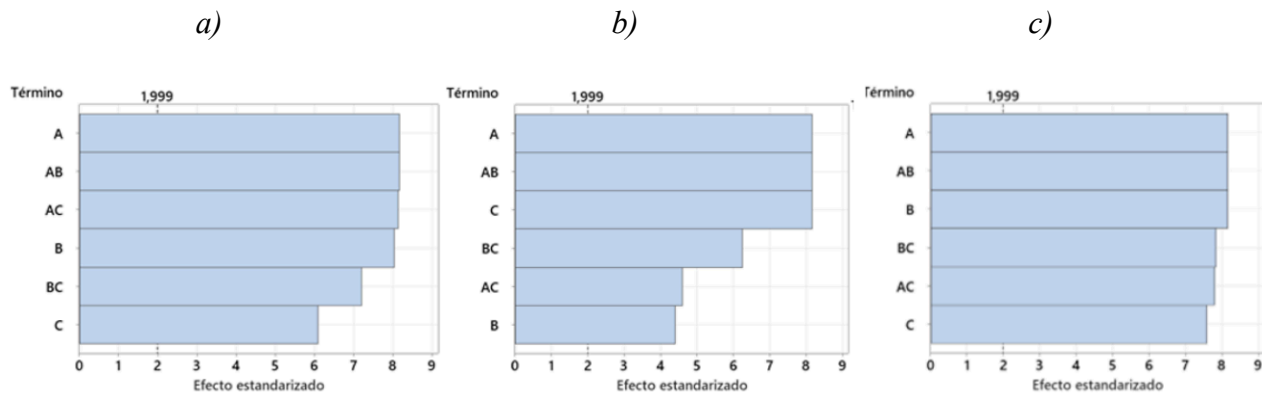
Aunque en la Figura 9 se observan ligeras desviaciones en los extremos para las tres materias primas, estas no son significativas. No obstante, en el caso del CST, se evidencia en la Figura 9b una curvatura notable en la zona central, así como varios puntos que se alejan de la línea, lo cual sugiere posibles valores atípicos o la presencia de efectos no considerados en el

modelo. Si bien esto no invalida el ajuste, sí podría señalar la conveniencia de realizar ajustes adicionales. En general, el modelo cumple con el supuesto de normalidad de los errores, lo que respalda la validez de las pruebas estadísticas y reduce la probabilidad de anomalías experimentales que puedan sesgar los resultados.

En la Figura 10 se presenta el análisis de efectos estandarizados, donde se evalúa la magnitud de la influencia de cada factor y sus interacciones sobre la tensión superficial, considerando un nivel de significancia asociado a un valor crítico de 1.999. En el eje de las ordenadas se identifican los términos correspondientes a los factores principales: A (Temperatura), B (Concentración) y C (Nivel de Hidrogenación), así como sus interacciones de segundo orden (AB, AC y BC). Por su parte, en el eje de las abscisas se presenta el efecto estandarizado mediante la intensidad con la que cada factor o combinación de factores afecta la respuesta del sistema.

Figura 10.

Pareto de efectos estandarizados para: a) Trementina b) CST y c) Aceite de naranja



En la Figura 10a, correspondiente a la trementina, se destacan como efectos principales la interacción BC (concentración e hidrogenación), seguida por el efecto individual C (hidrogenación) y la interacción AC (temperatura e hidrogenación). Esto sugiere que los cambios

en la hidrogenación, tanto de forma aislada como combinada con otros factores, alteran de forma importante la tensión superficial de este terpeno. La marcada influencia de estas interacciones evidencia una respuesta compleja del sistema, donde los efectos combinados superan incluso a los efectos individuales de temperatura y concentración.

Por su parte, en la Figura 10b correspondiente al CST, se identifica claramente al factor A (temperatura) como el más influyente, lo cual indica que los cambios de temperatura modifican de forma notable la tensión superficial. También sobresale la interacción AB (temperatura y concentración), lo que sugiere que la combinación de estos dos factores tiene un efecto sinérgico sobre la propiedad estudiada. Aunque los efectos BC, AC y B son menores, su magnitud supera el umbral de significancia, confirmando su impacto dentro del modelo.

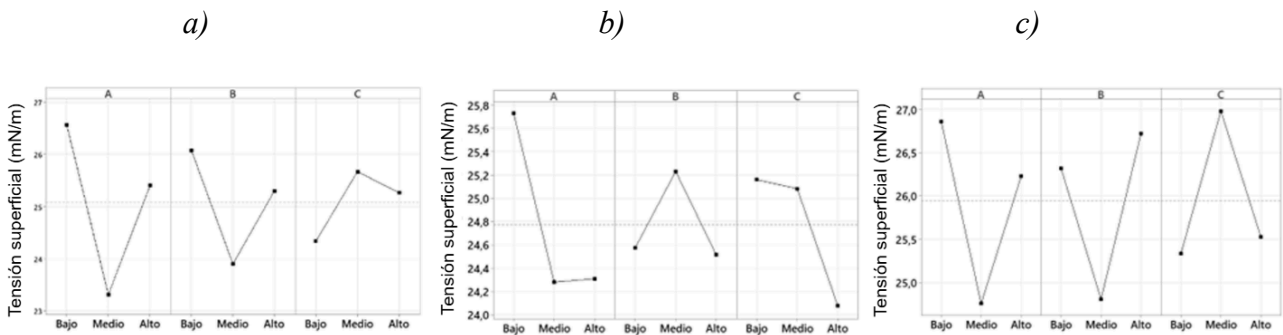
En el caso del aceite de naranja, Figura 10c, se repite la tendencia observada en el CST, siendo la temperatura (A) el factor de mayor efecto estandarizado, seguido por la interacción AB y el efecto individual de la concentración (B). A diferencia de la trementina, aquí la hidrogenación (C) presenta un efecto significativamente menor, aunque aún dentro del rango de significancia, lo que indica que esta variable tiene una menor influencia sobre la tensión superficial en esta sustancia en particular.

El hecho de que las interacciones (por ejemplo, AB y BC) aparezcan con frecuencia entre los efectos más importantes, sugiere que la combinación de variables es tan determinante como los factores individuales, lo que refuerza la necesidad de considerar simultáneamente múltiples condiciones experimentales al momento de evaluar la tensión superficial de este tipo de sustancias.

La Figura 11 muestra el impacto de A (temperatura), B (concentración) y C (hidrogenación) sobre la tensión superficial, considerando tres niveles para cada factor (Bajo, Medio y Alto).

Figura 11.

Influencia de factores simples para: a) Trementina, b) CST y c) Aceite de naranja



Para la trementina, en la Figura 11a, la temperatura (A) se identifica como el factor más influyente, con una disminución significativa de la tensión superficial al pasar del nivel bajo al medio. Sin embargo, al aumentar la temperatura al nivel alto, se observa una ligera recuperación en la tensión superficial. Este resultado indica que la temperatura afecta la dinámica molecular en la interfase del líquido hasta un cierto umbral, después del cual su efecto se estabiliza o para el caso, se revierte. En cuanto a la concentración (B), se observa una disminución en el nivel medio, seguido de un aumento de este al nivel alto. Por otro lado, la hidrogenación (C) presenta un efecto menos pronunciado en comparación con los otros dos factores. Se observa un ligero aumento de la tensión superficial al pasar del nivel bajo al medio, seguido de una disminución más marcada del nivel medio al alto. Esto indica que la hidrogenación afecta la tensión superficial de manera menos drástica que la temperatura y la concentración, pero su influencia se

vuelve más evidente en niveles elevados, donde parece facilitar la reducción de la tensión superficial.

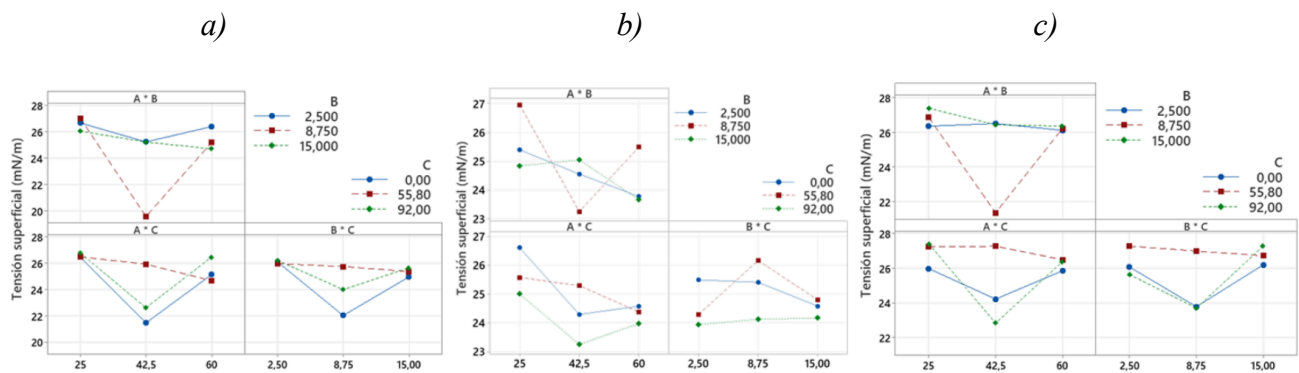
En el CST, representado en la Figura 11b, la hidrogenación (C) es el factor con mayor impacto, ya que provoca una reducción significativa en la tensión superficial conforme aumenta su nivel, alcanzando su valor más bajo en el nivel alto. Esto indica que la introducción de hidrógeno en la estructura molecular del CST modifica sus propiedades interfaciales, debilitando las interacciones intermoleculares en la superficie y favoreciendo la disminución de la tensión superficial. La temperatura (A) también muestra un efecto notable, generando una disminución pronunciada al pasar del nivel bajo al medio, seguida de una estabilización en el nivel alto, lo que sugiere que su influencia es más fuerte en los primeros incrementos y se atenúa posteriormente. Por su parte, la concentración (B) presenta un comportamiento no lineal, con un ligero aumento en la tensión superficial hasta el nivel medio, seguido de una disminución en el nivel alto, lo que podría explicarse por la interacción entre los componentes.

En el caso del aceite de naranja, Figura 11c, la hidrogenación (C) es el factor más influyente, con un incremento notable en la tensión superficial en el nivel medio, seguido de una disminución significativa en el nivel alto, lo que sugiere que la modificación estructural del aceite de naranja refuerza inicialmente las interacciones intermoleculares, pero en niveles elevados facilita la reducción de la tensión superficial. La temperatura (A), al igual que en la trementina, tiene una marcada disminución en el nivel medio y un aumento en el nivel alto, indicando que su impacto en la organización molecular de la interfase es variable. Por último, la concentración (B), de igual manera, con un comportamiento similar a la trementina, presenta una reducción de la tensión superficial en el nivel medio y un aumento en el nivel alto, lo que evidencia un cambio en las interacciones interfaciales a medida que varía la concentración.

La Figura 12 muestra el efecto de las interacciones de los diferentes factores, evidenciando que la interacción entre la temperatura y la concentración AB para la trementina presenta una disminución significativa de la tensión superficial en el nivel medio de temperatura, especialmente cuando la concentración es intermedia. Esto indica que en este punto existe una combinación óptima de temperatura y concentración que favorece una menor tensión superficial. En la interacción entre la temperatura y la hidrogenación AC, el comportamiento es similar, con una reducción significativa de la tensión superficial en el nivel medio de temperatura, también se destaca que la diferencia entre los niveles máximo y mínimo de hidrogenación es menos marcada con diferencia del nivel intermedio. Finalmente, en la interacción entre la concentración y la hidrogenación BC, se evidencia una disminución notable en la tensión superficial cuando la concentración está en un nivel intermedio, independientemente del grado de hidrogenación, sugiriendo la importancia de la concentración en la reducción de la tensión superficial en la trementina, mientras que la hidrogenación tiene un efecto menos pronunciado en esta interacción.

Figura 12.

Influencia de factores combinados AB, AC y BC para: a) Trementina, b) CST y c) Aceite de naranja



En cuanto al CST se tiene que la interacción entre temperatura y concentración AB mostrada en la Figura 12b, muestra que, a una concentración baja, la tensión superficial disminuye conforme la temperatura aumenta. Sin embargo, en concentraciones medias y altas, la tendencia es diferente, pues la tensión superficial tiende a aumentar en el nivel medio de temperatura y luego vuelve a disminuir en el nivel alto, lo que da como resultado que la combinación de estos factores genera un comportamiento no lineal en la tensión superficial cuando se trabaja a la concentración media. Para la interacción entre temperatura e hidrogenación AC, se observa un aumento en la tensión superficial en niveles bajos y altos de hidrogenación.

No obstante, cuando la hidrogenación es intermedia la tensión superficial se mantiene más estable para todas las temperaturas, y comportándose de manera contraria. En la interacción entre concentración e hidrogenación BC, se evidencia un comportamiento variable. A bajas concentraciones, la tensión superficial disminuye con el aumento de la hidrogenación, mientras que, en niveles intermedios de concentración, la tensión superficial alcanza un valor máximo antes de disminuir nuevamente. De manera que la interacción entre estos factores no sigue un patrón simple, sino que depende de la combinación específica de niveles utilizados.

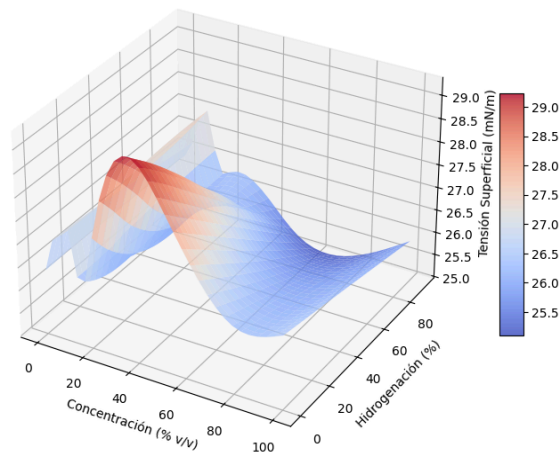
Finalmente, en la Figura 12c, se observa que, para el aceite de naranja, en la interacción AB hay una disminución significativa en la tensión superficial cuando la temperatura y la concentración alcanzan niveles intermedios, especialmente para la concentración media (8,750 %v/v), donde se presenta la caída más pronunciada. Para la interacción AC, la tensión superficial disminuye a niveles intermedios de temperatura y se mantiene más estable, en los niveles bajos de hidrogenación. En la interacción BC, la tensión superficial presenta una reducción notable en

la combinación de concentración media e hidrogenación baja y alta, lo que indica que estos factores combinados afectan significativamente las propiedades interfaciales de la trementina.

Por otro lado, en la Figuras 13, 14 y 15 se presentan los gráficos de superficie de respuesta para mezclas de Jet A1 con sustrato a 25°C, en función de la concentración con el combustible y el nivel de hidrogenación.

Figura 13.

Gráfico de superficie de respuesta a 25 °C para la trementina



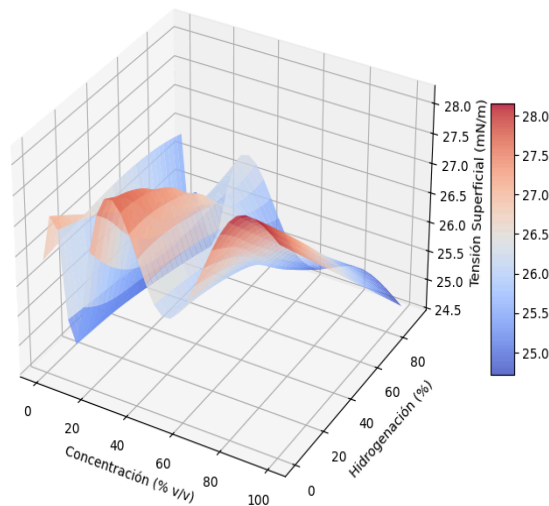
La tensión superficial de las mezclas con trementina varía significativamente con la concentración y el grado de hidrogenación. Se observa un máximo de tensión superficial en concentraciones intermedias y bajos niveles de hidrogenación, mientras que, al aumentar la hidrogenación, la tensión superficial tiende a disminuir. Esto sugiere que la saturación de los terpenos influye en la interacción con el combustible, afectando la estructura molecular y la estabilidad de la mezcla. Asimismo, la gráfica indica posibles regiones de segregación de fases, evidenciadas por cambios abruptos en la tensión superficial, lo que podría estar relacionado con la miscibilidad de la trementina en la mezcla. Por consiguiente, para mejorar la atomización del

combustible sería conveniente utilizar trementina con un alto nivel de hidrogenación y una concentración moderada.

En la Figura 14 se observa que la tensión superficial de la mezcla Jet A1/CST presenta variaciones complejas en función de la concentración y el grado de hidrogenación. A diferencia de la trementina, los cambios de tensión superficial no siguen un patrón uniforme, lo que sugiere una mayor sensibilidad a la composición de la mezcla. Se identifican zonas con incrementos y disminuciones pronunciadas de tensión superficial, posibles efectos de segregación de fases o cambios en la estructura intermolecular.

Figura 14.

Gráfico de superficie de respuesta a 25 °C para el CST



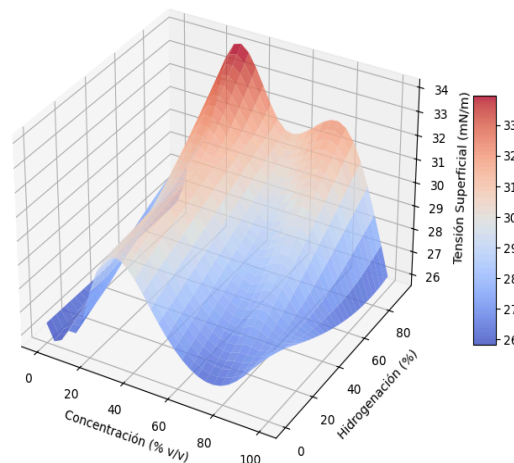
En particular, en concentraciones moderadas (40-60 % v/v), la tensión superficial parece alcanzar valores más altos cuando la hidrogenación es baja o intermedia, mientras que, a niveles altos de hidrogenación, la tensión superficial disminuye. Esto implica que la saturación de los compuestos presentes en CST afecta su interacción con el combustible base (Jet A1), posiblemente modificando la formación de interacciones intermoleculares. Este comportamiento

irregular sugiere que la CST puede presentar mayor inestabilidad en la mezcla en comparación con la trementina, lo que debe ser considerado en aplicaciones industriales donde la estabilidad y la atomización del combustible son críticas.

Finalmente, en la Figura 15 se observa una tendencia más pronunciada en la variación de la tensión superficial con la concentración y el nivel de hidrogenación. En particular, se presenta un pico máximo de tensión superficial en concentraciones cercanas al 60-70 % v/v, con valores que superan los 33 mN/m.

Figura 15.

Gráfico de superficie de respuesta a 25 °C para el aceite de naranja



Este comportamiento contrasta con los otros compuestos analizados, ya que aquí se evidencia una respuesta más marcada ante cambios en la composición de la mezcla. Además, a medida que aumenta la hidrogenación, la tensión superficial tiende a disminuir, especialmente en concentraciones altas. Esto sugiere que la saturación de los compuestos presentes en el aceite de naranja reduce su capacidad de interacción con la fase base.

Finalmente, al comparar los valores de media y desviación estándar de la tensión superficial para cada molécula terpénica evaluada, se observa que el aceite de naranja presentó la mayor media de tensión superficial con un valor de 26,2316 mN/m, y la menor desviación estándar de 1,18076, lo que indica una mayor estabilidad en sus mediciones (menor efecto composicional en la tensión superficial). En contraste, la trementina mostró una media de 25,4788 mN/m con la desviación estándar más alta, siendo esta de 1,52930, sugiriendo una mayor variabilidad en su comportamiento interfacial. Por otro lado, el CST presentó la menor tensión superficial promedio de 24,9472 mN/m y una desviación estándar de 1,18582, lo que sugiere una relativa consistencia en sus mediciones. Estos resultados indican las diferencias en la estabilidad que presentan estas sustancias al mezclarse con Jet A1, lo que impacta en su desempeño como aditivo en combustible de avión.

6. Conclusiones

La elección de un diseño factorial completo 3^3 permitió identificar los efectos principales de cada factor sobre la tensión superficial, así como también las posibles interacciones entre ellos, permitiendo entender de forma global el comportamiento del sistema y permitiendo identificar combinaciones de variables con mayor potencial para mejorar el desempeño interfacial de las mezclas.

Las mediciones experimentales evidenciaron que la tensión superficial de las mezclas está influenciada por la temperatura, la concentración de terpenos y el estado de hidrogenación. A bajas temperaturas (i.e., 25°C), las curvas fueron más estables, mientras que a altas temperaturas (i.e., 60°C) se observaron fluctuaciones significativas, especialmente con terpenos no hidrogenados. Los terpenos hidrogenados presentaron menor variabilidad y mayor

compatibilidad interfacial con Jet A1. La concentración también afectó el comportamiento interfacial, mostrando una reducción inicial de la tensión superficial a bajas concentraciones (~2%) y efectos de saturación a concentraciones mayores (>12%). El análisis estadístico validó la confiabilidad del modelo experimental y presentó que la temperatura fue el factor más determinante para los tres tipos de mezclas. Se identificaron interacciones significativas como temperatura-concentración e hidrogenación-concentración, demostrando que el comportamiento interfacial de cada mezcla depende de una combinación específica de condiciones, lo que es crucial para diseñar formulaciones óptimas.

Finalmente, tras analizar el comportamiento de la tensión superficial en mezclas de Jet A-1 con terpenos, se concluye que las formulaciones que incorporan terpenos hidrogenados son las más adecuadas. Esto se debe a que no generan alteraciones significativas en la tensión superficial del combustible, lo que permite mantener propiedades críticas para la seguridad y el desempeño del sistema de propulsión aeronáutico. En contraste, los terpenos no hidrogenados tienden a reducir excesivamente la tensión superficial, aumentando riesgos operacionales. Por tanto, los terpenos hidrogenados representan una opción más estable y compatible para su uso como aditivos o biocomponentes en combustibles de aviación.

7. Recomendaciones

Profundizar en la caracterización fisicoquímica de las mezclas realizando análisis adicionales, como espectroscopía FTIR o cromatografía de gases, para comprender mejor las interacciones moleculares entre el Jet A1 y los terpenos, especialmente los efectos de la hidrogenación sobre la estructura química y la polaridad de la mezcla.

Evaluar la estabilidad a largo plazo de las mezclas, considerando posibles fenómenos como separación de fases, evaporación diferencial o degradación química, que pueden afectar la tensión superficial y la aplicabilidad en la industria aeronáutica.

Explorar la influencia de otros aditivos en la tensión superficial, evaluando el efecto de otros compuestos presentes en formulaciones comerciales de combustible, como antioxidantes o dispersantes, para determinar si pueden mitigar o acentuar las variaciones observadas en la tensión superficial con la adición de terpenos.

Referencias Bibliográficas

- Benavides, L. & Ortega, J. (2024). Estudio del comportamiento de la tensión superficial en mezclas de diésel con moléculas terpénicas: efecto de la estructura molecular, concentración y temperatura. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas.
- Chuck, J. & Donnelly, J. (2014). The compatibility of potential bioderived fuels with Jet A-1 aviation kerosene. *Applied Energy*, 118:83-91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.12.019>
- Donoso, D., Bolonio, D., Ballesteros, R., Lapuerta, M., & Canoira, L. (2022). Hydrogenated orange oil: A waste derived drop-in biojet fuel. *Renewable Energy*, 188, 1049–1058. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.02.078>
- Donoso, D., Ballesteros, R., Bolonio, D., García, M., Lapuerta, M., Canoira, L. (2020) Hydrogenated Turpentine: A Biobased Component for Jet Fuel. *Revista Energy & Fuels*. Vol 35, 2.
- Gunerhan, A., Altuntas, O., & Caliskan, H. (2023). Utilization of renewable and sustainable aviation biofuels from waste tyres for sustainable aviation transport sector. *Energy*, 276, 127566. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127566>
- Luqueño-Bocardo, O. I., Pardo, J. P., Guerra-Sánchez, G., González, J., Matus-Ortega, G., & Romero-Aguilar, L. (2021). Los isoprenoides como fuente de biocombustibles. *Deleted Journal*, 24. <https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2021.0.291>

- Rostami, E., & Moghaddam, H. M. (2021). Experimental comparison of the spray atomization of heavy and light fuel oil at different temperatures and pressures for pressure-swirl injector. *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers Part A Journal Of Power And Energy*, 235(7), 1694-1717. <https://doi.org/10.1177/0957650921994376>
- Rückert, M., Reinertz, O. & Schmitz, K. (2018). Analysis of measurement methods and applicability on rail-pressure environments. RWTH Aachen University, Institute for Fluid Power Drives and Systems.
- Patiño-Camino, R., Cova-Bonillo, A., Lapuerta, M., Rodríguez-Fernández, J., & Segade, L. (2022). Surface tension of diesel-alcohol blends: Selection among fundamental and empirical models. *Fluid Phase Equilibria*, 555, 113363. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2021.113363>
- Quante, G., Bullerdiek, N., Bube, S., Neuling, U., & Kaltschmitt, M. (2023). Renewable fuel options for aviation – A System-Wide comparison of Drop-In and non-Drop-In fuel options. *Fuel*, 333, 126269. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126269>
- Ziyu, L., Tang, Z. & Yang, X. (2023). Integrating properties and conditions to predict spray performance of alternative aviation fuel by ANN model. *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, 16:171. <https://doi.org/10.1186/s13068-023-02408>

Moldanová, J, Hallquist, A., Priestley, M., Danél, K, Fallenius., B, Abdalal., O, Potter., A, Strandberg., B. (2025). Characterization of emissions from a turbojet engine running on sustainable aviation fuels, blends and conventional Jet A1. *Atmospheric Environment X*, 10:03, Vol 21. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2025.100321>

Villegas, O. (2024). Molecular dynamics simulations of asphaltenes and their A1 and A2 sub-fractions in the presence of solvents and silica nanoparticles. HAL open science. <https://theses.hal.science/tel-04585114v1>

Canoira, L., Donoso, D., Bolonio, D., Bumharter, C., & Lapuerta, M. (2023). Desulfurized and Hydrogenated Crude Sulfate Turpentine (HCST): A Biofuel Derived from a Waste of the Pulp and Paper Industries. *Energy & Fuels*, 37(20), 15843-15854. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c02616>

Donoso, D., Bolonio, D., Ballesteros, R., Lapuerta, M., & Canoira, L. (2022). Hydrogenated orange oil: A waste derived drop-in biojet fuel. *Renewable Energy*, 1049-1058. Vol 188. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.02.078>

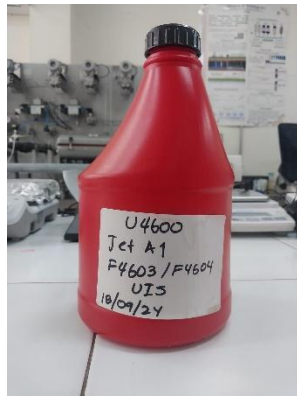
ASTM International. (2013). *ASTM D1475-13: Standard test method for density of liquid coatings, inks, and related products*. ASTM International. <https://www.astm.org/d1475-13.html>

Apéndices

Apéndice A.

Sustancias usadas en la experimentación: A) Jet A1 y B) sustancias hidrogenadas y no hidrogenadas

A)



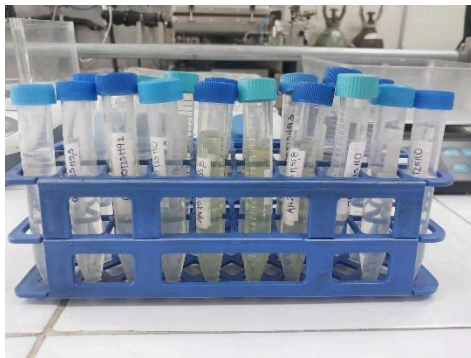
B)



Apéndice B.

Muestras de sustancias: A) mezclas y B) balón aforado

A)

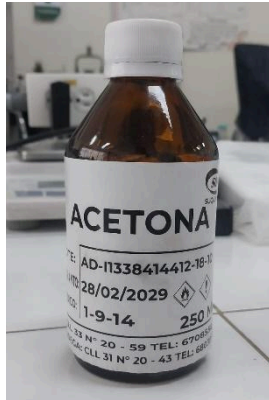
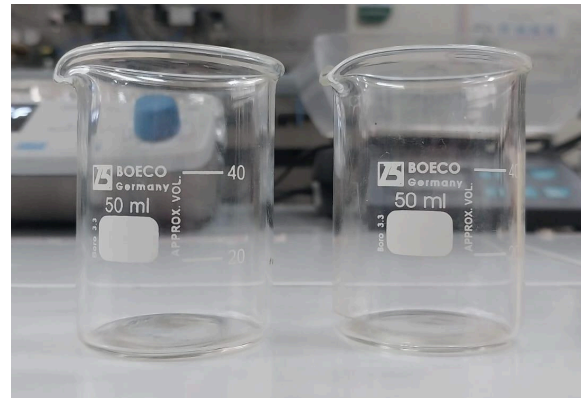


B)



Apéndice C.

Herramientas usadas para el lavado: A) acetona y B) vasos precipitados

A)**B)****Apéndice D.**

Equipos para la medición de la densidad: A) plancha de calentamiento, B) balanza y C) horno

A)**B)****C)**



Apéndice E.

Instrumentos para la medición de la densidad: A) termómetro, B) picnómetro y C) micropipeta

A)



B)



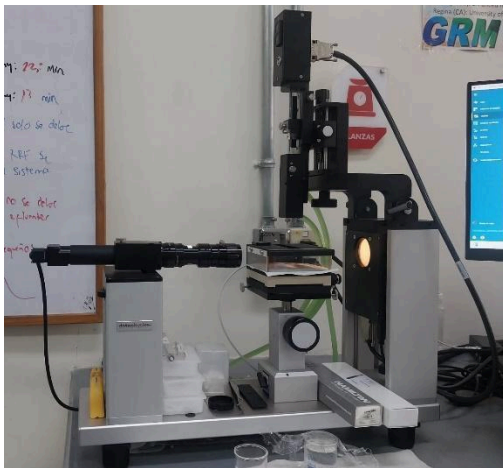
C)



Apéndice F.

Equipos para la medición de la tensión superficial: A) OCA 25 y B) baño termostatzado

A)



B)

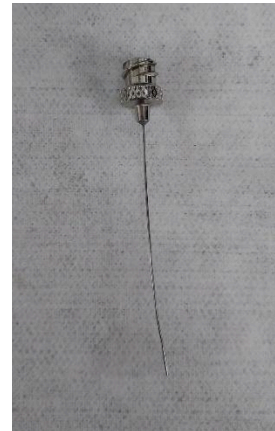


Apéndice G.

Instrumentos para la medición de la tensión superficial: A) jeringa y B) aguja

A)

B)



Apéndice H.

Datos técnicos del equipo OCA 25

Dimensiones máximas de la muestra (LxWxH)	<ul style="list-style-type: none"> • 220 x ∞ x 70 mm³ • 330 x ∞ x 70 mm³ (OCA 25L)
Dimensiones de la mesa de muestra (LxW)	<ul style="list-style-type: none"> • 100 x 100 mm²
Rango de recorrido de la mesa de muestra en dirección X-Y-Z	<ul style="list-style-type: none"> • 100 x 104 x 42 mm³ • 220 x 159 x 42 mm³ (OCA 25L)
Rango de medición para ángulos de contacto	<ul style="list-style-type: none"> • 0...180°; ± 0.1° Precisión de medición del sistema de video
Rango de medición de tensiones superficiales e interfaciales	<ul style="list-style-type: none"> • 1-10⁻² ...2-10³ mN/m; resolución: min ± 0.01 mN/m
Peso máximo de la muestra	<ul style="list-style-type: none"> • 3.0 kg; 15.0 kg con mesa de muestra sujeta
Sistema óptico y de procesamiento de imágenes	<ul style="list-style-type: none"> • Iluminación LED con intensidad controlada

	manualmente y por software, incluida compensación automática de la variación de temperatura
	<ul style="list-style-type: none">● Cámara USB 3.0, resolución máxima 2048 x 1088 pixeles, velocidad máxima de fotogramas: 1220 fps● Objetivo zoom de 6 aumentos con enfoque fino integrado (\pm 6 mm)● Campo de visión: 2.50 x 1,316.09 x 8.54 mm²● Distorsión óptica < 0.05%
Dimensiones (LxBxH)	<ul style="list-style-type: none">● 660 x 220 x 365 mm● 725 x 285 x 365 mm (OCA 25L)
Peso	<ul style="list-style-type: none">● 16 kg● 18 kg (OCA 25L)
Fuente de alimentación	<ul style="list-style-type: none">● 100...240 V AC;50...60 HZ; 70 W

Nota: Adaptado de Manual de funcionamiento OCA 25 (Instruments GmbH, 2023)

Apéndice I.*Interfaz del software dpiMAX*