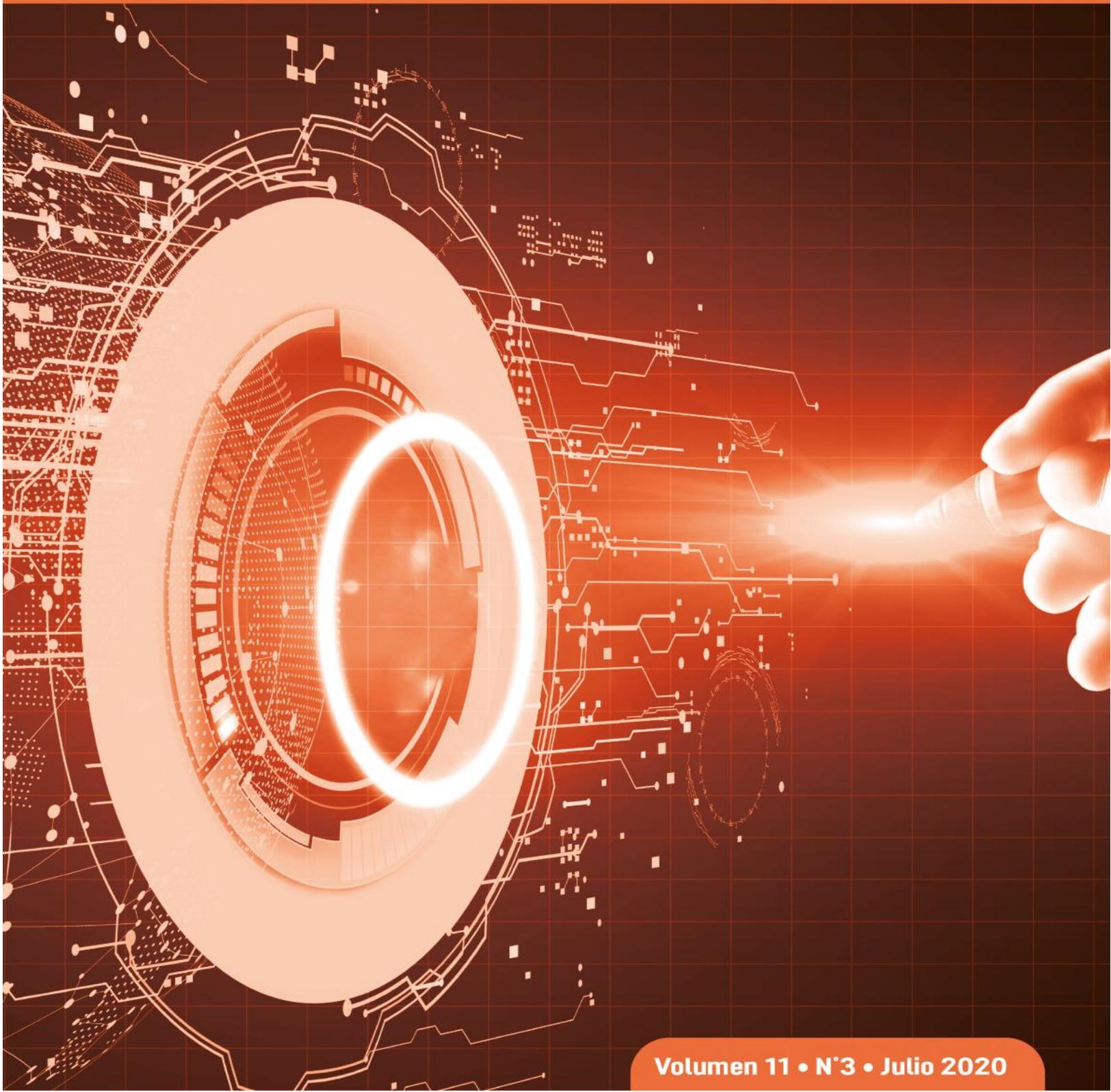


ENFOQUE

UTE
REVISTA



Facultad Ciencias de la Ingeniería e Industrias
eISSN:13906542



Volumen 11 • N°3 • Julio 2020

Sumario

CÁLCULO DE LA DISTRIBUCIÓN DE VOLTAJES EN LAS CADENAS DE AISLADORES DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN DE 500 kV UTILIZANDO EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS (Calculation of Voltage Distribution along the Insulator Strings of a 500 kV Transmission Line Based on Finite Element Method) <i>Juan Ramírez, Krissia Cabezas, Pedro Jiménez, Raúl Canelos, Bolívar Escobar</i>	1
ESTUDIO DE LA MIGRACIÓN DE ALUMINIO DESDE LAS OLLAS A LA COLADA DE AVENA (Survey of migration of aluminium from pots to oat beverage) <i>Tamara Fukalova Fukalova, Iván Tapia Calvopiña, Eva Quishpe, Lorena Goetschel G., Wilson Parra, Vanessa Mena</i>	15
FENOLOGÍA FLORAL DE LA GUABA (INGA EDULIS) EN UN VALLE INTERANDINO DEL ECUADOR (Ice cream bean (Inga edulis) flower phenology in Ecuadorian inter-Andean valley) <i>Maritza Quijia-Quijia, Stephanie Castillo-Torres, Wilson Vasquez-Castillo, Mauricio Racines-Oliva</i>	25
INCORPORACIÓN DE HARINA DE AMARANTO PARA LA OBTENCIÓN DE BOCADITOS DE CARNE CON BAJO CONTENIDO DE GRASA (Incorporating amaranth flour to obtain low-fat meat snacks) <i>Melisa, G. Britze, Fabiana A. Rolhaiser, Ana M. Romero, Mara C. Romero</i>	35
MODELING OF THE VARIATION OF THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF THE LEACHATE OF COCOA WITH DIFFERENT FERMENTATION INDEX (Modelización de la variación de la conductividad eléctrica del lixiviado de cacao con diferentes índices de fermentación) <i>Loo-Miranda JLM, Chire-Fajardo, GC, Ureña-Peralta, MO</i>	46
ESTUDIO EXPERIMENTAL SOBRE EL CORTE CON LÁSER DE CO ₂ A BAJA POTENCIA, DEL COMPUESTO DE PLÁSTICO REFORZADO CON FIBRAS NATURALES (Experimental study on the low power CO ₂ laser cutting of natural fibers reinforced plastic composite) <i>Cristian Pérez-Salinas, Marilyn Riera, Carlos Tonato</i>	55
TEMPERATURA SUPERFICIAL Y ESTADO DE LA VEGETACIÓN DEL BOSQUE DE <i>POLYLEPIS SPP</i> , DISTRITO DE SAN MARCOS DE ROCCHAC, HUANCAVELICA - PERÚ (Surface temperature and states of the vegetation of the forest of <i>Polylepis spp</i> , district of San Marcos de Rocchac, Huancavelica - Peru) <i>Quispe Reymundo Bimael J., Révolo Acevedo Ronald H.</i>	69
ANÁLISIS TERMOENERGÉTICO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE VAPOR DE UNA CENTRAL TÉRMICA DE 49 MW (Thermo-energetic analysis of the steam generation system in a 49 MW power plant) <i>Yoyalbys Retirado Mediaceja, Héctor Luis Laurencio Alfonso, Andres A. Sánchez-Escalona, Yanán Camaraza-Medina, Marcelo Fabián Salazar Corrales, Marbelis Lamorú Urgelles, Ever Góngora Leyva</i>	87
MANUFACTURE MATERIAL CHARACTERISTIC ANALYSIS OF ORIGINAL AND ALTERNATIVE AUTO PARTS. CASE STUDY: BRAKE DISC (Análisis de las características del material de fabricación de autopartes originales y alternos. Caso de estudio: Disco de freno) <i>Jaime Antamba, Vladimir Azanza, Gorky Reyes, Álvaro Remache, Soraya Ruiz</i>	102

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA EFICIENCIA ESTABILIZADORA DE ASFALTENOS DEL ACEITE DE CÁSCARA
DE *ANACARDIUM OCCIDENTALE* Y PRODUCTOS COMERCIALES

(Comparative analysis of the asphaltene stabilizing efficiency
of *Anacardium occidentale* peel oil and commercial products)

Dany Day Josefina Arriojas Tocuyo, Tomás Darío Marín Velásquez 111

Cálculo de la distribución de voltajes en las cadenas de aisladores de una línea de transmisión de 500 kV utilizando el método de los elementos finitos

(Calculation of Voltage Distribution along the Insulator Strings of a 500 kV Transmission Line Based on Finite Element Method)

Juan Ramírez¹, Krissia Cabezas¹, Pedro Jiménez¹, Raúl Canelos¹, Bolívar Escobar¹

Resumen

En este artículo se puede apreciar las distribuciones de voltaje a lo largo de una cadena de aisladores de una línea de transmisión de 500 kV de Ecuador. El problema electrostático relacionado a la distribución de voltajes se resolvió utilizando el método de los elementos finitos. Se realiza un dibujo a escala 1:1 en una herramienta de dibujo tipo CAD para luego ser exportada al programa FEMM, que resuelve el problema y del que se obtienen los resultados relacionados a los voltajes en la cadena de aisladores. Se aprecia las diferencias de voltaje en los diferentes aisladores que componen una cadena y se observa la diferencia entre las cadenas, determinada por la ubicación geométrica en el espacio de solución.

Palabras clave

Aisladores de suspensión de alto voltaje; aislamiento eléctrico; distribución de voltaje en la cadena de aisladores; FEMM; método de los elementos finitos.

Abstract

This paper presents the voltage distributions along the insulator strings of a 500 kV overhead transmission line of Ecuador. The electrostatic problem related to the voltage distribution was solved using the Finite Element Method. A 1:1 scale drawing is done on a CAD type drawing tool and then exported to the FEMM program that solves the problem and the results related to the voltages in the insulator string are obtained. The voltage differences in the different insulators that constitute a string are appreciated and the difference between the strings determined by the geometric location in the solution space is observed

Keywords

High voltage suspension insulators; electric insulation; voltage distribution along the Insulator strings, FEMM, Finite Element Method.

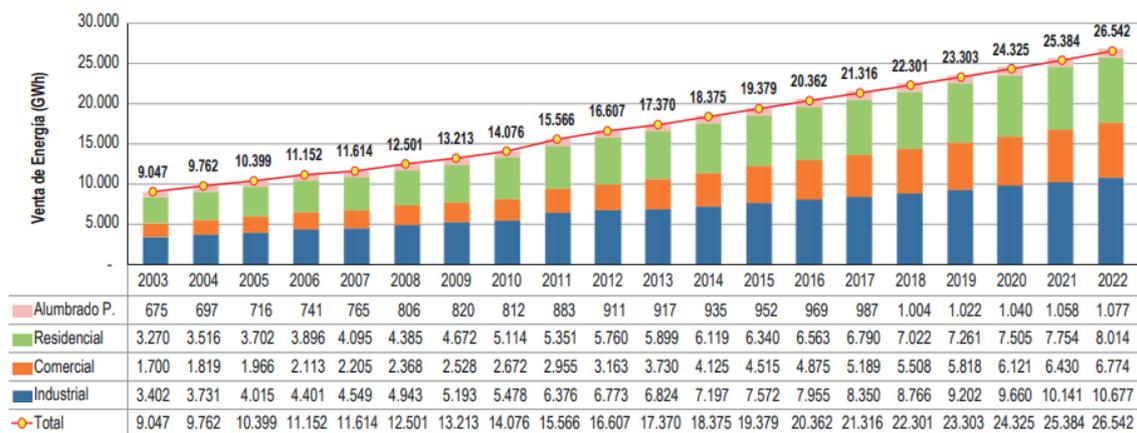
1. Introducción

Las líneas de transmisión de alto voltaje permiten transportar la energía eléctrica a grandes distancias, de una manera eficiente y segura, desde los centros de generación hacia los centros de consumo. En los últimos años, con los avances tecnológicos, la incorporación de grandes cargas al sistema y el cambio de la matriz productiva, el Ecuador ha tenido un crecimiento tendencial del consumo de energía eléctrica. Según los estudios realizados por la Agencia de Regulación y Control de la Electricidad del Ecuador (Arconel), el crecimiento promedio del consumo de energía en el país es del 5 % anual, como se presenta en la figura 1 (Arconel, 2013), siendo esta una razón para la construcción de uno de los proyectos hidroeléctricos más grandes en el país: Coca Codo Sinclair, con una capacidad instalada de 1500 MW.

1 Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, Ecuador (juan.ramirez@epn.edu.ec; krissiadalina10@outlook.com; davidldu34@gmail.com; raul.canelos@epn.edu.ec; bolivar.escobar@epn.edu.ec)

Con el fin de evacuar la generación de energía eléctrica de esta central, se estableció como mejor alternativa la implementación de un sistema de transmisión de 500 kV de extra alto voltaje que, además de vincular la nueva central hidroeléctrica Coca Codo Sinclair con Quito, permitirá interconectarla con el principal centro de carga del país en Guayaquil (Conelec, 2013; Transelectric, 2015).

Figura 1. Evolución histórica y proyección del consumo de energía en el Ecuador hasta el año 2022.
Fuente: *Plan Maestro de Electrificación 2013-2022 del Ecuador* (Arconel, 2013)



El sistema de 500 kV está compuesto por una línea de transmisión con dos circuitos en paralelo que parten, desde la subestación del proyecto hidroeléctrico Coca Codo Sinclair ubicada en el cantón El Chaco, provincia de Napo, y finalizan en la subestación El Inga situada en el cantón Quito, provincia de Pichincha, con una longitud total de 126 km cada línea.

Las rutas de las líneas atraviesan zonas de altitudes que varían entre 1200 m.s.n.m. en el sector del proyecto de generación Coca Codo Sinclair, y 4100 m.s.n.m. en el sector más alto conocido como el Paso de la Virgen. Cada una de las fases de la línea de transmisión está constituida por un haz de 4 conductores de aleación de aluminio ACAR 1100 MCM 18/19, con dos cables de guarda cada uno. Los conductores se sostienen en estructuras metálicas de celosía, autosoportantes, de tipo "cabeza de gato" y configuración horizontal. Las cadenas de aisladores en suspensión son en "V" o "I", en cada una de las fases, y son de porcelana o vidrio templado (Transelectric, 2013).

Con el incremento de los niveles de voltaje en los sistemas de transmisión, los materiales aislantes soportan campos eléctricos muy intensos, por lo que para su diseño resulta muy importante conocer la distribución de las líneas de campo eléctrico y líneas equipotenciales a lo largo de su geometría. De esta manera se puede verificar el comportamiento del material, cuando está sometido a los altos voltajes (Khare, Hasabe y Mandlik, 2016). En nuestro país, en la línea de extra alto voltaje de 500 kV, es evidente que la incidencia de los campos electromagnéticos será más intensa, ya que a mayor nivel de voltaje, mayor es la intensidad de los campos electromagnéticos (Radwan, Mahdy, Abdel-Salam y Samy, 2013).

En la actualidad, el desarrollo de programas que utilizan métodos de elementos finitos brinda la facilidad de resolver gráficamente las situaciones relacionadas con los problemas electromagnéticos; por ejemplo: el programa computacional FEMM (Finite Element Method Magnetics) que sobre la base de métodos de elementos finitos FEM permite resolver las ecuaciones diferenciales de Maxwell, implícitas en los temas de campos eléctricos y magnéticos.

Es así como, para diferentes configuraciones de líneas de transmisión, se puede obtener las soluciones de los campos electromagnéticos, bastante aproximadas a las reales.

Se han puesto a prueba varios modelos numéricos basados en las soluciones de las ecuaciones diferenciales parciales, mediante el método de los elementos finitos en los aisladores, para determinar las distribuciones de voltaje y campos eléctricos en ellos (Bessedik, 2015; Khare et al., 2016), que se realizan con consideraciones simples de la geometría de las líneas y buscan obtener una distribución de voltajes más uniforme (Huang, Ruan y Liu, 2010; Zhang, He, Zeng y Liang, 2010).

El método de elementos finitos FEM presenta buenos resultados en el cálculo del campo eléctrico y la distribución de potenciales en los aisladores de alto voltaje, y es uno de los métodos numéricos más exitosos en el momento de resolver problemas electrostáticos que incluso consideran la contaminación (Sima, Yuan, Yang, et al., 2010). Además, es un método bastante flexible ya que permite resolver las ecuaciones asociadas a los campos electromagnéticos con técnicas sencillas y gráficas, para estimar el valor de los campos en las superficies de los electrodos de diferentes materiales dieléctricos. Por último, se adapta bien a diferentes configuraciones de geometría (Arora y Mosch, 2011; Benguesmia, M'Ziou y Boubakeur, 2018).

El conocimiento de la distribución de voltajes a lo largo de una cadena de aisladores en una torre de transmisión, permite verificar que los aisladores no estén sometidos a voltajes que pueden llegar a esforzarlos dieléctricamente más de lo que requieren; esto, debido a que en la cadena de aisladores el voltaje no se distribuye uniformemente sino que por lo general el o los primeros aisladores cercanos al conductor soportan más voltaje que los aisladores que están sujetos a las estructuras de metal de las torres, por eso, usualmente los aisladores más cercanos sufren mayores esfuerzos dieléctricos y tienen una mayor probabilidad de sufrir una falla de aislamiento eléctrico. La distribución de voltajes en la cadena de aisladores se ve afectada por las condiciones geométricas de los aisladores y de las estructuras en las que se instalan (Du Zhiye y Daochun, 2010).

El estudio realizado por Antonov, Glushkov y Kropotuhin (2016), utiliza el método FEM para resolver las distribuciones de voltaje en cadenas de aisladores, apoyándose en experimentos de laboratorio hasta niveles de 150 kV. El estudio determina que las desviaciones entre el modelo resuelto con FEM y los experimentos van desde un 3.7 % a un 11.2 %. Además, encuentran que los aisladores que están aproximadamente a un tercio de la longitud de la cadena, desde la cruceta de la torre de transmisión, son los que menos voltaje soportan. El estudio no llega a voltajes más altos por las limitaciones de sus laboratorios.

En el artículo de Ashouri, Mirzaie y Gholami (2010), se realiza una solución con el método FEM en una cadena de aisladores de 230 kV. Pudieron determinar que el incremento del tamaño de la cadena de aisladores permite tener una distribución de voltajes más uniforme. Por su parte, en el estudio de Akbari, Mirzaie, Rahimnejad y Asadpoor (2012), se observa el efecto de un anillo metálico en el final de una cadena de aisladores de 230 kV, resolviendo el problema con el método FEM, y se observa que este anillo puede mejorar las distribuciones de voltaje en la cadena, pero debe optimizarse de acuerdo con las características particulares de la cadena en estudio. Se indica también que alargar la cadena hace más uniforme la distribución de voltajes.

La medición de la distribución de voltajes en la cadena de aisladores es difícil de realizar a medida que el voltaje es mayor. La disponibilidad de instrumentos adecuados o de laboratorios con las capacidades de medición y generación de altos voltajes limita la posibilidad de realizar la medición de estas distribuciones y es más práctico recurrir a paquetes de simulación.

Con estos antecedentes, en este artículo se propone como objetivo realizar el cálculo de la distribución de voltajes en la cadena de aisladores de una torre de transmisión de 500 kV

de la línea San Rafael - El Inga de Ecuador, la cual tiene dos cadenas de suspensión: una en I y una en V. Para poder obtener la solución se recurre al método FEM con el software FEMM, para realizar los cálculos en un plano bidimensional 2-D.

En la sección 2 del este artículo se presenta una base teórica del estudio a realizar. En la sección 3 se presenta la metodología propuesta y las descripciones de los materiales y geometría a utilizar. La sección 4 presenta los resultados obtenidos y su discusión. Finalmente en la sección 5 se encuentran las conclusiones del estudio realizado

2. Problema electrostático

El problema del cálculo de los campos eléctricos en un aislador está dentro de la categoría de problemas electrostáticos en la ingeniería (Khare et al., 2016). Estos problemas consideran el comportamiento de la intensidad de campo eléctrico E y la densidad de flujo eléctrico D . Tales cantidades deben cumplir con la forma diferencial de la ley de Gauss, la cual enuncia que el flujo que sale de un volumen cerrado es igual a la carga contenida en ese volumen (Meeker, 2006; Muniraj y Chandrasekar, 2012). Las ecuaciones básicas utilizadas para calcular los potenciales V y el campo eléctrico son las leyes de Maxwell, que para el modelo electrostático están presentadas en las ecuaciones (1), (2) y (3):

$$\operatorname{div}\vec{D} = \rho \quad (1)$$

$$\vec{D} = \epsilon\vec{E} \quad (2)$$

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V \quad (3)$$

Donde D es la densidad de flujo eléctrico, E es la intensidad de campo eléctrico, ρ es la densidad de carga eléctrica superficial, ϵ es la permitividad del material dieléctrico y V es el potencial eléctrico.

La combinación de las ecuaciones (1), (2) y (3) resultan en la ecuación (4):

$$\operatorname{div}\epsilon(-\vec{\nabla}V) = \rho \quad (4)$$

La ecuación (4) se conoce como ecuación de Poisson. La ecuación de Laplace se puede obtener haciendo $\rho = 0$. En el caso del equipamiento de alto voltaje, las cargas espaciales no están presentes o son despreciables ($\rho = 0$), por lo que se debe resolver la ecuación (5) (Nicolopoulou et al., 2011).

$$\operatorname{div}\epsilon(-\vec{\nabla}V) = 0 \quad (5)$$

La aplicación de la ley de Gauss lleva a la ecuación (5) a constituirse en una ecuación diferencial parcial de segundo orden, dada en (6) o (7):

$$-\epsilon\nabla^2V = 0 \quad (6)$$

$$-\epsilon\left(\frac{\partial^2V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2V}{\partial z^2}\right) = 0 \quad (7)$$

El programa FEMM resuelve internamente las ecuaciones (6) o (7) para el potencial V sobre un dominio discreto, con fuentes y condiciones definidas por el usuario. FEMM realiza una discretización espacial de las ecuaciones diferenciales creando pequeños elementos de forma triangular. De esa manera pasa de un problema pequeño pero muy difícil de solucionar, a un problema muy grande pero fácil de resolver, pues se conocen las soluciones aproximadas en las cercanías de los elementos, dadas por las condiciones de borde (Meeker D., 2006).

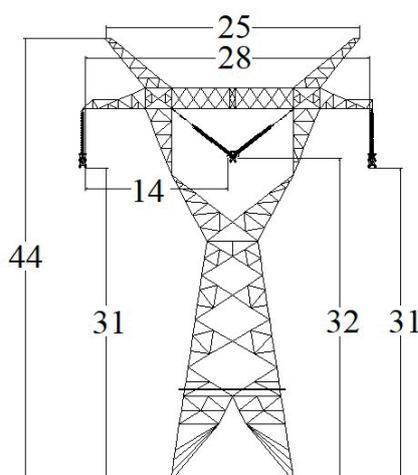
Un problema en una cadena de aisladores de suspensión con aisladores idénticos de tipo disco es la distribución del voltaje a lo largo de la cadena. Cada aislador se convierte en un capacitor y se tiene como resultado que el voltaje en cada aislador no es el mismo. El voltaje en los aisladores cambia según su ubicación y el máximo gradiente se da en el aislador más cercano al conductor (Wadhwa, 1989).

Existen diferentes métodos de solución para determinar la distribución de voltajes en una cadena de aisladores basados en métodos de simulación de carga, modelos capacitivos y elementos finitos (Chen y Liang, 2012). En este documento se modela a la cadena de aisladores para ser utilizada en el software FEMM y utilizar un método FEM, pues es de libre acceso y presenta facilidad en la representación geométrica de la línea en estudio.

3. Metodología

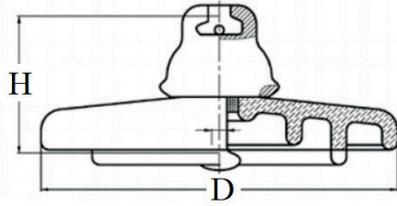
Se utilizó como modelo la geometría de una torre de transmisión de 500 kV trifásica típica de la Línea de Transmisión San Rafael-El Inga, que lleva la energía producida por la Central Hidroeléctrica Coca Codo Sinclair a la Subestación de El Inga en la ciudad de Quito-Ecuador. La torre se puede apreciar de manera simplificada en la figura 2 (Transeselectric, 2013). La torre tiene 3 cadenas de aisladores (dos en tipo I y una en tipo V). Hay 4 conductores por fase con conductores ACAR 1100 MCM separados 45 cm en el haz de conductores. Los dos conductores de guardia fueron ignorados en el estudio.

Figura 2. Geometría simplificada y dimensiones mayores de la torre de transmisión de suspensión de la línea de 500 kV, unidades en m.



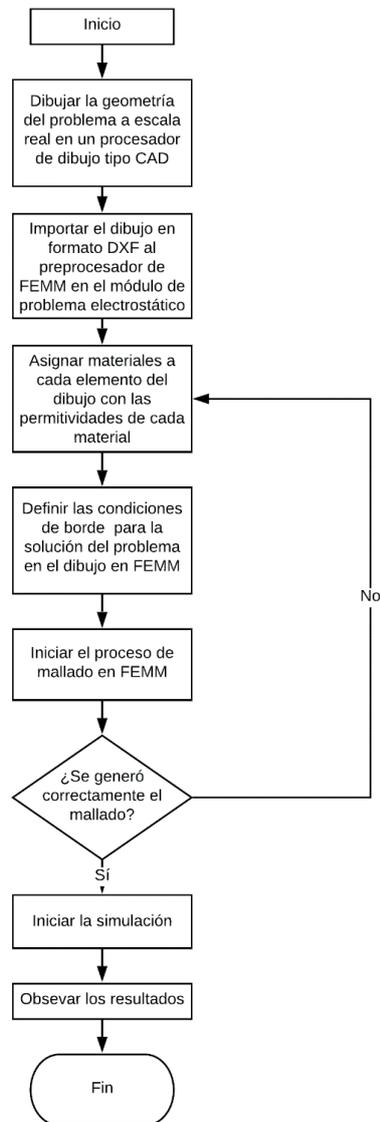
La cadena de aisladores está conformada por 28 aisladores de suspensión de porcelana tipo U300BP según la norma IEC60305, cuyas características se presentan en la figura 3.

Figura 3. Aislador U300 BP utilizado en el estudio



El aislador tiene un diámetro D de 340 mm, un espaciamento H de 195 mm, una distancia de fuga de 550 mm. El voltaje de perforación del aislamiento es de 130 kV. El nivel de aislamiento de frecuencia industrial en seco es de 90 kV. El nivel de aislamiento de frecuencia industrial en mojado es de 55 kV y el nivel de aislamiento ante impulso CFO positivo y negativo es de 130 kV.

Figura 4. Diagrama de flujo para la obtención de voltajes con FEMM



En la Figura 4 se presenta un diagrama de flujo del proceso de simulación que se sigue para obtener las distribuciones de voltaje en este artículo. Para la simulación de esta torre en FEMM, se realiza en primer lugar un dibujo a escala real en un editor de dibujo tipo CAD, que luego se importa al preprocesador de FEMM. Una vez en FEMM se deben atribuir los parámetros de los materiales a utilizar; estos valores están dados en la tabla 1 (Ordal et al., 1982).

Se definen las condiciones de borde de los conductores según los voltajes de fase más altos del sistema; para ello se considera el voltaje pico que corresponde a la peor condición de 528 kV rms del voltaje de línea. Y la condición de borde de voltaje igual a cero en el suelo y a una distancia de 35 m a cada lado del eje de la torre.

Luego se generan los triángulos de los elementos finitos en el software y se procede a la simulación, donde se puede obtener los resultados de campo eléctrico y potenciales en el espacio.

Tabla 1. Propiedades de los materiales para la simulación con FEMM. (Fuente: Ordal et al., 1982)

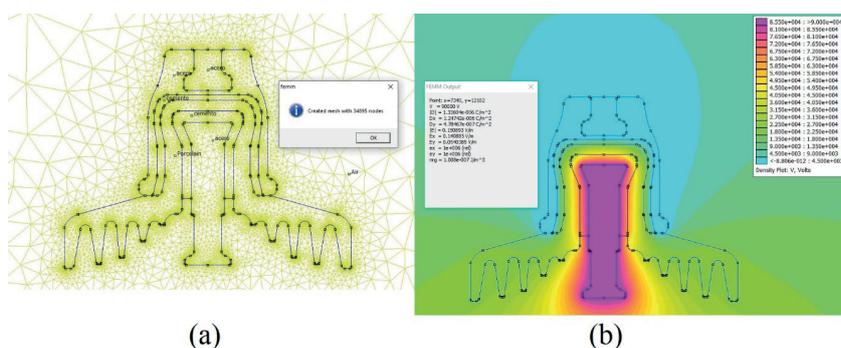
Material	Permitividad relativa ϵ_r
Acero galvanizado	500 000
Cemento	18
Porcelana	5.9
Aluminio	50 000
Hierro fundido	500 000
Aire	1
Suelo húmedo	30
Suelo seco	15
Suelo muy seco	3

El modelo realizado en FEMM puede encontrarse en la dirección <https://github.com/juan-dave1988/FEMM.git> y ha sido subido por los autores para utilidad de la comunidad relacionada.

4. Resultados y discusión

En primer lugar, se creó un aislador que se presenta en el preprocesador de FEMM en la figura 5a. Para probar el modelo del aislador se realiza la simulación a 90 kV, que es el máximo voltaje de frecuencia industrial especificado por la norma para el aislador de la figura 3. La simulación resultante se aprecia en la figura 5b.

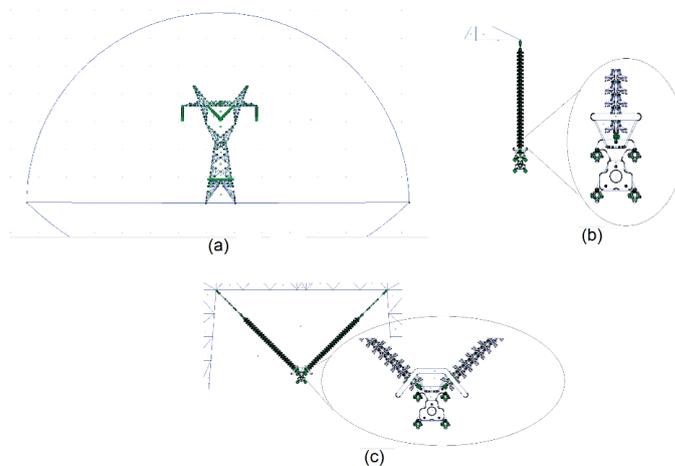
Figura 5. (a) Aislador U300 BP mallado en FEMM.
(b) Resultados de la simulación FEM en el Aislador U300 BP en FEMM



En la figura 5b se puede apreciar la distribución de potenciales como un mapa de densidades en colores. El color violeta presenta un potencial de 90 kV y el celeste el potencial de 0 kV. Se puede apreciar cómo cambian los potenciales según los colores en el espacio y con la herramienta de medición del software es posible conocer el valor del campo eléctrico, y potencial, en cualquier punto de este espacio simulado.

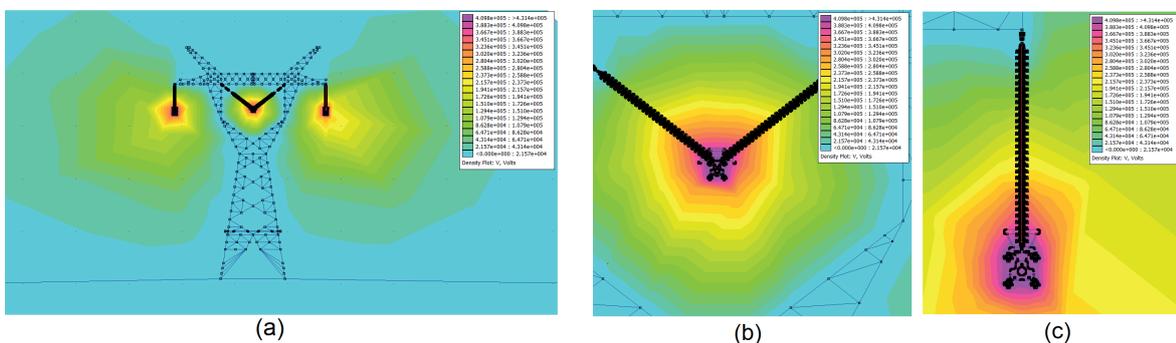
Una vez puesto a prueba el modelo del aislador se procede con el modelo completo de la línea con todos sus herrajes y aisladores. En las figuras 6a, 6b y 6c, se presentan los modelos en el preprocesador de FEMM.

Figura 6. (a) Torre de transmisión modelada en FEMM.
(b) Acercamiento a la cadena de aisladores de suspensión tipo I modelada en FEMM.
(c) Acercamiento a la cadena de aisladores de suspensión tipo V modelada en FEMM



Una vez que se procede a la simulación, se obtiene los resultados que gráficamente pueden apreciarse en las figuras 7a, 7b y 7c.

Figura 7. (a) Resultados de la simulación FEM en la torre de transmisión modelada en FEMM.
(b) Acercamiento a los resultados de la cadena de suspensión tipo V de la torre de transmisión modelada en FEMM.
(c) Acercamiento a los resultados de la cadena de suspensión tipo I de la torre de transmisión modelada en FEMM



A pesar de que FEMM posee una herramienta para realizar gráficos llamada PLOT, para graficar el potencial a lo largo de una línea, que en este caso serían las cadenas de aisladores,

se recurre a un script de Python 3.7, el cual extrae los resultados en un archivo de texto plano de los sitios que se desee en la simulación, para luego tratar a estos resultados de mejor manera (Meeker D., 2018). Con los valores de potencial obtenidos de la simulación y luego de ser procesados, se obtiene los voltajes a lo largo de las cadenas de aisladores, en las figuras 8a, 8b, 8c y 8d, y en la tabla 2, siendo el aislador 1 el más cercano al conductor.

Las figuras 8a, 8b, 8c y 8d presentan la distribución de voltaje a lo largo de la cadena de aisladores de la tabla 2. La longitud de la cadena está expresada en porcentaje, siendo el nivel 0 % medido desde el aislador 1, que es el que sostiene a los conductores energizados; así, el 100 % sería la longitud de la cadena hasta la cruceta de la torre de transmisión.

En la distribución de voltaje a lo largo de la cadena de aisladores resulta interesante observar que a pesar de que la torre de transmisión fue modelada simétricamente y las cadenas y aisladores son idénticas, la solución numérica indica una diferencia entre las cadenas de suspensión del lado derecho e izquierdo de la torre, como se aprecia en las figuras 8a y 8b. La cadena del lado derecho (8a) presenta cambios de voltajes más pronunciados, mientras que en la cadena izquierda (8b), se tiene una distribución de voltajes más uniforme. Por otra parte, las figuras 8c y 8d de las dos cadenas del brazo central en V, se comportan prácticamente iguales y existe una uniformidad en la distribución de voltajes en la cadena, hasta cerca del 90 % de la cadena. En ese punto hay un cambio en la distribución de voltajes que indicaría, que un aislador está soportando más voltaje que el resto de los aisladores de la cadena.

La figura 9. Presenta el voltaje que soporta cada aislador en la cadena, expresado como un porcentaje del voltaje total de la cadena. Se aprecia, de mejor manera en las figuras 9a y 9b, que los aisladores 8, 9, 20 y 25 de la cadena derecha soportan una mayor diferencia de potencial (ddp) que el resto de la cadena, mientras que en la cadena izquierda los aisladores 8, 9, 17, 25, 26 y 28 soportan una mayor ddp pero en menor relación respecto al resto de aisladores de esa cadena. Por otra parte, las figuras 9c y 9d de las dos cadenas del brazo central en V, se comportan prácticamente iguales, pero en su aislador número 25 presentan una mayor ddp, que alcanza aproximadamente el 16 % (aproximadamente 69 kV), del voltaje de la cadena. Este efecto resulta muy interesante y plantearía la posibilidad de investigar (en un posible trabajo futuro), si se debe o no a un efecto de la geometría, al estar esa cadena "encerrada" en la parte central de la torre.

En la tabla 2 se aprecia que en la mayoría de los aisladores no hay una ddp que suponga problemas para el aislamiento, pues tienen voltajes que van hasta aproximadamente un 4 % (unos 17 kV). Hay otros aisladores que tienen valores de ddp mayores al 4 %, en los que se aprecia que el mayor valor se da en el aislador número 25 de la cadena de suspensión izquierda del brazo en V, con una ddp del 16.06 % o 69.2 kV. Según las especificaciones del aislador U300BP de la figura 3, este aislador estaría operando con normalidad dentro de los valores especificados por la norma para su diseño en estado seco, que es de 90 kV. Pero en condiciones de humedad, lluvia o contaminación podría producirse una falla de aislamiento en este aislador, ya que el nivel de aislamiento en condiciones de humedad es de 55 kV. Sin embargo, para aseverar si este aislador puede fallar se requiere realizar el ensayo de laboratorio que determine su nivel de aislamiento real, pues las especificaciones del aislador son estandarizadas con valores mínimos que no son en realidad los que presenta el aislador, y que por lo general suelen ser superiores². Por otra parte, se debería correr la simulación una gran cantidad de veces, utilizando un método aleatorio,

2 Experiencia del autor en la ejecución de ensayos de aislamiento de frecuencia industrial, en el Laboratorio de Alto Voltaje de la Escuela Politécnica Nacional

como el de Montecarlo, que modifique las variables que influyen en esta simulación FEM, y con la determinación de esos resultados obtener una probabilidad de que el voltaje en ese aislador sea de cierto valor. Esta actividad es factible de ejecutarse con el modelo implementado en FEMM, pero excede el alcance de este artículo y será retomada en los trabajos futuros.

Figura 8. (a) Distribución del voltaje a lo largo de la cadena de aisladores tipo I. Lado derecho. (b) Distribución del voltaje a lo largo de la cadena de aisladores tipo I. Lado izquierdo. (c) Distribución del voltaje a lo largo del brazo izquierdo de la cadena de aisladores tipo V. (d) Distribución del voltaje a lo largo del brazo derecho la cadena de aisladores tipo V

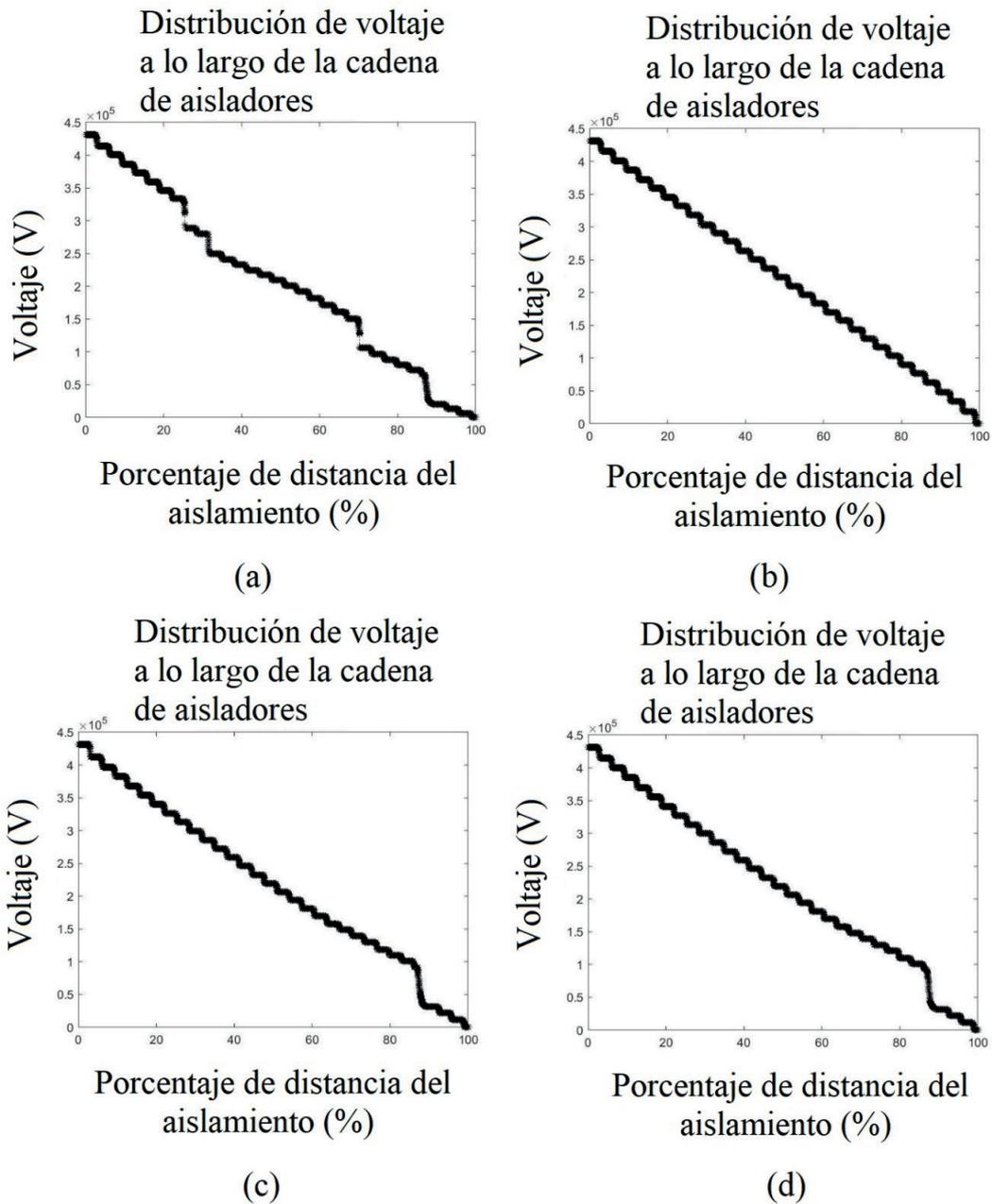


Tabla 2. Distribución de voltajes en las cadenas de aisladores como resultado de la simulación con FEMM

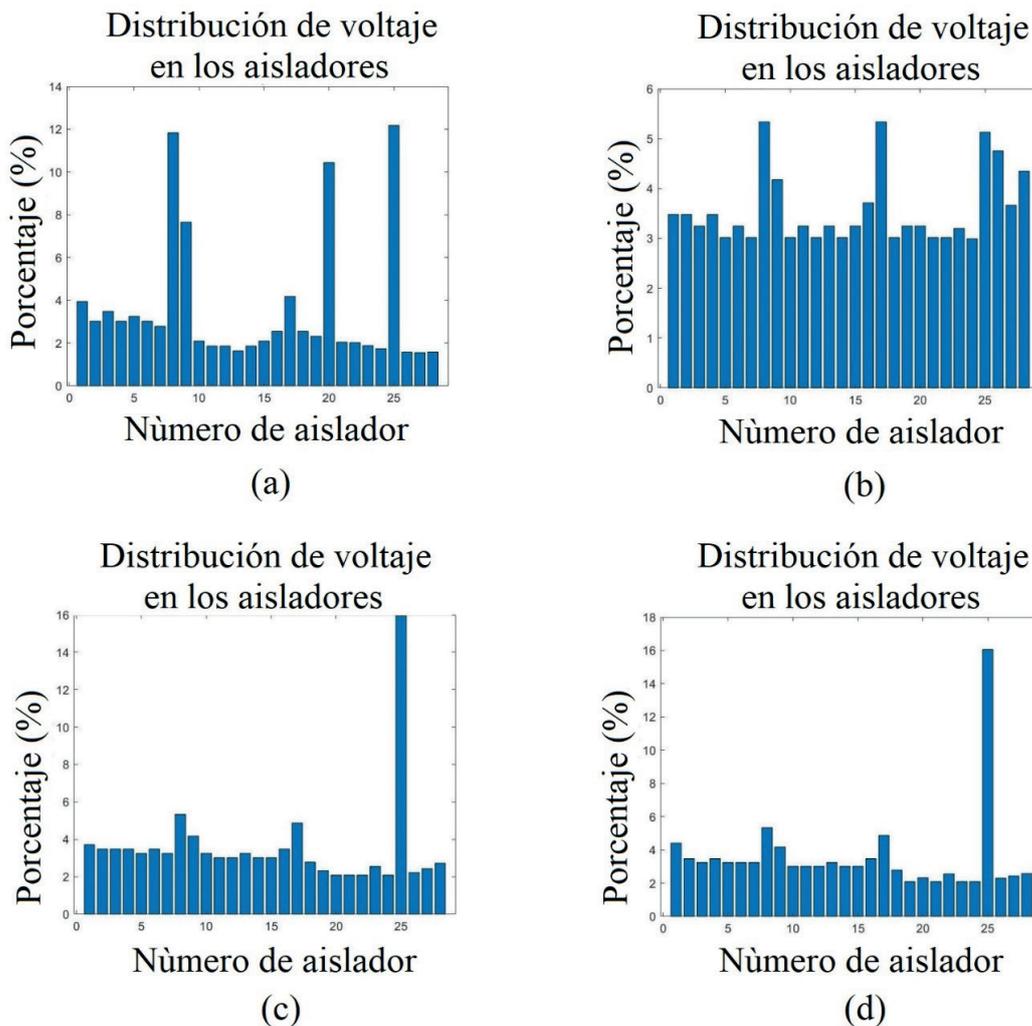
Número de Aislador	Voltaje en el aislador de la cadena de suspensión tipo I (V) Lado derecho	Voltaje expresado en porcentaje del voltaje de la línea (%)	Voltaje en el aislador de la cadena de suspensión tipo I (V) Lado izquierdo	Voltaje expresado en porcentaje del voltaje de la línea (%)	Voltaje en el aislador del brazo derecho de la cadena de suspensión tipo V (V)	Voltaje expresado en porcentaje del voltaje de la línea (%)	Voltaje en el aislador del brazo izquierdo de la cadena de suspensión tipo V (V)	Voltaje expresado en porcentaje del voltaje de la línea (%)
1	17000	3.94	15000	3.48	16000	3.71	19000	4.41
2	13000	3.02	15000	3.48	15000	3.48	15000	3.48
3	15000	3.48	14000	3.25	15000	3.48	14000	3.25
4	13000	3.02	15000	3.48	15000	3.48	15000	3.48
5	14000	3.25	13000	3.02	14000	3.25	14000	3.25
6	13000	3.02	14000	3.25	15000	3.48	14000	3.25
7	12000	2.78	13000	3.02	14000	3.25	14000	3.25
8	51000	11.83	23000	5.34	23000	5.34	23000	5.34
9	33000	7.66	18000	4.18	18000	4.18	18000	4.18
10	9000	2.09	13000	3.02	14000	3.25	13000	3.02
11	8000	1.86	14000	3.25	13000	3.02	13000	3.02
12	8000	1.86	13000	3.02	13000	3.02	13000	3.02
13	7000	1.62	14000	3.25	14000	3.25	14000	3.25
14	8000	1.86	13000	3.02	13000	3.02	13000	3.02
15	9000	2.09	14000	3.25	13000	3.02	13000	3.02
16	11000	2.55	16000	3.71	15000	3.48	15000	3.48
17	18000	4.18	23000	5.34	21000	4.87	21000	4.87
18	11000	2.55	13000	3.02	12000	2.78	12000	2.78
19	10000	2.32	14000	3.25	10000	2.32	9000	2.09
20	45000	10.44	14000	3.25	9000	2.09	10000	2.32
21	8800	2.04	13000	3.02	9000	2.09	9000	2.09
22	8700	2.02	13000	3.02	9000	2.09	11000	2.55
23	8100	1.88	13800	3.20	11000	2.55	9000	2.09
24	7500	1.74	12900	2.99	9000	2.09	9000	2.09
25	52500	12.18	22100	5.13	68900	15.99	69200	16.06
26	6800	1.58	20500	4.76	9600	2.23	9900	2.30
27	6690	1.55	15800	3.67	10500	2.44	10500	2.44
28	6822	1.58	18742	4.35	11739	2.72	11116	2.58

La figura 9 indica que en la configuración geométrica de la torre de transmisión utilizada en este estudio para una línea de 500 kV no se genera una distribución de voltajes uniforme a lo largo de sus cadenas de aisladores. Pueden existir aisladores que lleguen a soportar voltajes excesivos, como en el caso del aislador número 25, lo cual significaría un posible esfuerzo dieléctrico para ese aislador que con el paso del tiempo puede llegar a deteriorarse y producir

una falla de aislamiento por contorneo del arco eléctrico o por perforación del material aislante del aislador.

Si bien el estudio realizado en este artículo no pudo ser contrastado con mediciones de campo, debido a las limitaciones de medición de niveles de voltaje tan elevados en las cadenas de aisladores en el caso de Ecuador, los resultados coinciden con las referencias presentadas en la introducción del artículo, que describen que la distribución de voltajes en las torres de transmisión no es uniforme y que se puede sugerir utilizar anillos metálicos en el primer aislador, o alargar la cadena de aisladores para mejorar la uniformidad de la distribución de voltajes. Con el método de trabajo presentado en el presente artículo, es posible profundizar este tipo de estudios adicionales, para mitigar el efecto negativo de esta distribución de voltajes y prevenir una falla de aislamiento en el futuro en la línea de transmisión.

Figura 9. (a) Distribución del voltaje en los aisladores de la cadena de aisladores tipo I. Lado derecho. (b) Distribución del voltaje en los aisladores de la cadena de aisladores tipo I. Lado izquierdo. (c) Distribución del voltaje en los aisladores del brazo derecho la cadena de aisladores tipo V. (d) Distribución del voltaje en los aisladores del brazo izquierdo la cadena de aisladores tipo V



5. Conclusiones y recomendaciones

Se ha presentado la implementación de un modelo FEM, de una línea de transmisión de 500 kV de Ecuador, con el fin de determinar la distribución de voltajes en su cadena de aisladores. Y se ha obtenido resultados que demuestran la flexibilidad de los métodos FEM, para la resolución de problemas electrostáticos asociados al alto voltaje y que pueden utilizarse como una guía en el diseño del aislamiento de las torres de transmisión de energía eléctrica, ya que es posible observar los lugares dentro de la cadena de aisladores, donde el voltaje es mayor, y modificar los diseños para tener una distribución de voltajes más uniforme; para ello se puede seguir el método descrito en este artículo.

Se observa que las distribuciones de voltaje en los aisladores no son uniformes, esto puede deberse a la geometría y los materiales utilizados en la simulación, lo cual afectaría a la distribución del campo eléctrico en el espacio en estudio. En general, se puede apreciar que la mayoría de los aisladores de la cadena soportan menos del 4 % (aproximadamente 17 kV) del voltaje total de la cadena y por ello no corren ningún riesgo dieléctrico, pues están soportando un voltaje mucho menor a su nivel de aislamiento, que es de 90 kV; pero algunos aisladores pueden soportar mucho más voltaje hasta llegar a un máximo del 16.06 % (aproximadamente 69.2 kV), en el aislador 25 de una de las cadenas de aisladores. Este voltaje es mayor al nivel de aislamiento en mojado del aislador, que es de 55 kV, por lo que en condiciones de lluvia podría presentarse una falla de aislamiento en ese aislador.

Los resultados presentados en este artículo pueden utilizarse para entender el efecto del campo eléctrico sobre el aislamiento de las torres de transmisión de energía eléctrica y se puede extender el estudio de este tema en las torres de transmisión de otros niveles de voltaje del sistema eléctrico ecuatoriano, para conocer la influencia del cambio de materiales en los aisladores y con diferentes geometrías en las torres de transmisión.

El modelo implementado puede utilizarse para realizar estimaciones de voltajes y campos eléctricos en todo el espacio de simulación y determinar posibles optimizaciones en sus diseños, al realizar modificaciones en los materiales y geometrías, que luego permitan observar cambios en las distribuciones de voltajes, y los campos eléctricos en los aislamientos y cercanías de una torre de transmisión.

Bibliografía

- Akbari, E.; Mirzaie, M.; Rahimnejad, A. y Asadpoor, M. (2012). Finite Element Analysis of Disc Insulator Type and Corona Ring Effect on Electric Field Distribution over 230-kV Insulator Strings. *International Journal of Engineering and Technology*, 407-419.
- Antonov, A. S.; Glushkov, D. A. y Kropotuhin, S. Y. (2016). A Set of Models for Investigation of Voltage Distribution along Suspension Insulator String. *2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (ElConRusNW)* (pp. 519-524). St. Petersburg, Russia: IEEE.
- Arconel. (2013). *Plan maestro de electrificación 2013-2022*. Quito-Ecuador: Arconel.
- Arora, R. y Mosch, W. (2011). *High Voltage Insulation Engineering*. Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- Ashouri, M.; Mirzaie, M. y Gholami, A. (2010). Calculation of Voltage Distribution along Porcelain Suspension Insulators Based on Finite Element Method. *Electric Power Components and Systems*, 820-831.
- Benguesmia, H.; M'Ziou, N. y Boubakeur, A. (2018). Simulation of the Potential and Electric Field Distribution on High Voltage Insulator using the Finite Element Method. *Diagnostyka*, 19(2), 41-52.

- Bessedik, S. (2015). *Contournement des isolateurs pollués*. Algeria: Ph.D. thesis in Sciences, Department of Electrical Engineering, University of Oran.
- Chen, L. y Liang, X. (2012). Computational Analysis on Voltage Distribution along Ceramic Insulator Strings of UHV Ac Transmission Line. *Gaodianya Jishu/ High Voltage Engineering*, 376-381.
- Conelec. (2013). *Perspectiva y expansión del sistema eléctrico ecuatoriano*. Quito: Conelec. Recuperado de <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/12/Vol3-Perspectiva-y-expansi%C3%B3n-del-sistema-el%C3%A9ctrico-ecuatoriano.pdf>
- Du Zhiye, L. T. y Daochun, H. (2010). Parallel Computation of Voltage Distribution Along Composite Insulator Strings and Electric Field Intensity on the Surface of Hardware Fittings. *Transactions of China Electrotechnical Society*.
- Huang, D. C.; Ruan, J. J. y Liu, S. B. (2010). Potential Distribution along UHV AC transmission Line Composite Insulator and Electric Field Distribution on the Surface of Grading Ring. *Gaodianya Jishu/ High Voltage Engineering*, 1442-1447.
- Khare, T.; Hasabe, R. y Mandlik, M. (2016). Electric Field and Potential Distribution along Porcelain Insulator under Polluted Conditions using Finite Element Method. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 5(5), 3531-3536.
- Meeker, D. (2006). *Finite Element Method Magnetics User's Manual Version 4.2*.
- Meeker, D. (2018). *Finite Element Method Magnetics: pyFEMM User's Manual*.
- Muniraj, C. y Chandrasekar, S. (2012). Finite Element Modeling for Electric Field and Voltage Distribution along the Polluted Polymeric Insulator. *World Journal of Modelling and Simulation*, 8(4), 310-320.
- Nicolopoulou, E.; Gralista, E.; Kontargyri, V. et al. (2011). Electric Field and Voltage Distribution around Composite Insulators. *XVII International Symposium on High Voltage Engineering*. Hannover.
- Ordal, M.; Long, L.; Bell, R. et al. (1982). Optical Properties of the Metals Al, Co, Cu, Au, Fe, Pb, Ni, Pd, Pt, Ag, Ti, and W in the Infrared and Far Infrared. *Applied Optic*, 22(7), 1099-1120.
- Radwan, R.; Mahdy, A.; Abdel-Salam, M. y Samy, M. (2013). Electric Field Mitigation under Extra High Voltage Power Lines. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 54-62.
- Sima, W.; Yuan, T.; Yang, Q. et al. (2010). Effect of Non-uniform Pollution on the Withstand Characteristics of Extra High Voltage (EHV) Suspension Ceramic Insulator String. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 445-455.
- Transelectric, C. E. (2015). *El Sistema de transmisión de 500 kV contribuye al desarrollo energético del país*. Recuperado de: <https://www.celec.gob.ec/78-quienes-somos/482-el-sistema-de-transmision-de-500-kv-contribuye-al-desarrollo-energetico-del-pais.html>
- Transeselectric, C. E. (2013). *Estudio de impacto ambiental definitivo. Sistema de transmisión de extra alta tensión y sistemas asociados*. 50. Quito.
- Wadhwa, C. L. (1989). *Generation, Distribution and Utilization of Electrical Energy*. United States of America: John Wiley and Sons.
- Zhang, B.; He, J.; Zeng, R. y Liang, X. (2010). Voltage Distribution along a Long Ceramic Insulator String in a High-Voltage Tower Window. *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, 811-823.

Estudio de la migración de aluminio desde las ollas a la colada de avena

(Survey of migration of aluminium from pots to oat beverage)

Tamara Fukalova Fukalova¹, Iván Tapia Calvopiña¹, Eva Quishpe¹, Lorena Goetschel G.², Wilson Parra¹, Vanessa Mena¹

Resumen

La migración de metales hacia los alimentos es un tema concerniente a la inocuidad alimentaria y la ingesta dietética es una fuente importante de exposición no ocupacional al aluminio. En esta investigación se determinó la cantidad de aluminio que se transfiere desde las ollas al preparar colada de avena con naranjilla (*Solanum quitoense*), bebida con pH ácido consumida ampliamente en Ecuador. Su preparación se realizó en ollas de aluminio de cinco marcas comercializadas en Quito y durante siete ciclos de cocción. La cuantificación de la concentración de aluminio transferido a las ciento cuarenta muestras de colada se realizó por espectroscopia de absorción atómica con llama de óxido nitroso-acetileno. Las concentraciones de aluminio transferido al alimento durante los siete tratamientos sobrepasan el límite permisible de 1 mg Al/kg establecido por la Unión Europea (Reglamento Europeo UE 1416:2016), excepto para la marca de olla IV, que en el séptimo tratamiento presenta $0,76 \pm 0,04$ mg Al/kg. El análisis de varianza Anova de dos factores indica que las marcas de las ollas y el número de tratamientos aplicados sí afecta estadísticamente a la migración de aluminio.

Palabras clave

Migración, ollas de aluminio, absorción atómica, alimentos ácidos.

Abstract

The migration of metals from utensils to food during cooking is an issue of food safety. Dietary intake is the main source of non-occupational exposure to aluminum. This research allowed to know the amount of aluminum that is transferred when is preparing an oatmeal beverage with naranjilla (*Solanum quitoense*), an acidic pH drink, widely consumed in Ecuador. The beverage was prepared in aluminum pots of the five most commercialized brands in Quito and it was done in seven cooking cycles. The quantification of the concentration of transferred aluminum in the one hundred and forty oatmeal beverage was performed by atomic absorption Spectroscopy with nitrous oxide-acetylene flame. The concentrations of aluminum transferred to the food during the seven treatments exceed the allowable limit of 1 mg Al /kg established by the European Union (European Regulation EU 1416: 2016), except for the IV brand pot, which presents $0,76 \pm 0,04$ Al/kg in the seventh treatment. The two-factor Anova analysis of variance indicates that the brand of the pots and the number of treatments applied does affect aluminum migration.

Keywords

Migration, aluminium pots, atomic absorption, acid food

1. Introducción

El aluminio es un metal ampliamente distribuido en la naturaleza y utilizado para la elaboración de utensilios de cocina, como ollas, sartenes, recipientes o papel aluminio, empleados para preparar y conservar alimentos. Sin embargo, la preparación y almacenamiento de alimentos en recipientes de aluminio produce el aumento de contenido residual en los mismos (ELIKA, 2014). En los hogares ecuatorianos el uso de las ollas de aluminio es muy frecuente, al igual que en otros países, debido a su bajo costo y a su extensa distribución en el mercado. Los residuos de este metal al en-

1 Universidad Central del Ecuador, Quito – Ecuador ([tfukalova, iltapia, wparra, evaquishpe, vmmena]@uce.edu.ec).

2 Consultora independiente (loregoe@gmail.com)

contrarse en los alimentos pueden tener efectos tóxicos sobre la salud, ya que se ha sugerido que la exposición a este elemento se relaciona con enfermedades neurodegenerativas como el Alzheimer, la encefalopatía por diálisis y otras (Kawahara, Konoha, Nagata, & Sadakane, 2007) (Suay & Ballester, 2002). El resumen de salud pública del aluminio (Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades de Estados Unidos, 2020), indica que las personas con enfermedades renales acumulan mayor cantidad de aluminio en sus cuerpos y son más susceptibles a desarrollar enfermedades óseas y cerebrales; aunque esta ficha toxicológica menciona que la asociación del aluminio con la enfermedad de Alzheimer (EA) aún no es certera. Otros autores mencionan que esta enfermedad neurodegenerativa se presenta como resultado de un deterioro multifactorial de origen genético y ambiental, y que la exposición al aluminio se encuentra dentro de los factores ambientales que podrían estar implicados en su desarrollo, de acuerdo a los resultados obtenidos en algunos estudios (Ferreira, Piai, Takayanagi, & Segura-Muñoz, 2008), por lo que, se recomienda que se evite la exposición innecesaria a este metal, debido a su larga permanencia en el ser humano y a sus efectos en la salud (Kawahara, Konoha, Nagata, & Sadakane, 2007).

Considerando que una de las vías de exposición al aluminio, son los alimentos preparados o almacenados en recipientes de aluminio, factores tales como pH del alimento, tiempo en el que permanece en contacto con el recipiente, consistencia de preparación y la mala práctica culinaria de guardar las comidas preparadas en las mismas ollas, aumentan la probabilidad de toxicidad por aluminio (World Health Organization, 1997). La disolución de este metal, al igual que otros metales es altamente dependiente del pH, temperatura y presencia de agentes complejantes. Al ser de oxidación fácil, la superficie de aluminio está cubierta de una película protectora compacta de óxido de aluminio. No obstante, la disolución de esta película protectora aumenta en medios ácidos y alcalinos, proceso que ocurre en la superficie de los utensilios de cocina de aluminio (Layla & Juhaiman, 2010).

La normativa de la Unión Europea, en su Reglamento (UE) 2016/1416, del 24 de agosto de 2016, sobre materiales y objetos plásticos destinados a entrar en contacto con alimentos (Diario Oficial de la Unión Europea, 2016), fija como permitido un límite máximo de migración del aluminio de 1 mg/kg de alimento, mientras que el Comité del Codex Alimentario sobre Contaminantes de los Alimentos (JECFA) estableció una ingesta semanal tolerable provisional (ISTP) para el aluminio de 1 mg/kg peso (Codex Alimentarius, 2007).

A nivel mundial se han realizado varios estudios para conocer la cantidad de metal migrado a los alimentos desde los utensilios o recipientes de cocina. Así, Luján (2010) en Argentina, realizó la cocción de algunos alimentos, preparó infusiones e hirvió agua en recipientes de aluminio y otros materiales, y demostró que la transferencia del metal es más alta cuando el agua tiene pH ácido o neutro que cuando es alcalino. Concluye que: "todas las personas que cocinan el agua y los alimentos en recipientes de aluminio se exponen a dosis hasta ocho veces superiores al nivel máximo de aluminio que aporta el agua potable". Otro estudio realizado en España sobre los niveles de aluminio en varios alimentos consumidos en ese país, muestra concentraciones de aluminio entre 0.171 a 70.100 ug/g de alimento (López, Cabrera, Lorenzo, & López, 2000). En una investigación realizada por Gramicconi, Ingraio, Milana et al. (1996), en Italia, los resultados muestran que la migración desde varios tipos de recipientes y ollas de aluminio hacia diferentes alimentos es variable, lo que puede deberse a parámetros como el pH, ya que alimentos como picles o salsa de tomate, que tienen pH ácido, presentan mayor migración.

Un estudio reciente llevado a cabo en Alemania por Stahl y colaboradores (2017), examinó la migración del aluminio desde recipientes de cocina, y desde los materiales de contacto hacia

los alimentos y encontró que el límite máximo de transferencia de aluminio fijado en 5.00 mg/l por el Consejo Europeo en el 2013 (European Directorate for the Quality of Medicines & Health-Care, 2013), no se excede en aceite o agua potable; sin embargo, el límite es claramente excedido en una solución al 0.5% de ácido cítrico que llega a 638 mg/l. Esto significa que en la Ingesta Semanal Tolerable (TWI: 1 mg Al/kg/semana), se excede en 298% para un niño de 15 kg y 63.8% para un adulto de 60 kg de peso. En India se investigó la migración de aluminio utilizando ollas nuevas de este metal y se observó que a medida que el pH baja y que se incrementa el uso de las ollas, disminuye la concentración de aluminio y que la migración es muy baja cuando se utiliza utensilios de aluminio anodizado (Semwal, Padmashree, Khan, Sharma, & Bawa, 2006).

En Ecuador se realizó un estudio donde se utilizaron ollas nuevas de las mismas marcas que en el presente estudio. Se cocinó arroz, alimento de pH neutro, y se obtuvieron resultados dentro de la normativa europea a partir del tercer ciclo de cocción (Cisneros, Tapia, Goetschel, & Fukalova, 2019). Además, se cuenta con resultados de una investigación en la que se analizó el contenido de aluminio en muestras de colada morada, bebida de pH ácido, comercializada en mercados, y se observó que la mayoría de las muestras presenta niveles de aluminio superiores al fijado en la normativa (Salazar & Goetschel, 2018).

El objetivo del presente estudio fue determinar la concentración del residuo de aluminio migrado desde las ollas de este metal, en la preparación de colada de avena con naranjilla, por espectroscopia de absorción atómica, a fin de obtener datos de línea base y contrastarlos con el límite de migración permitido para este metal a los alimentos, establecido por la Unión Europea (UE). Este alimento fue escogido por ser una bebida tradicional consumida en Ecuador, que generalmente se prepara con frutas, por lo que presenta un pH ácido. En el año 2018, el Ecuador fue el mayor consumidor de avena para alimentación humana en América del Sur (Ministerio de Agricultura de Chile Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, 2018), y gran parte de este alimento se utiliza para elaborar colada, lo que justifica la importancia de realizar este estudio.

2. Metodología

2.1. Selección de los recipientes de aluminio

Se seleccionaron cinco marcas de ollas de aluminio para preparación de la colada de avena, a un rango de pH determinado y la misma cantidad de ingredientes durante siete ciclos de cocción.

Las marcas adquiridas se delimitaron por procesamiento de la información recolectada a través de una encuesta realizada a 100 usuarios *in situ* (un muestreo aleatorio simple sin reposición), en tres sectores muy concurridos de la ciudad de Quito. Se adquirieron las ollas de las marcas de uso más frecuente según las encuestas y de características similares en lo que al volumen se refiere. Se las codificó como I, II, III, IV, V y VI; se midió el espesor de cada olla con un micrómetro análogo marca Mitutoyo (precisión $\pm 2\mu\text{m}$) y se realizó el trabajo experimental.

2.2. Preparación de la unidad experimental

Se estableció una formulación de colada de avena con naranjilla, precisando las cantidades de ingredientes (avena, azúcar, pulpa de naranjilla y agua potable), para mantener el pH en el rango de 4.0– 4.5. Para la preparación de la colada, se colocó en cada olla 600 ml de agua de calidad para consumo humano y uso doméstico con las siguientes características: pH entre 6.5 y 8.5; dureza 300 mg/l y contenido máximo de aluminio 0.2 mg/l. Se llevó a ebullición, luego se colo-

caron 25 g de avena, 25 ml de pulpa de naranjilla y 25 g de azúcar (de una sola marca comercial conocida). Se dejó hervir por 15 minutos, revolviendo cada 5 minutos por 30 segundos, hasta obtener una consistencia espesa. Se retiró del fuego y se dejó enfriar.

2.3. Concentración de aluminio migrado

Para descartar el aporte de aluminio como fuente indirecta, los ingredientes de la colada y el agua utilizados en la cocción fueron analizados previamente por espectroscopia de absorción atómica, obteniendo resultados por debajo del límite de detección <0.12 mg/l de aluminio en todos los análisis efectuados.

En total 140 muestras fueron analizadas. De cada unidad experimental se tomaron 50.0 gramos de colada de avena por cada ciclo de cocción. Esta muestra se calcinó en una mufla Carbolite, modelo RHF 1400 para obtener cenizas totales (método oficial AOAC 923.03). A continuación, éstas se sometieron a un proceso de digestión ácida, añadiendo 2 ml de ácido nítrico (65% Emsure[®]) y 2 ml de peróxido de hidrógeno (30 % Emsure[®]) y un proceso de calentamiento hasta que quede un residuo cercano a 3 ml. Las muestras digeridas se filtraron y se diluyeron a 10 ml con agua destilada.

La concentración de aluminio se determinó mediante la técnica de espectroscopia de absorción atómica (AAS), en un equipo Perkin Elmer, modelo AA 240FS con comburente óxido nitroso-acetileno y longitud de onda 309.30 nm.

La cuantificación se realizó mediante el uso de una curva de calibración en el rango de 2 a 10 mg/l, a partir de un estándar de aluminio de 1000 mg/l (AcuStandar, lote 216115074). Para aseguramiento de la calidad se verificó la linealidad, exactitud y precisión del método, comprobando los límites de detección (LD), de cuantificación (LC), porcentaje de recuperación y la repetibilidad.

2.4. Análisis estadístico

Para determinar la migración de aluminio, se trabajó con cinco marcas de ollas en siete ciclos de cocción. Se realizó un análisis de varianza de dos factores con una sola réplica por muestra para un total de 140 unidades experimentales. Los resultados se analizaron con el programa IBM SPSS Statistic versión 20.

2.5. Estudio de microsuperficie de ollas

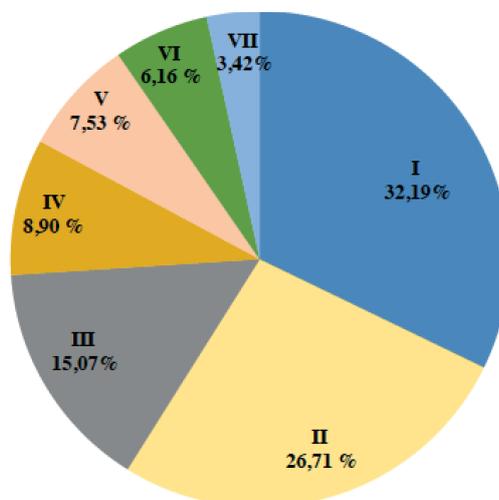
Se utilizó un microscopio de fuerza atómica (AFM) marca Park System modelo NX10, Cantilibre NCHR 10 M, con punto fijo 9E3 (nm), amplitud 20.185E3 (nm), frecuencia 308.08E3 (Hz) y conducción 0.64 %, para determinar la rugosidad en un área de 10 μm de la olla de la marca I, por ser la de mayor preferencia en el mercado, luego del primer uso y de siete usos, lo que permitió evaluar la diferencia de rugosidad encontrada.

3. Resultados y discusión

3.1. Identificación de las marcas de ollas para la investigación

Según resultados procesados de la encuesta realizada (análisis estadístico MODA), en la figura 1 se muestra la preferencia de las marcas de ollas en la ciudad de Quito. La investigación se realizó con las cinco marcas de mayor aceptación en el mercado.

Figura 1. Porcentaje de las ollas más adquiridas en una encuesta realizada en la ciudad de Quito



La preferencia de las marcas de ollas se debe básicamente al precio y a la calidad (durabilidad), tal como se refleja en la figura 2. Además, para los encuestados hay predilección por el espesor de las paredes de las ollas a utilizar para la elaboración de los preparados líquidos, como es la colada de avena, lo que se muestra en la figura 3.

Figura 2. Criterios de preferencia de las ollas

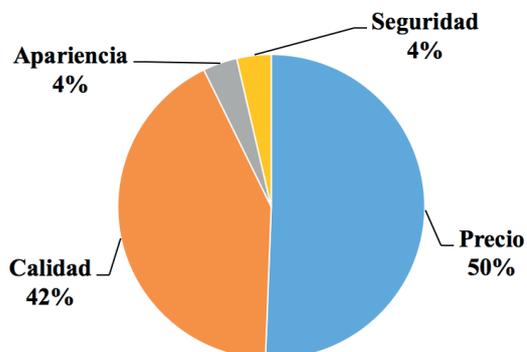
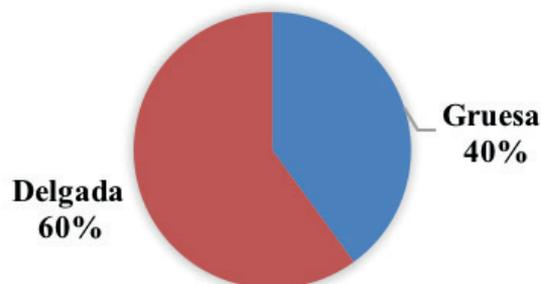


Figura 3. Predilección por el espesor de las ollas



3.2. Determinación del espesor de las paredes de las ollas

Como se muestra en la tabla N1, el espesor de las cinco marcas de ollas utilizadas en la investigación presentó valores entre 0.51 ± 0.03 y 1.22 ± 0.04 mm, aceptables según la normativa ecuatoriana INEN 2361:2005 (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2012), para ollas de diámetro nominal de 16 cm, la que indica que el espesor mínimo de la pared es 0.5 mm.

Tabla 1. Resultados de espesor de las ollas de aluminio

Marcas de ollas					
Repeticiones	I	II	III	IV	V
Medida del espesor (mm)					
1	1.10	1.19	0.51	0.84	1.22
2	1.06	1.21	0.52	0.82	1.23
3	1.09	1.20	0.50	0.84	1,20
Promedio	1.08	1.20	0.51	0.83	1,22
Desviación	0.021	0.010	0.010	0.012	0.015
LC al 95%	1.08±0.05	1.20±0.03	0.51±0.03	0.83±0.03	1.22±0.04

3.3. Estandarización del método de análisis por absorción atómica

Se cumplieron los parámetros de verificación del método directo de llama de óxido nitroso-acetileno 3.20 APHA 3111 D, para una muestra de alimento de características ácidas (colada de avena con naranjilla), como linealidad, exactitud, precisión del método. La curva de calibración presentó un alto coeficiente de correlación lineal ($R > 0.9993$) y se estableció que el límite de detección (LD) es de 0.12 mg/l, y el límite de cuantificación (LC) es de 0.4 mg/l. La exactitud del método evidenció 97.95 % de recuperación, que se encuentra dentro del rango validado para el equipo que es 80-120 %. El ensayo de precisión permitió asegurar la repetibilidad del método, con coeficiente de variación con un promedio de 0.44 %.

4. Concentraciones de aluminio de las muestras analizadas

En la tabla N2 se encuentran los promedios de la concentración de aluminio migrado hacia las muestras de colada, alimento ácido, cuyo pH varió de 4.30 a 4.40 y sus grados Brix de 6.5 a 7.2. Los valores máximos de 2.40 ± 0.03 mg/kg corresponden al primer tratamiento en la marca V y valores mínimos de 0.76 ± 0.04 mg/kg al séptimo tratamiento en la marca IV. Se observó que las ollas, durante los siete ciclos de cocción aplicados para la colada, presentaron una migración de aluminio por encima del límite permitido por la Unión Europea (UE), excepto en el último tratamiento para la marca IV (0.76 mg Al/kg).

Tabla 2. Resultados de análisis de aluminio migrado para cinco muestras de olla y siete ciclos de cocción

Ciclos de cocción	Marcas de ollas utilizada				
	I	II	III	IV	V
	Concentración del Al (mg/kg)				
1°	2.13±0.07	1.45±0.04	1.84±0.04	2.03±0.02	2.40±0.03
2°	1.53±0.02	1.38±0.01	1.75±0.02	1.66±0.02	2.25±0.01
3°	1.54±0.05	1.34±0.02	1.46±0.04	1.43±0.03	1.69±0.06
4°	1.26±0.07	1.21±0.03	1.40±0.01	1.22±0.02	1.47±0.02
5°	1.33±0.01	1.07±0.03	1.28±0.01	1.17±0.02	1.40±0.02
6°	1.22±0.04	1.09±0.01	1.04±0.01	1.13±0.03	1.39±0.01
7°	1.18±0.02	1.02±0.03	1.05±0.04	0.76±0.04	1.23±0.02

En el análisis de varianza de dos factores se observa que los ciclos de cocción, al igual que las marcas de ollas, tienen un efecto significativo, al 95 % de confianza, en la cantidad de aluminio migrado durante la cocción de la colada de avena. Adicionalmente, al aplicar una prueba múltiple (DMS), se concluye que el comportamiento de la migración de aluminio hacia las muestras, en las cinco marcas de ollas durante los siete ciclos de cocción, disminuye conforme aumenta el número de ciclos de cocción.

En la investigación realizada por (Salazar & Goetschel, 2018), en muestras preparadas de colada morada, cuyo pH osciló entre 3.72 y 4.58, adquiridas en los mercados de Quito, se determinó que la migración de aluminio, durante el almacenamiento del alimento en ollas del mismo metal, sobrepasa el límite permisible establecido por la UE. Los parámetros de preparación y cocción de estas muestras fueron desconocidos, mientras que este estudio se realizó bajo condiciones controladas y el pH fluctúa entre 4.3 y 4.4. En los dos estudios, la concentración de aluminio sobrepasa los límites establecidos por la UE.

En el trabajo realizado por (Cisneros, Tapia, Goetschel, & Fukalova, 2019), se analizó la migración de aluminio en las mismas marcas de ollas en seis ciclos de cocción, pero con un alimento de pH neutro que es el arroz. La migración de aluminio fue detectable hasta el tercer ciclo y en los últimos ciclos fue menor al límite máximo establecido por la UE que es 1 mg/l. Estos resultados contrastan con los obtenidos en este estudio y permiten determinar la influencia del pH en la migración del metal.

Al comparar los resultados de este estudio con los resultados obtenidos en otros países (Gramiccioni, Ingraio, Milana, Santaroni, & Tomassi, 1996). (Luján, 2010), se observa semejanza en cuanto a que la migración a pH ácido es mayor que a pH neutro o básico, lo que concuerda también con el estudio en el cual la migración es mayor en la solución de ácido cítrico al 0.5%, cuyo pH es menor a 4.5 (Stahl, y otros, 2017). Mientras que los resultados obtenidos por López, Cabrera y Lorenzo (2000) en España, muestran los siguientes valores: 1.362 a 6.610 $\mu\text{g/g}$ en alimentos del mar; 0.171 a 29.688 $\mu\text{g/g}$ en vegetales; 19.560 a 70.100 $\mu\text{g/g}$ en aceite de oliva; 0.424 a 6.430 $\mu\text{g/g}$ en lácteos; y 25.600 a 58.057 $\mu\text{g/g}$ en bebidas estimulantes e infusiones, mostrando una concentración variable que puede estar relacionada al pH del alimento.

Los resultados corroboran lo concluido por Semwal, Padmashree, Khan et al. (2006). ya que, al utilizar ollas nuevas, la concentración de aluminio migrado disminuye a medida que se incrementa el uso de las ollas. También concluyen que los alimentos ácidos aumentan la migración del metal. En ese estudio adicionalmente se realizaron pruebas con utensilios de aluminio anodizado, que mostró menor migración, por lo que sería conveniente estudiar los materiales de cada una de las marcas de ollas de aluminio comercializadas en Ecuador y relacionarlo con la migración, lo que podría explicar las variaciones en la cantidad de aluminio migrada; por ejemplo, en este caso, en la marca IV, que incluso llega a ser menor del límite establecido a partir del séptimo ciclo.

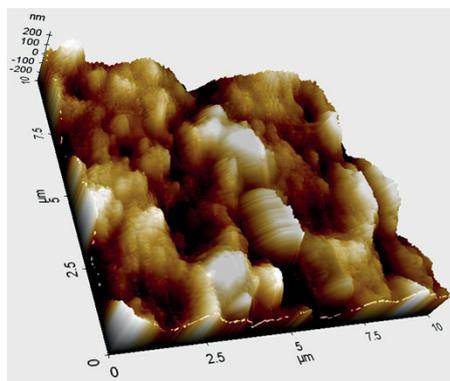
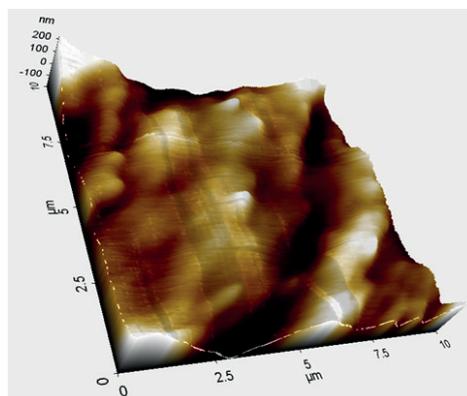
5. Evaluación de la rugosidad de la olla tomada como referencia

El análisis de rugosidad de la olla marca I, que es la de mayor comercialización en la ciudad de Quito según las encuestas, se realizó comparando los valores para el fragmento de la olla de un solo uso y luego de siete usos. Los resultados se muestran en la tabla 3, e indican que la rugosidad obtenida en un área de 10 μm^2 en la olla de un solo uso, es mayor y disminuye cuando se aplican varios usos según se visualiza en las figuras 5 y 6.

Tabla 3. Rugosidad obtenida en la olla I

Muestra de olla I	Ra		Rz	
	Nm	μm	Nm	μm
Un solo uso	55.909	0.056	530.769	0.531
Luego de siete usos	34.928	0.035	400.410	0.400

Rz: media de los valores absolutos (5 crestas perfil más alto y 5 valles del perfil más bajo).
Ra: media aritmética de los valores absolutos de las separaciones y del perfil rugoso.

Figura 5. Rugosidad de la olla I de un solo uso determinada mediante AFM**Figura 6.** Rugosidad final de la olla luego de siete usos determinada mediante AFM

Las imágenes permiten observar el cambio de la rugosidad de la superficie de la olla I. En el séptimo uso se evidencia la disminución de las crestas y valles que constituyen la rugosidad, obteniendo un Ra experimental que corresponde a la superficie de calibre de un grado de rugosidad N2, según la norma DIN 4769 y de acuerdo al documento sobre Rugosidad Superficial (Grupo Tecnología Médica, 2017), en donde también se explica que el perfil de rugosidad o de textura primaria depende de los procesos de mecanizado durante la fabricación. La rugosidad superficial de la olla I disminuyó luego del uso, lo que puede relacionarse con la cantidad de aluminio desprendido desde la superficie. El descenso en la lixiviación de aluminio desde la olla IV hacia la colada de avena en el último ciclo de cocción, por debajo del límite permitido, podría

relacionarse con una insignificante pérdida de su rugosidad en la micro superficie de la olla, análisis que no se realizó en este estudio.

La variabilidad en los resultados obtenidos demuestra la posible influencia de la calidad del material de las ollas, además del proceso de fabricación. Ya que según otros estudios solo el aluminio anodizado o recubierto aporta una capa protectora que evita que el metal se transfiera al alimento (Vergara, Nerey, & Guédez, 2011) y puede resistir la corrosión ocasionada por el agua, la sal y otros agentes (Gupta, Meenu, & Peshin, 2019).

7. Conclusiones

Los resultados obtenidos en el presente estudio permitieron conocer las concentraciones de aluminio migrado hacia la colada de avena, debido al uso de las ollas de aluminio con mayor incidencia de comercialización en Quito (Ecuador), y se evidenció que las concentraciones están por encima del nivel máximo permitido por la normativa de la UE para este elemento.

La cantidad de aluminio migrado hacia las muestras, indica que los alimentos ácidos preparados en recipientes de aluminio son contaminados con trazas de este metal, lo que puede representar riesgos para la salud de los consumidores. Los resultados indican que la concentración en promedio de aluminio encontrado durante siete ciclos de cocción para cuatro ollas, supera el límite máximo establecido por el Reglamento Europeo UE 1416:2016 (1 mg/kg de alimento).

El contenido de aluminio de los distintos alimentos depende no solamente de sus características intrínsecas sino también de la forma en la fueron preparados, por lo tanto, los hábitos alimentarios de una población condicionan fuertemente la ingesta diaria de aluminio. Es el caso de adicionarle una fruta ácida como la naranjilla a una bebida de avena.

El uso diario de utensilios y cacerolas de aluminio no es recomendado para la cocción de alimentos ácidos, ni para almacenar los alimentos en recipientes de aluminio, ya que el pH bajo (alta acidez) afecta la rugosidad de la micro superficie de las ollas, que trasladan trazas de este metal a los alimentos.

Bibliografía

- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades de Estados Unidos. (2020). *Atsdr*. Recuperado de https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts22.html
- Cisneros, K.; Tapia, I.; Goetschel, L. y Fukalova, T. (2019). Evaluación de migración de aluminio durante la cocción de arroz blanco en ollas de aluminio. *Info Analítica Vol. 7 No. 2*, 57-69.
- Codex Alimentarius. (2007). *Informe del comité del codex sobre contaminantes de los alimentos*. Beijing: Codex.
- Diario Oficial de la Unión Europea. (2016). *Reglamento (UE) 2016/1416 de la Comisión de la Unión Europea sobre materiales y objetos plásticos destinados a entrar en contacto con alimento*.
- Elika. (2014). *Aluminio*. Fundación Vasca para la Seguridad Agroalimentaria. Recuperado de <https://seguridadalimentaria.elika.eus/wp-content/uploads/2018/01/29.Aluminio.pdf>
- European Directorate for the Quality of Medicines & HealthCare. (2013). *Metals and Alloys Used in Food Contact Materials and Articles*. Francia: Council of Europe.
- Ferreira, P.; Piai, K.; Takayanagi, A. y Segura-Muñoz, S. (2008). Aluminio como factor de riesgo para la enfermedad de Alzheimer. *Revista Latino Americana de Enfermagem*. Vol.16(1), 151-157.
- Gramiccioni, L.; Ingraio, G.; Milana, M. et al. (1996). Aluminium levels in Italian Diets and in Selected Foods from Aluminium Utensils. *Food Additives & Contaminants*. 767-774.

- Grupo Tecnología Médica. (2017). *Mitutoyo Rugosidad Superficial*. Catálogo número E70 Recuperado el 18 de mayo de 2019 de <http://www3.fi.mdp.edu.ar/tecnologia/archivos/TecFab/10.pdf>
- Gupta, Y.; Meenu, M. y Peshin, S. (2019). Aluminium Utensils: Is it a Concern? *The National Medical Journal of India*. 38-40.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2012). *NTE INEN 2361:2005 Norma Técnica Ecuatoriana: Artículos de uso doméstico. Ollas de aluminio*. Quito- Ecuador: INEN.
- Kawahara, M.; Konoha, K.; Nagata, T. y Sadakane, Y. (2007). Aluminum and Human Health: Its Intake. Bioavailability. *Biomed Res Trace Elements*. 211-220.
- Layla, A. y Juhaiman, A. (2010). Estimating Aluminium Leaching from Aluminium Cook Wares in Different Meat Extract and Milk. *Journal of Saudi Chemical Society*. 131-137.
- López, F.; Cabrera, C.; Lorenzo, M. y López, M. (2000). Aluminum Content in Foods and Beverages Consumed in the Spanish Diet. *Journal of Food Science Vol. 2*. 206-210.
- Luján, J. (2010). Ingesta de aluminio al cocinar alimentos y hervir agua con utensilios domésticos. *Tecnología y ciencia. Año 3- No. 6*. 26-32.
- Ministerio de Agricultura de Chile Oficina de Estudios y Políticas Agrarias. (diciembre de 2018). *Prospectivas del mercado mundial de la avena para consumo humano*. Recuperado de Odepa: <https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2018/12/estudioAvena2018.pdf>
- Rugosidad, S. (2010). Recuperado de Grupo tecnología mecánica-procesos de fabricacion: www.academia.edu.ar/; www3.fi.mdp.edu.ar/tecnologia/archivos/TecFab/10.pdf
- Salazar, N. y Goetschel, L. (2018). *Determinación de aluminio en muestras de colada morada, mediante el método de absorción atómica-horno de grafito*. Quito: Universidad Central del Ecuador.
- Semwal, A.; Padmashree, A.; Khan, M. et al. (2006). Leaching of Aluminium from Utensils during Cooking of Food. *Journal of the Science of Food and Agriculture 86(14)*. 2425 - 2430.
- Stahl, T.; Falk, S.; Rohrbeck, A. et al. (2017). Migration of Aluminium from Food Contact Materials to Food-a Health Risk for Consumers? *Environmental Sciences Europe*. 29(19). 1-8.
- Suay, L. y Ballester, F. (2002). Revisión de los estudios sobre exposición al aluminio y enfermedad de Alzheimer. *Revista Española de Salud Pública*. 6(76). 645-658.
- Vergara, L.; Nerey, L. y Guédez, V. (2011). Modelo predictivo de la rugosidad y porosidad en aluminio Al3003-B14 y Al6063-T6 anodizado usando análisis multi-factorial. *Rev Ciencia e Ingeniería*. 105-112.
- World Health Organization. (1997). *International Programme on Chemical Safety. Environmental Criteria 194: Aluminium*. Geneve: United Nations Environment Programm.

Fenología floral de la guaba (*Inga edulis*) en un valle interandino del Ecuador

*(Ice cream bean (*Inga edulis*) flower phenology in Ecuadorian inter-Andean valley)*

Maritza Quijia-Quijia¹, Stephanie Castillo-Torres¹, Wilson Vasquez-Castillo¹, Mauricio Racines-Oliva²

Resumen

La investigación se realizó en la provincia de Pichincha, cantón Quito, parroquia Nayón, cuya temperatura varía entre 18 °C a 22 °C y se encuentra a una altitud de 2325 msnm. La guaba es una especie utilizada para brindar sombra en algunos cultivos como el café y el cacao. En este estudio se seleccionaron 15 árboles de guaba, en los cuales se marcaron 30 yemas vegetativas/planta, para seguirlas en el tiempo y observar su desarrollo. Se realizaron observaciones semanales del paso de las fenofases vegetativa a reproductiva del cultivo, para establecer la duración de cada una y la actividad térmica necesaria para que estos cambios se puedan dar.

Durante el estudio los árboles de guaba seleccionados presentaron brotación, caída del follaje y fructificación constante. Estos cambios variaron dependiendo de las condiciones climáticas de Nayón. Con los resultados obtenidos finalmente se determinó que la etapa de floración duró 155 días para el cultivo de guaba y un total de 497 unidades térmicas necesarias para cosechar frutos.

La escala BBCH (*Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie*) describe el desarrollo fenológico de los cultivos desde la germinación hasta la senescencia; comprende 8 etapas principales que son la germinación, desarrollo de las hojas, formación de brotes, aparición de inflorescencias, floración, desarrollo de los frutos, maduración de frutos y senescencia. Con base a esta escala se desarrolló una descripción fenológica visual de la guaba de la fase de floración y desarrollo del fruto, con las subfases más importante visualizadas (521, 525, 529, 621, 625, 629, 723, 725, 729). Esta información básica y de gran utilidad constituye un fundamento clave para comprender mejor el proceso de desarrollo de este cultivo y mejorar las prácticas de campo y producción.

Palabras clave

Inga edulis; fenofases; BBCH; floración; fructificación.

Abstract

The research was carried out in the Nayón-Quito, Ecuadorian Pichincha-Province, with temperatures ranging between 18 - 22 °C, located at an altitude of 2325 meters above sea level. Ice cream bean is a species used to provide shade in some crops such as coffee and cocoa. In this study, 15 ice cream bean trees were selected in which 30 vegetative buds/plant were marked to follow them in time and observe their development. Weekly observations were made of the transition of the vegetative to reproductive structures of the crop in order to establish the duration of each stage presented by the plant as well as the thermal cumulation necessary for these changes to occur.

During the study, the selected trees selected presented constant bud break, foliage fall and fruiting. These changes varied according to the climatic conditions of Nayón. It was finally determined that ice cream bean flowering stage lasted 155 days and a total of 497 thermal units were needed to fruit harvest.

The BBCH scale (*Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie*) describes the phenological development of crops from germination to senescence, comprising 8 main stages that are germination, leaf development, bud formation, inflorescence formation, flowering, fruit development, fruit ripening and senescence. Based on this scale a visual-phenological description of the ice cream bean fruit setting was obtained with the most relevant subphases presented by the plants (521, 525, 529, 621, 625, 629, 723, 725, 729). This information constituted basic and outmost useful and relevant data to better understand the process of development of this crop and improve field and production practices.

Keywords

Inga edulis; phenophases; BBCH; flowering; fructification.

- 1 Universidad de las Américas, Facultad de Ingenierías y Ciencias Aplicadas (FICA). Quito-Ecuador. (Maritza Quijia-Quijia, maritza.quijia@udla.edu.ec 0000-0002-6085-7255; Stephanie Castillo-Torres, myriam.castillo@udla.edu.ec 0000-0002-0611-6210; Wilson Castillo-Vasquez, wilson.vasquez@udla.edu.ec 0000-0002-2163-4243.
- 2 Universidad de las Américas, Facultad de Ingenierías y Ciencias Aplicadas (FICA). Quito-Ecuador. mauricio.racines@udla.edu.ec 0000-0003-4335-4311. Autor de correspondencia.

1. Introducción

La guaba es un árbol de copa densa, aparasolada y ancha con ramificaciones, que alcanza hasta de 30 m de altura, con diámetros de 30 a 60 cm de tronco. Posee una corteza recta, cilíndrica y de color marrón claro. Sus hojas son compuestas paripinnadas, con una longitud de 15 a 25 cm. Posee un raquis con glándulas en forma de cráter, en el cual se encuentran de 4 a 6 pares de folíolos opuestos. Presenta folíolos con base obtusa, aguda u oblonga de color verde oscuro. Las inflorescencias son racimos terminales que pueden medir entre 7 y 12 cm de diámetro polar. Las flores son hermafroditas, con ovario supero, de color blanco; llegan a medir entre 3.5 a 4 cm de diámetro polar. Posee un cáliz y corona tubular con 5 a 4 lóbulos, en los cuales existen numerosos estambres con filamentos filiformes que presentan un diámetro polar entre 3 a 4 cm (Falcao y Clement, 2000). Es originaria de Centroamérica, el Caribe y la Amazonía, así como de los bosques andinos. Esta planta se desarrolla en temperaturas que van desde los 15 a los 22 °C (Silva, Rogez, Da Silva y Larondelle, 2013). La guaba o guabo se desarrolla mejor en suelos alcalinos y ácidos, sin embargo, el pH óptimo para el cultivo es superior a 4. Igualmente, esta planta puede soportar cierto grado de salinidad. Se adapta a precipitaciones entre 1000 mm a 1300 mm (Sobanski y Marques, 2014).

En América Latina la guaba es utilizada en la industria maderera y alimenticia. Dentro de su género se encuentran aproximadamente 300 especies de árboles neotropicales, entre los cuales la gran mayoría son utilizados en la agricultura. Alrededor de 50 de estas especies poseen frutos comestibles. De igual manera, 33 especies del género *Inga* son utilizadas en los cultivos perennes por la sombra que brindan (Silva, Rogez, Da Silva y Larondelle, 2013).

Inga edulis ayuda a controlar la fragmentación del suelo evitando la erosión, ya que toleran los suelos ácidos (Silva, Rogez, Da Silva y Larondelle, 2013). Anualmente al caer las hojas forman un matillo que ayuda a mantener la humedad en el suelo y suprime el crecimiento de arvenses (Sobanski y Marques, 2014).

El manejo del cultivo de guaba se realiza con densidades de siembra de 70 a 150 árboles por hectárea, debido a la cantidad de follaje; estos son sembrados en distancias de 12x12 m. Sin embargo, en algunos casos los productores después de 3 o 4 años deben remover algunos árboles para evitar competencia.

Para el desarrollo ideal de la guaba, las plántulas deben ser sembradas en un lugar que cumpla con las condiciones agroclimáticas de esta especie. Durante el primer año se debe eliminar las arvenses que crecen alrededor del cultivo con el fin de evitar competencias por luz, agua y nutrientes. Este procedimiento se debe realizar hasta que el follaje pueda producir sombra suficiente para de esta manera limitar el desarrollo de arvenses.

El árbol no se poda completamente, solo las ramas secas puesto que, si se cortan por completo las ramas, el árbol muere. Los raleos se realizan en épocas lluviosas para aprovechar la luz y de esta manera influir positivamente en la productividad de nudos en las ramas (Monro, Velarde, Flores et al., 2016).

Las plantas de guaba se han ido adaptando a las distintas condiciones de clima y suelo. Por lo tanto, la floración irá de la mano con las condiciones ambientales, a las que se encuentren expuestas, como luz, temperatura y nutrientes (García, 2008). El principal objetivo de la floración es la reproducción de una planta, por lo cual, cada planta se caracteriza por experimentar transformaciones o cambios muy notables en un tiempo determinado. Todos estos cambios tienen orígenes en procesos bioquímicos internos de la planta, que tienen relación con

las condiciones ambientales. Estos procesos emiten señales que reciben los meristemos para que inicie la fase de reproducción. En el caso de los árboles se puede observar la brotación de yemas, las cuales pueden ser florales y foliares (García, 2008).

El desarrollo y crecimiento de la gran mayoría de las plantas dependen de la temperatura, ya que esta interviene en los cambios de cada estado fenológico. Durante el desarrollo y crecimiento suceden cambios en las plantas desde la germinación hasta la madurez, entre los cuales se encuentran la brotación, floración y desarrollo de frutos (Parra, Fischer y Chaves, 2014).

Las unidades térmicas, también llamadas grados-día-desarrollo, son índices utilizados para estimar el desarrollo de los cultivos, ya que los mismos pueden predecir el cambio de las diferentes fenofases, entre ellas, la madurez fisiológica. Las unidades térmicas son aplicadas a sistemas de producción, debido a que es una técnica unificada que expresa la acumulación de la temperatura en las diferentes etapas. Esto depende de factores bióticos y abióticos, resultando en parámetros específicos para su desarrollo (García et al., 2012). Por lo tanto, las unidades térmicas son un parámetro que permite estimar la duración de las etapas de las plantas, entre ellas la floración y cosecha. Estas adquieren gran relevancia en sistemas productivos intensivos, donde la planificación de las prácticas culturales es importante.

Este cultivo se ha olvidado por varios años debido a la falta de investigaciones. Es considerado como un cultivo tradicional en algunos países, sin embargo, la falta de conocimiento de los beneficios que posee tanto para la salud como para los demás cultivos han hecho que se lo deje olvidado. El tiempo avanza y cada vez surgen más investigaciones en las que se deben mencionar los beneficios y componentes químicos que posee este árbol frutal, así como el manejo adecuado del cultivo (Sinisterra, 2016).

La información de la fenología tanto visual como reproductiva de *Inga edulis* en los valles interandinos es muy limitada, por consecuencia el objetivo del presente trabajo fue evaluar los cambios fenológicos por los cuales atraviesa la planta en la etapa reproductiva, con el fin de comprender los mismos y facilitar una guía visual. La hipótesis planteada fue que las yemas vegetativas pueden convertirse en yemas reproductivas. La información recolectada durante los meses de estudio constituye la base para la implementación de prácticas agronómicas y de fitomejoramiento, las cuales se sustentan en la información térmica necesaria para los cambios fenológicos de las plantas.

La escala BBCH (Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie), debido a su alto nivel de detalle, ha sido utilizada desde hace muchos años en todo el mundo para investigaciones prácticas en horticultura y agricultura. Esta escala describe el desarrollo fenológico de las plantas mono y dicotiledóneas, utilizando una codificación numérica de las fases de crecimiento (Meier, Bleiholder, Buhr et al., 2009). Esta descripción detallada es de gran importancia para que el agricultor la utilice como referencia y de esta manera mejore el manejo agronómico y así la productividad (Meier et al., 2009).

2. Metodología

2.1. Ubicación del estudio, condiciones climáticas y material vegetal

Las observaciones fenológicas fueron realizadas durante los meses de julio y noviembre de año 2018, en la provincia de Pichincha, cantón Quito, parroquia Nayón, que tiene una temperatura entre 18 °C y 22 °C y se encuentra ubicada a 2325 msnm. Se seleccionaron 15 árboles de 7 años, en cada uno se marcaron 30 yemas vegetativas, es decir, estructuras que presentaban las ca-

racterísticas deseadas, principalmente el color (el cual debe ser verde oscuro), y el tamaño (que debe ser de aproximadamente 3 milímetros). Para documentar los cambios en las diferentes fases reproductivas, se registraron datos de diámetro polar y diámetro ecuatorial en cada una de las estructuras desde la yema latente, racimo floral, flores y desarrollo del fruto. Los cambios en el diámetro fueron medidos con la ayuda de un calibrador (TACTIX 245111) y registrados visualmente con una cámara fotográfica (Canon rebel T6i).

2.2. Unidades térmicas

Para calcular las unidades térmicas se obtuvieron datos de la temperatura del lugar de estudio que es un monocultivo. Para registrar estos cambios térmicos se utilizó un data logger (HOBO U23 Pro v2 Temp/RH ONSET). Con estas temperaturas se calcularon las unidades térmicas (UT) obtenidas con la ecuación 1, llamada método residual, en donde $T_{\text{máx}}$ es la temperatura máxima calculada en un día, T_{min} es la temperatura mínima calculada en un día, y la T_{base} , que es la temperatura mínima a la que el cultivo detiene su crecimiento. Una vez obtenidas las unidades térmicas se calculó las unidades térmicas acumuladas con la ecuación 2, donde, Σ es el promedio de la suma de los eventos, n es el número de eventos calculados.

A partir de los datos recolectados de las mediciones obtenidas al final del estudio, se realizó una curva de crecimiento en un plano cartesiano como se indica en la figura 1.

Ecuación 1. Método residual (Villalpando y Ruiz, 1993)

$$\text{Unidades Térmicas} = \Sigma \frac{T_{\text{máx}} - T_{\text{min}}}{2} - T_{\text{base}}$$

Ecuación 2. Cálculo de unidades térmicas acumuladas (Méndez, 2015)

$$\text{Unidades Térmicas Acumuladas} = \Sigma GD1 \rightarrow n$$

2.3. Características de la escala BBCH

La escala BBCH describe el ciclo completo de desarrollo de los cultivos dividiéndolos en etapas que van desde la 0 al 9, ordenadas ascendentemente. La etapa 0 representa la germinación, 1 desarrollo de hojas, 2 formación de brotes, 3 crecimiento del tallo longitudinal, 4 desarrollo vegetativo, 5 emergencia de las inflorescencias, 6 floración, 7 desarrollo del fruto, 8 maduración y 9 senescencia o muerte (Meier et al., 2009).

Para el desarrollo de la escala BBCH en el cultivo de guaba se utilizó la escala que describe a la familia *Fabaceae*, en la cual se tomó en cuenta 3 dígitos como se muestra en la tabla 1. El primer dígito desde la izquierda indica el estadio principal, en el medio el número de ciclos que posee el cultivo al año y en la derecha es la descripción de cada fase. Para este estudio se utilizó desde la fase estado 5 a la 7, que son la emergencia de la inflorescencia, es decir su brote principal hasta el inicio de la fructificación (Meier et al., 2009).

En la presente investigación se describió el desarrollo de la yema latente, botones florales, flores jóvenes que están en proceso de abrirse, y maduras que ya se encuentran abiertas y el desarrollo del fruto en el cultivo estudiado.

Tabla 1. Codificación escala BBCH para guaba

Estado	Descripción
5	Presencia de brotes florales, aún rodeado por hojas.
521	Primeros botones afuera de las hojas.
525	Primeros botones solos en el exterior con hojas cerradas.
529	Varios botones en los racimos aún permanecen cerrados.
6	Floración.
620	Primeras flores descubiertas.
621	Presencia de 1 a 2 flores abiertas en el primer racimo.
623	Presencia de 3 flores abiertas en los racimos por planta.
625	Floración completa: flores descubiertas, 5 racimos por cada planta.
627	Descenso de floración.
629	Termina la fase de floración.
7	Desarrollo del fruto.
720	Vainas iniciales alcanzan el largo inicial ("vaina plana").
723	30 % de las vainas alcanzan el largo final de la vaina.
725	50 % de las vainas alcanzan el largo final de la vaina.
727	70 % de las vainas alcanzan el largo final de la vaina.
729	La gran mayoría de vainas alcanzan el largo final.

2.4. Método estadístico

Para la descripción e interpretación de datos de la floración e inicio de fructificación del cultivo de guaba se utilizó estadística descriptiva de cada una de las fases, para obtener la variación del desarrollo.

Con los datos numéricos recolectados del diámetro polar y ecuatorial, se realizó el cálculo de promedio, varianza, desviación estándar y coeficiente de variación.

3. Resultados y discusión

Desarrollo de la yema latente

A los 21 días de haber marcado las yemas en los árboles, se presentó la diferenciación de los meristemos, con la producción de estructuras vegetativas o reproductivas. Para esto los brotes tuvieron que acumular 46.39 unidades térmicas.

El diámetro polar de la yema latente fue de 3.29 mm y el ecuatorial de 3.62 mm al inicio del estudio. A medida que fue creciendo se transformó en yema hinchada, que presentó una estructura de mayor tamaño, cuyas medidas fueron 3.65 mm y 3.78 mm de diámetro polar y ecuatorial respectivamente, aproximadamente a los 15 días. Con estos resultados se puede indicar que la evocación floral inicia con cambios morfológicos en las estructuras. De yema latente a yema hinchada la planta necesitó acumular 46.39 unidades térmicas. Estas fases corresponden al inicio de la etapa 5 de la escala BBCH. Una vez que el crecimiento de la estructura floral sigue, la yema brotada fue identificada. Los datos estadísticos descriptivos se presentan en la tabla 2

Tabla 2. Estadísticos del desarrollo y crecimiento de las yemas latentes y botones florales en el cultivo de guaba en el valle de Nayón

Estadísticos	Yema latente (mm)		Yema brotada (mm)	
	D. polar	D. ecuatorial	D. polar	D. ecuatorial
Promedio (mm)	3.29	3.62	30	4.68
Valor mínimo (mm)	0.12	2.27	8.39	2.03
Valor máximo (mm)	5.10	5.01	46.12	6.77
Rango (mm)	4.96	2.74	37.73	4.74
Varianza	1.54	1.53	1.34	1.12
Desviación estándar	1.20	1.20	6.62	1.01
CV %	36.44	33.11	21.10	21.60

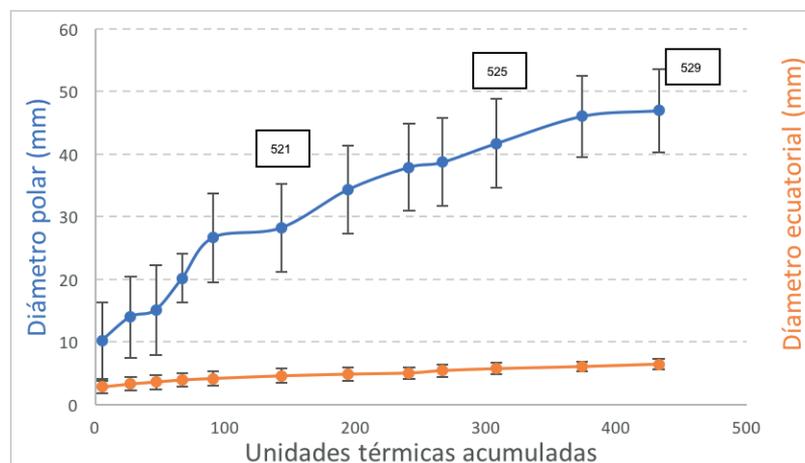
Al analizar los datos estadísticos obtenidos, se ve que la variabilidad de los datos supera el 20 % y, de acuerdo con Franco y Hidalgo (2003), la variabilidad se almacena en el genoma de las plantas y esto puede expresarse en ciertas características, que se pueden juntar en dos grupos: en el primero se expresa en las características fenotípicas, es decir, las que se pueden ver como el color, tamaño, morfología y arquitectura, entre otras. En el segundo grupo están las que no son visibles; entre ellas se encuentran los productos o procesos que se dan al interior de la planta y son identificados actualmente por técnicas de biología molecular realizadas en los bancos de germoplasma (Franco y Hidalgo, 2003).

En este estudio se observaron las características fenotípicas que dieron origen a la variabilidad; esto es, el tamaño, ya que algunas se desarrollaban más pronto que otras y tenían similar tamaño al inicio de la investigación tanto en diámetro polar como ecuatorial.

Desarrollo de los botones florales de guaba

Durante el estudio se observó un crecimiento lento de los racimos florales, desde yema hinchada hasta el alargamiento de peciolo para la formación de los botones florales en cada racimo. Este proceso se completó en 98 días, período en el cual acumuló 432,26 unidades térmicas, y alcanzó un diámetro polar que inicia en 10.25 mm hasta llegar a 46.98 mm. El diámetro ecuatorial máximo del racimo fue 6.47 mm (figura 1).

Figura 1. Incremento del diámetro polar y ecuatorial (mm) de la inflorescencia de guaba en función de la acumulación de unidades térmicas en el Valle de Nayón (n=90)



Estos resultados indican que conforme van creciendo longitudinalmente los botones florales, va aumentando el grosor del peciolo. Este cambio dependerá de la velocidad con la que se acumulen las unidades térmicas y, a su vez, con base en la temperatura diaria. Los desarrollos de los botones florales están considerados entre las etapas 521 y 529 de acuerdo con la escala BBCH, como se puede evidenciar en la figura anterior.

También se pudo observar que los botones florales estaban rodeados por brácteas y su tamaño fue de diámetro polar 30 mm y ecuatorial 4.68 mm (etapa 529 BBCH), lo cual no se encuentra en el rango de medidas establecidas por Marín, Castaño y Gómez, (2012), en donde las medidas obtenidas fueron de 16 mm y 8 mm respectivamente. Esta variabilidad de datos se da ya que las características fenotípicas de las plantas, en cuanto al tamaño, fueron distintas.

Según Marín et al., (2012), cuando las brácteas que están cubriendo los botones florales se caen, se puede verificar que la inflorescencia tiene entre 6 y 28 botones florales. En el presente estudio se observó que los racimos tenían entre 20 y 25 botones florales, lo cual está dentro del rango indicado por Marín et al., (2012). La variación del número de racimos florales obtenidos se debió a la constante manipulación de las flores y las condiciones ambientales.

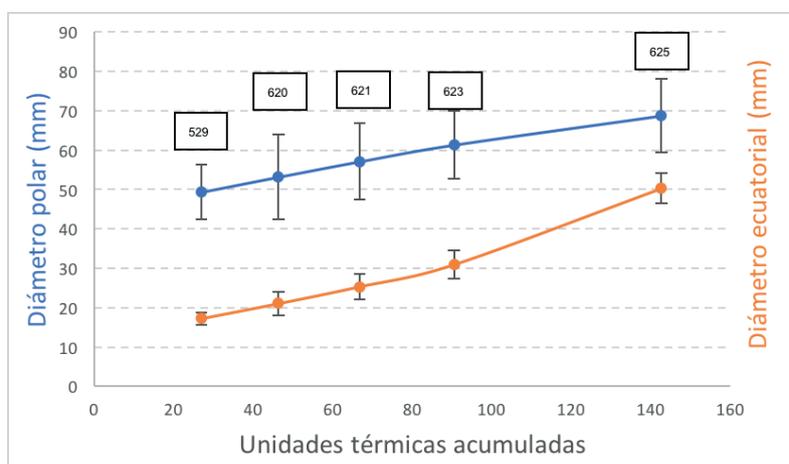
Desarrollo de las flores del cultivo de guaba

En este estudio se vio que una vez que el botón floral estuvo listo para abrirse, el tamaño se duplicó tanto en largo como en ancho, debido al despliegue rápido de la corola.

En la floración se observó que esta se divide en tres subfases como: 1) botón floral que es el estadio en el cual los órganos reproductivos (androceo y gineceo) se encuentran rodeados por los sépalos, 2) flor joven que hace referencia al estadio en el cual están visibles corola, cáliz, pistilos y estambres, y 3) flor madura (abierta) que se refiere al estadio en el que la flor se encuentra lista para la fecundación y el desarrollo del fruto; todo esto se obtuvo en la investigación realizada y es corroborado por lo descrito por Marín et al., (2012).

En este estudio se consideró las últimas 2 subfases de las tres descritas anteriormente, ya que se tomó en cuenta los datos de las flores jóvenes y maduras. Para llegar a esta etapa pasaron 41 días, en las que se acumuló 142.64 unidades térmicas para llegar a la antesis. En la *figura 2*, se muestra el crecimiento del diámetro polar y ecuatorial de las flores en y la acumulación de unidades térmicas.

Figura 2. Incremento del diámetro polar y ecuatorial (mm) de los racimos florales de guaba desde botón hasta antesis, en función de la acumulación de unidades térmicas en el valle de Nayón (n=120)



Las flores del cultivo de guaba se encontraban totalmente abiertas, previo a la fecundación y se observó que cambiaban de color y tamaño, puesto que la reducción en tamaño y la deshidratación de las estructuras florales se da una vez que se ha fecundado y comienza el desarrollo del fruto.

El crecimiento identificado de las flores se puede clasificar en las etapas de desarrollo 621, 623 y 625 de acuerdo con la escala BBCH.

Desarrollo del fruto

Las flores cambiaron su color de blanco a café rojizo, por lo que se vio que ya habían sido fecundados e iniciaron un proceso de deshidratación seguido de la abscisión de estructuras. Estos cambios fueron concomitantes al desarrollo inicial de los frutos. Para que el fruto se desarrolle, se requirió de 43 días, durante los cuales acumuló 497.07 unidades térmicas. Las fases fenológicas evidenciadas en este período fueron clasificadas en la etapa 720, 723, 725, 727, 729 de la escala BBCH. Todo el proceso de ontogenia de la fase reproductiva se encuentra descrito en tabla 3.

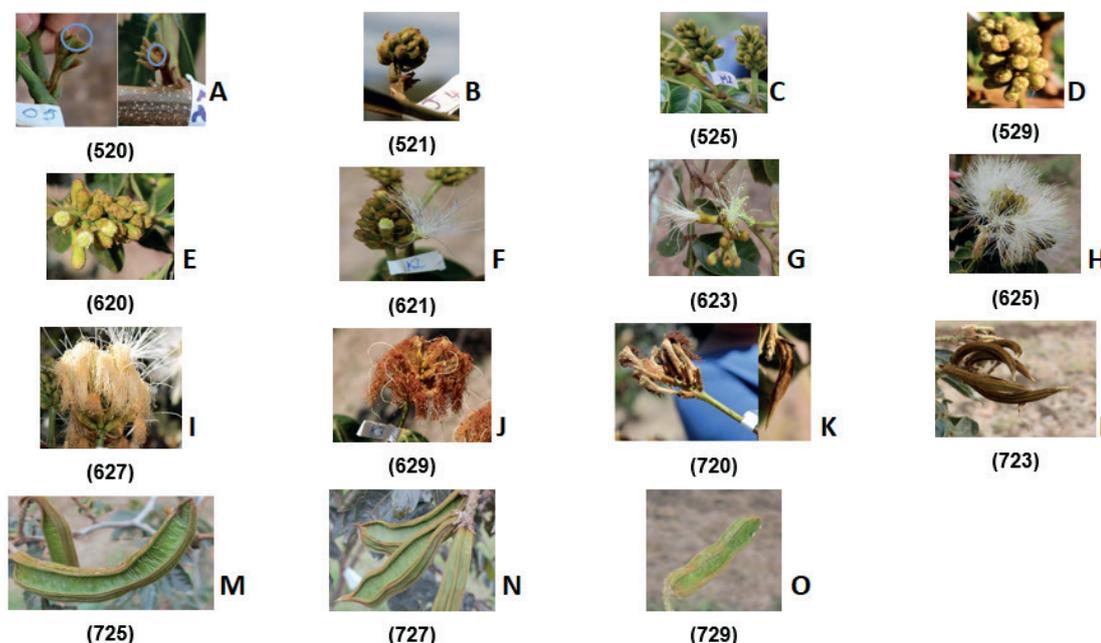
Tabla 3. Descripción de las fenofases del desarrollo de las estructuras reproductivas de la guaba en valle de Nayón

Código BBCH	Descripción de fenofase	Unidades térmicas acumuladas (UTA)	Letra correspondiente a figura 3
520	Inicio de etapa de floración. Yemas comienzan a hincharse.	0	A
521	Primeros capullos afuera de las hojas.	5.29	B
525	Primeros capullos solos en el exterior de las hojas cerradas.	27.00	C
529	Primeros pétalos visibles, en varios botones aún no visibles.	46.39	D
620	Primeras flores descubiertas.	66.78	E
621	Las flores abren en el primer racimo.	90.49	F
623	Las flores abren en 3 racimos por planta.	142.64	G
625	Floración completa: flores descubiertas, 5 racimos por planta.	193.84	H
627	Descenso de floración.	240.66	I
629	Termina la fase de floración.	266.17	J
720	Vainas iniciales alcanzan el largo requerido ("vainas completas").	307.73	L
723	30 % de las vainas alcanzan el largo final de la vaina.	373.40	L
725	50 % de las vainas alcanzan el largo final de la vaina.	432.26	M
727	70 % de las vainas alcanzan el largo final de la vaina.	455.64	N
729	>al 70% de las vainas alcanzan el largo final de la vaina.	497.07	O

Conjuntamente con la descripción de las fenofases, se encuentra en la tabla 3 una letra que corresponde a la imagen dentro de la figura 3, que se presenta a continuación. En esta figura se muestra la escala visual de la fenología reproductiva de la guaba, de acuerdo con la

escala BBCH, en la cual se puede evidenciar el cambio progresivo de las estructuras florales y el desarrollo del fruto.

Figura 3. Escala visual de las estructuras reproductivas de la planta de la guaba de acuerdo con la escala BBCH, en Nayón



Se pudo observar que dentro de las flores que comprendían el racimo floral, en su interior contenían el fruto ya formado. Conforme este iba desarrollándose para llegar a su madurez fisiológica, el número de frutos por racimo iba disminuyendo y esto se debe, de acuerdo con Falcao y Clement, (2000), a que existe una competencia por los nutrientes necesarios para el crecimiento.

El proceso de floración y desarrollo del fruto es de gran importancia para la producción. En la floración hay cambios en estructuras; ciertos verticilos son descartados y otros cambian debido a la acción hormonal dentro del tejido (Marín, 2008). Durante ese período ocurren varios procesos como fecundación y desarrollo de fruto. De acuerdo con lo observado en el estudio y el conocimiento de las fenofases por las cuales atraviesa el cultivo, es posible hacer predicciones y labores culturales que favorezcan el desarrollo adecuado de los frutos, minimizando pérdidas.

4. Conclusiones y recomendaciones

En el presente estudio se llegó a determinar que existen 15 fenofases de desarrollo en el cultivo de guaba. El tiempo que tomó a las plantas fue de 127 días, desde el inicio de la aparición de los meristemas hasta la madurez fisiológica de los frutos; en este tiempo se acumularon 497,17 unidades térmicas.

Sobre la base de la información generada, se podrá hacer un uso más eficiente de las prácticas culturales, lo cual influirá de manera favorable a la productividad del cultivo de guaba.

Con el fin de ampliar la información presentada sobre este cultivo, se recomienda realizar un estudio fenológico de la etapa vegetativa, es decir, desde la germinación de la semilla hasta el trasplante; debido a que existe escasa información en esta especie.

5. Agradecimientos

El presente artículo forma parte del II Simposio Internacional de Producción Integrada de Frutas 2019, por lo cual los autores desean extender sus agradecimientos a los organizadores de este evento, que hace posible la extensión de conocimiento en frutales.

Bibliografía

- Falcao, M. y Clement, C. (2000). Phenology and productivity of inga (*Inga edulis*) in Central Amazonia, *Acta Amazonica*, 8.
- Franco, T. L. e Hidalgo, R. (2003). Análisis estadístico de datos de caracterización morfológica de recursos fitogenéticos. En *Boletín Técnico*, 8, Instituto Internacional de Recursos Fitogenéticos IPGRI (Issue 8). Recuperado de https://www.biodiversityinternational.org/fileadmin/_migrated/uploads/tx_news/Análisis_estadístico_de_datos_de_caracterización_morfológica_de_recursos_fitogenéticos_894.pdf
- García, D.; Morales, J.; Ardila, H.etal. (2012). Acumulación de grados-día en un cultivo de pepino (*Cucumis sativus* L.), en un Modelo de Producción Aeropónico. Phenology, Base Temperature, Physiological Time, Climate., 65(1), 6389–6398. doi: 10.1074/jbc.272.31.19304
- García, J. (2008). La observación fenológica primaveral de los frutales, *AEMET*. 39–42.
- Marín, O. H. (2008). Consumo de néctar por *Aotus lemurinus* y su rol como posible polinizador de las flores de *Inga edulis* (*Fabales: Mimosoideae*). *Neotropical Pri-mates*, 15(1), 30–32. doi: 10.1896/044.015.0108
- Marín, O.; Castaño, A y Gómez, G. (2012). *Fenología del guamo* *Inga edulis* (*Fabales: mimosoideae*) *en dos agroecosistemas del Quindío, Colombia*. Recuperado el 1 de diciembre del 2018, de <https://www.researchgate.net/publication/242013826>.
- Meier, U.; Bleiholder, H.; Buhr, L. et al. (2009). The BBCH System to Coding the Phenological Growth Stages of Plants-history and Publications. *Journal Für Kulturpflanzen*, 61(2), 41–52. Recuperado el 23 de noviembre del 2018, de <http://www.cabdirect.org/abstracts/20093092784.html>
- Méndez, C. (2015). *Edad fisiológica de los cultivos: El uso de los grados días*. Recuperado el 28 de septiembre del 2019, de <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/av-1816.pdf>.
- Monro, A., R. Velarde, R. Flores, V. Soruco, J. Reyes, y W. Miliken. 2016. Manual agroforestería Inga. Royal Botanic Gardens, Kew & Herencia, Chicago, IL, USA..
- Parra, A.; Fischer, G. y Chaves, B. (2014). Thermal Time for Reproductive Phenological Stages of Pineapple Guava (*Acca sellowiana* (O. Berg) Burret). *Acta Biológica Colombiana*, 20(1), 163–173. doi: 10.15446/abc.v20n1.43390
- Silva, E. M.; Rogez, H.; Da Silva, I. Q. y Larondelle, Y. (2013). Improving the De-sorption of Inga Edulis Flavonoids from Macroporous Resin: Towards a New Model to Concentrate Bioactive Compounds. *Food and Bioproducts Processing*, 91(4), 558–564. doi: 10.1016/j.fbp.2012.11.005
- Sinisterra, R. M., Gallego, M. C., Armbrrecht, I. (2016). Hormigas asociadas a nectarios extraflorales de árboles de dos especies de Inga en cafetales de Cauca. Colombia. *Acta Agronómica*. 65, 9–16.
- Sobanski, N. y Marques, M. (2014). Effects of Soil Characteristics and Exotic Grass Cover on the Forest Restoration of the Atlantic Forest Region. *Journal for Nature Conservation*, 22(3), 217–222. doi: 10.1016/j.jnc.2014.01.001
- Villalpando, J. y Ruiz, A. C. (1993). *Observaciones agrometeorológicas y su uso en la agricultura*. México: Editorial Lumusa.

Incorporación de harina de amaranto para la obtención de bocaditos de carne con bajo contenido de grasa

(Incorporating amaranth flour to obtain low-fat meat snacks)

Melisa, G. Britéz¹, Fabiana A. Rolhaiser^{1,2}, Ana M. Romero¹, Mara, C. Romero^{1,2}

Resumen

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la incorporación de harina de amaranto a bocaditos de carne con bajo contenido de grasa, mediante análisis sensorial y valor nutricional. Para ello se elaboró un control y tres formulaciones, en las cuales se varió en la forma de incorporar la harina de amaranto. Las unidades de muestra se moldearon en forma de bocaditos de 50 ± 0.50 g y se cocinaron en un horno eléctrico, hasta alcanzar una temperatura interna de 72 °C en el centro térmico de las muestras, para garantizar la calidad microbiológica. La evaluación sensorial de las muestras se realizó inmediatamente después del proceso de cocción, empleando una escala hedónica de 5 puntos. Los atributos evaluados fueron: olor, color, sabor, ternura, jugosidad, aceptación general e intención de compra. Además, se analizó el rendimiento a la cocción y la composición proximal de los productos elaborados y esto se comparó con la información nutricional de un producto comercial. Las distintas formulaciones elaboradas, tuvieron buena aceptación por parte de los evaluadores, quienes enunciaron, además, la intención de compra de las mismas, lo que resultó de la apreciación general de cada muestra. La forma en la que se incorporaron los ingredientes, afectó al rendimiento y a la composición proximal de las formulaciones ensayadas, lo cual puede atribuirse a la retención de fluidos durante la cocción. Los bocaditos elaborados presentaron, asimismo, menores contenidos de grasa y de sodio en comparación con una muestra comercial, lo que los hace más saludables.

Palabras clave

Harina sin gluten; producto cárnico funcional; valor nutricional; sodio; evaluación sensorial.

Abstract

The aim of this work was to evaluate the effect of incorporation of amaranth flour into meat snacks with low fat content by sensory analysis and nutritional value. For this, a control and three formulations were developed, varying the way in which the amaranth flour was incorporated. Samples units were molded into 50 ± 0.50 g snacks and cooked in an electric oven until reaching an internal temperature of 72 °C in the thermal center of samples to guarantee microbiological quality. Sensory evaluation of the samples was carried out immediately after cooking process, using a 5-point hedonic scale. The attributes evaluated were odor, color, flavor, tenderness, juiciness, general acceptance and purchase intention. In addition, cooking yield and proximal composition of the elaborated products were analysed being the nutritional information compared with the obtained from a commercial product. The different formulations developed were well accepted by the evaluators, who also stated the purchase intention, which results from the general appreciation of each sample. The method in which ingredients were incorporated affected cooking yield and proximal composition of formulations, which can be attributed to a greater or lesser retention of fluids during cooking, in consequence cooking yield should be increased. The snacks produced also had lower fat and sodium content compared to a commercial sample, which makes them healthier.

Keywords

gluten-free flour; functional meat product; nutritional value; sodium; sensory evaluation.

1. Introducción

La carne es tradicionalmente reconocida como un alimento altamente nutritivo, no solo por su contenido de proteínas y aminoácidos esenciales, sino también porque es fuente de vitamina

1 Universidad Nacional del Chaco Austral, Pcia. Roque S. Peña, Chaco, Argentina (melisabritez@uncaus.edu.ar; fabianarolhaiser@uncaus.edu.ar; amr@uncaus.edu.ar; mara@uncaus.edu.ar).

2 INIPTA-CONICET. Pcia. Roque S. Peña, Chaco, Argentina.

B12 y de minerales importantes, como el zinc y el hierro, este último con una biodisponibilidad que no se altera por la cocción (Olmedilla y Jiménez-Colmero, 2014). Pero, en general, contiene un alto porcentaje de ácidos grasos saturados y colesterol, y existe una relación entre el consumo de este tipo de grasas animales y un mayor riesgo de algunos trastornos, como las enfermedades coronarias (Rodríguez-Carpena, Morcuende y Estévez, 2012).

Además, el aporte de hierro de la carne en las personas es primordial, no solo para producir glóbulos rojos sanos, que transportan el oxígeno a los tejidos, sino también para obtener un buen desarrollo cerebral. Es así que su carencia puede generar desde anemia hasta un desarrollo cognoscitivo incompleto, lo cual puede poner en riesgo la salud de gran número de personas. Debido a esto, el Ministerio de Salud Pública de Argentina, (2016) recomienda consumir carnes rojas hasta tres veces por semana y se representa la porción de la misma por el tamaño de la palma de la mano.

Entre los productos cárnicos más consumidos por los niños, se encuentran los bocaditos, medallones, formitas o *nuggets* de carne, los que pueden ser adquiridos en las góndolas de los supermercados. Sin embargo, los ingredientes más utilizados en estos productos son el pan rallado o harina de trigo, lo que los hace inaccesibles para un grupo de consumidores como los enfermos celíacos, pues contienen, además, un alto porcentaje de grasas, generalmente saturadas.

En los últimos años, la industria viene desarrollando productos cárnicos con bajo contenido de grasa, generalmente mediante el uso de ingredientes tales como aceites vegetales y extractos naturales, productos vegetales y fibra, para mejorar las propiedades funcionales y la calidad y estabilidad del producto (Shahiri Tabarestani y Mazaheri Tehrani, 2014). Sin embargo, el desarrollo de productos cárnicos con menor contenido de grasa no solo implica una reducción de los rendimientos de cocción (R), por la pérdida de grasa y humedad durante este procedimiento, sino que representa también la pérdida de características cualitativas importantes para la aceptación por parte de los consumidores.

Para evitar dichas pérdidas se emplean aditivos como las proteínas de origen vegetal (soja), otras harinas como la de quinua o arroz, lo cual mejora el ligado del agua durante el procesamiento de las materias primas, aumenta la estabilidad de la mezcla y mejora las propiedades sensoriales del producto disminuyendo la pérdida de características cualitativas (López, Botero y Arias, 2016; Moreno Vaca y Maldonado Pacheco, 2015; Pérez Touzón, Hernández et al., 2018). Así, dependiendo de los ingredientes utilizados en la formulación de estos productos, los mismos pueden ser concebidos como alimentos funcionales, dado que no solo proporcionan nutrientes de reconocidos efectos beneficiosos y nutricionales básicos en el organismo de las personas, sino que ayudan a reducir el riesgo de sufrir determinadas enfermedades (Fuentes, Acevedo y Gelvez, 2015).

El amaranto es un pseudocereal de origen andino-americano, que posee un elevado contenido de proteínas (18 %) de alto valor biológico, por la calidad de sus aminoácidos (como por ejemplo la lisina que es esencial en la alimentación humana), un importante contenido de fibra (10 %), un bajo contenido de grasa (5 %), un alto nivel de hierro (90 ppm), y sustancias antioxidantes como tocoferoles y tocotrienoles (Herrera y Montenegro, 2012). La incorporación de harina de amaranto (HAo), garantizaría la presencia de nutrientes de alto valor nutricional y constituiría una buena alternativa para la sustitución de harina de trigo o pan rallado en los bocaditos de carne comerciales. Además, teniendo en cuenta que estos alimentos son aceptados por los consumidores de todas las edades, se vuelven una alternativa interesante y excelente oportunidad para transformar los productos cárnicos tradicionales, ya que en la actualidad la

harina de amaranto no es utilizada como ingrediente funcional en productos cárnicos (Administración Nacional de Medicamentos, Alimentos y Tecnología Médica, [Anmat], 2018).

Como las cantidades y formas de incorporación de ingredientes a los sistemas cárnicos, además de afectar la composición de los mismos, pueden incidir también sobre las propiedades tecnológicas y organolépticas de estos sistemas, la industria recurre al análisis sensorial. Estos ensayos se utilizan para determinar el grado de aceptación de un producto por parte del consumidor, y generalmente indican la intención de compra real y de la ingesta del mismo (Pintado, Herrero, Ruiz-Capillas et al., 2015; Pintado, Herrero, Jiménez-Colmenero, Ruiz-Capillas, 2016; Romero, Fogar, Rolhaiser et al., 2018; Singh-Ackbarali y Maharaj, 2014). Así, en este trabajo se plantea evaluar el efecto de la incorporación de harina de amaranto a bocaditos de carne con bajo contenido de grasa, mediante análisis sensorial y valor nutricional.

2. Metodología

2.1. Ingredientes

Los productos a desarrollar se prepararon con: carne vacuna magra, cloruro de sodio (1 %), aceite de girasol y oliva (Aceitera General Deheza, S. A.), harina de amaranto (Celandrina, Praga S. R. L), tripolifosfato de sodio (Sigma-Aldrich), gelatina sin sabor (Arcor), huevo y condimento para milanesa (Alicante, La Virginia S. A.). El producto cárnico fue elaborado en la Planta Piloto que posee la cátedra de Industrias Alimentarias II del Departamento de Tecnología, en la Universidad Nacional del Chaco Austral, bajo estrictas normas de higiene y buenas prácticas de manufactura.

2.2.1 FORMULACIONES DE PRODUCTOS CÁRNICOS ENSAYADAS

Siguiendo el procedimiento indicado por Pintado, Herrero, Jiménez-Colmenero y Ruiz-Capillas (2016), se elaboraron 4 formulaciones, denominadas C (control), F1, F2, F3, cuyas composiciones se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Formulaciones de productos cárnicos (bocaditos/nuggets) ensayadas (g)

Ingredientes	C	F1	F2	F3
Carne	670	670	670	670
Sal	10	10	10	10
Agua	100	60	0	0
Aceite	200	200	0	0
HAc	0	40	0	0
Emulsión de HAc	0	0	305	0
Gel de HAc	0	0	0	305
TPP	5	5	0	0
Condimento para milanesa	10	10	10	10
Rebozado de HAc	5	5	5	5
Total	1000	1000	1000	1000

La variación en las formulaciones F1, F2 y F3 radicó en la forma en la que la harina de amaranto, como ingrediente, fue incorporada a la matriz cárnica. Así, para la formulación F1 la harina de amaranto fue agregada directamente a la pasta cárnica con el resto de los componentes; para F2 la HAc fue incluida en la carne picada a través de una emulsión con agua,

aceite, y el emulsionante tripolifosfato de sodio (TPP), la cual fue preparada por agitación con minipimer durante 10 minutos (con descansos de 15 segundos hasta completar el tiempo) y luego incorporada. Y, por último, para F3 la harina de amaranto fue añadida en forma de una emulsión gelificada, formulada con agua, aceite, HAO y TPP (mezcla enriquecida con harina de amaranto empleando proteína de gelatina como agente gelificante). Esta última formulación fue seleccionada de acuerdo con los resultados obtenidos en un estudio previo (Rolhaiser, Coronel, Michaluk et al. 2019). Además, en todas las formulaciones la harina de amaranto fue usada como rebozador.

2.2. Elaboración del producto cárnico

La carne fue previamente cortada en fragmentos, eliminándose grasa y tejido conectivo visible, luego se procesó empleando una picadora manual (Philips ® 7627, 650 watts), durante dos minutos, para obtener una pasta homogénea. Todos los ingredientes de cada formulación se pesaron en cantidades tecnológicamente adecuadas y luego, según correspondiese, se mezclaron en recipientes durante cinco minutos para eliminar la mayor cantidad de aire y formar una mezcla integrada. Se elaboró un total de veinte muestras para cada formulación presentada en la tabla 1.

En otro recipiente se batieron los huevos con sal y condimento para milanesa; esta mezcla se utilizó para pincelar la pasta y luego realizar el rebozado del alimento cárnico, con la harina de amaranto (HAO), para la obtención del *nugget*. Para todos los ensayos las unidades de muestra se moldearon en forma de bocaditos de 50 ± 0.50 g y se cocinaron en un horno eléctrico (200 °C) hasta alcanzar una temperatura interna de 72 °C en el centro térmico de las muestras, para garantizar la calidad microbiológica. La temperatura interna se controló utilizando un termómetro de punción (Testo modelo 925, Lenzkirch, Alemania).

2.3. Evaluación sensorial de los productos elaborados

Teniendo en cuenta que la aceptación general es un factor crucial cuando se evalúa la incorporación de un nuevo ingrediente en un producto alimenticio, el ensayo se realizó con un panel de 100 personas no entrenadas, pertenecientes a personal que trabaja o estudia en la Universidad Nacional del Chaco Austral (profesores y alumnos, entre 18 y 60 años), quienes aceptaron voluntariamente participar. Antes de comenzar el ensayo, los jueces dispuestos en forma separada uno del otro por medio de cabinas portátiles previamente armadas, fueron informados sobre los ingredientes empleados en el producto, para prevenir alguna intolerancia y/o algún tipo de alergia a los componentes utilizados en su elaboración por parte de los participantes (Schrotlin y Secchi, 2018).

Las formulaciones ensayadas fueron evaluadas inmediatamente después del proceso de cocción, disponiendo para ello las muestras en platos blancos de plástico junto con 1 galletita sin sal y 1 vaso de agua. Junto con las formulaciones elaboradas se presentó a los panelistas una muestra comercial (adquirida en un comercio de la zona) y las muestras (codificadas con números de tres cifras) fueron exhibidas en forma aleatoria (Sampere, Sánchez, Valerías et al., 2014). Los atributos evaluados fueron: olor, color, sabor, ternura, jugosidad, aceptación general e intención de compra, empleando una escala hedónica de 5 puntos, desde la categoría 1 "me disgusta mucho" hasta la 5 "me gusta mucho" (Gao, Zhang, Zhou, 2014). Además de la escala,

tuvieron un espacio en la ficha de respuestas (observaciones) para expresar alguna particularidad que consideraran relevante.

2.4. Rendimiento y análisis de la composición proximal de los productos

El rendimiento de los productos luego de la cocción se calculó según la Ecuación (1), lo que informa sobre las propiedades para ligar agua y grasa. Se efectuó además el análisis proximal, para la determinación del valor nutricional de las muestras; se determinó humedad, proteínas, grasas y cenizas, según técnicas oficiales de la Association of Official Analytical Chemists, (AOAC), 1998, empleando los métodos 950.46, 991.36, 960.52, y 920.153, respectivamente para dichos nutrientes. Los carbohidratos se determinaron por el método de antrona de Glegg, (1956); el sodio se determinó por fotometría de llama, método AOAC 985.35 y el valor energético siguiendo la metodología oficial del Código Alimentario Argentino (CAA), (2005)). Para el cálculo de proteínas se empleó el factor de conversión 6.25.

$$\text{Rendimiento (R\%)} = \left[\frac{\text{peso nugget cocido (g)}}{\text{peso nugget crudo (g)}} \right] \times 100 \quad \text{Ecuación (1)}$$

Todas las determinaciones realizadas se hicieron por duplicado para cada formulación.

Con objeto de comparar el valor nutricional de las muestras se adquirió un producto comercial (bocadito de carne). La comparación se efectuó a través de lo reportado por el fabricante en la etiqueta nutricional del producto. Según la declaración nutricional, el mismo se elaboró con carne vacuna, pan rallado, agua, huevo, aceite vegetal, almidón, proteína aislada de soja, sal, estabilizante, resaltador del sabor y antioxidante.

2.5. Análisis de datos

Los datos obtenidos de la evaluación sensorial, rendimiento y composición proximal se recogieron como la media \pm la desviación estándar, de las determinaciones realizadas a cada muestra, y se analizaron con el programa Statgraphics Plus bajo entorno de Windows, mediante el análisis de la varianza (Anova simple) y mediante comparaciones múltiples, empleando el test HSD de Tukey, con un nivel de significancia del 5 % ($p \leq 0,05$) entre los productos analizados.

3. Resultados

3.1. Evaluación sensorial del producto realizado

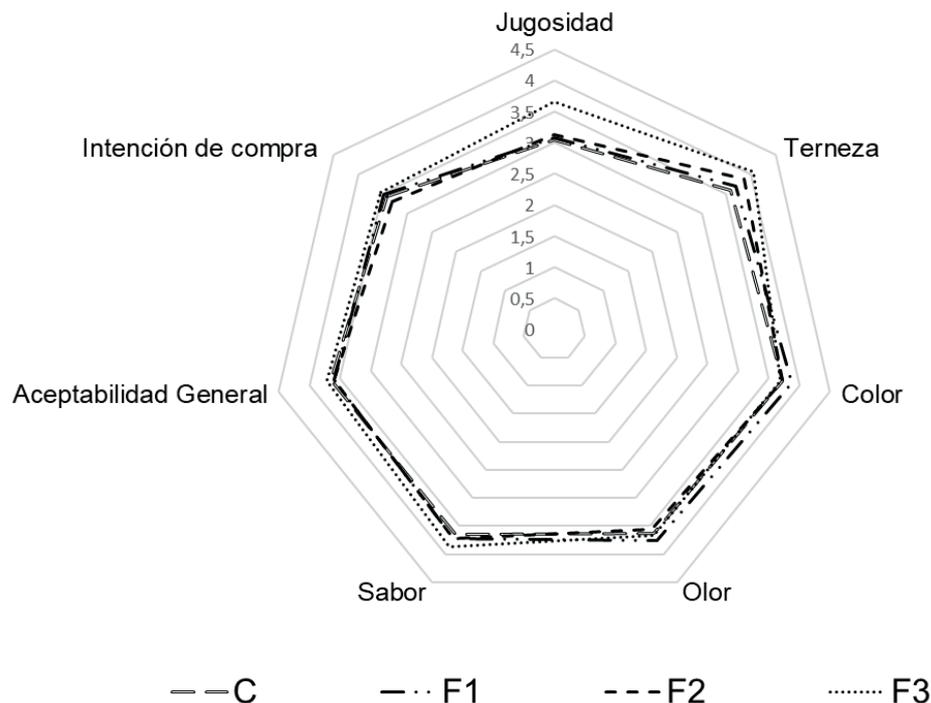
La figura 1 muestra los resultados obtenidos en la evaluación sensorial de los productos realizados. Para las muestras elaboradas con harina de amaranto, F3 obtuvo el mayor puntaje en los atributos sabor (3.86 ± 0.03), jugosidad (3.66 ± 0.02) y terneza (4.06 ± 0.013), diferenciándose de las demás formulaciones ensayadas ($p < 0.05$). La mayor valoración de estas propiedades en la formulación 3, puede atribuirse a la consistencia que le proporcionó a la misma la emulsión agua-aceite-HAo gelificada adicionada, que no solo permitió la incorporación de agua al producto, sino que permitió su retención durante la cocción. No ocurrió esto último en las demás formulaciones que presentaron mayor dureza y menor jugosidad.

Aunque la formulación F1 en la que HAO se incorporó directamente a la preparación, fue observada por los evaluadores por su consistencia blanda en el interior y su firmeza externa.

Cuando se analizaron los datos obtenidos, no se encontró diferencias significativas entre esta, la formulación F2, y la muestra control en la evaluación de la terneza ($p>0.05$). Respecto a los otros atributos (color, aceptabilidad general e intención de compra), de las muestras con harina de amaranto como ingrediente y el control, todas tuvieron una buena valoración (con puntajes mayores a 3.30) y no se observaron diferencias significativas entre las mismas.

Figura 1. Evaluación sensorial de las formulaciones elaboradas.

Donde C: contiene harina de amaranto como rebozador; F1: contiene HAo incorporada a la masa; F2: contiene emulsión formada con agua-aceite-HAo; F3 contiene una emulsión agua-aceite- HAo gelificada



3.2. Evaluación del rendimiento de cocción y composición proximal del producto cárnico

Los rendimientos obtenidos y los resultados para la composición nutricional de los productos desarrollados se presentan en la tabla 2. Allí es posible observar que si bien todas las formulaciones que fueron elaboradas con HAo como ingrediente (F1, F2 y F3), presentaron mayores rendimientos en la cocción que la muestra control (que solo contenía HAo como rebozador). La muestra F1 en la que este componente fue incorporado directamente a la pasta cárnica mostró el mejor resultado ($91.65\pm 0.90\%$). El control evidenció un valor mínimo de $83,46\pm 1.20\%$, indicando una menor retención de fluidos (agua o grasa) durante la cocción.

Tabla 2. Composición proximal de las formulaciones ensayadas

Determinaciones	Control	F1	F2	F3
Rendimientos (%)	83.46±1.20 ^a	91.65±0.90 ^d	89.17±0.96 ^c	86.06±0.87 ^b
Humedad (g/100 g)	48.36±1.62 ^a	54.93±1.35 ^b	53.76±0.39 ^b	60.75±0.94 ^c
Grasa total (g/100 g)	12.15±0.61 ^b	12.33±0.85 ^b	11.59±0.23 ^b	6.68±0.19 ^a
Proteínas (g/100 g)	20.26±0.05 ^{ab}	22.31±0.94 ^b	19.40±0.05 ^a	19.81±0.10 ^{ab}
Carbohidratos (g/100 g)	17.19±0.08 ^a	19.12±0.67 ^b	22.88±0.37 ^c	17.08±0.20 ^a
Cenizas (g/100 g)	3.32±0.18 ^b	3.08±0.03 ^b	3.42±0.16 ^b	2.49±0.16 ^a
Sodio (mg/100 g)	224.84±9.06 ^a	327.25±4.00 ^b	358.58±2.99 ^c	225.96±3.01 ^a

*Las referencias de las muestras se encuentran en la tabla 1. Los resultados están expresados como la media ± desviación estándar. Diferentes letras en la misma fila indican diferencias significativas.

Cuando se analizaron los contenidos de humedad y de grasa, todas las muestras con harina de amaranto incorporada a la matriz exhibieron valores mayores de humedad que el control; mientras que no hubo diferencias significativas entre el control, F1 y F2 en el porcentaje de grasa después del calentamiento, observándose solo un comportamiento claramente distinto en relación a este parámetro para la muestra F3, en la que la HAO fue incluida en la matriz en forma de emulsión gelificada. Así, F3 fue la que presentó el contenido de humedad más alto ($p < 0.05$) y el contenido de grasa más bajo ($p > 0.05$), entre las formulaciones analizadas.

En cuanto a los resultados obtenidos para proteínas y carbohidratos, F1 presentó el mayor contenido de proteínas y un alto valor en carbohidratos, probablemente debido a la pérdida de agua del producto durante su cocción, mientras que F2 mostró un mayor porcentaje de hidratos de carbono ($p < 0.05$). La incorporación de harina de amaranto emulsionada podría haber favorecido la disponibilidad de los carbohidratos en el producto. El menor contenido de cenizas fue observado para F3 ($p < 0.05$).

Los niveles de sodio de todas las formulaciones ensayadas estuvieron comprendidos entre 256 y 391 mg/100 g, todos ellos cumplen con la Ley 26.905 (2013), promovida por el Ministerio de Salud de Argentina y cuyo objeto es lograr la reducción del consumo de sodio en la población en Argentina.

La muestra comercial, bocadito de carne, de acuerdo a la información nutricional del rótulo del producto presentó una mayor proporción de los macronutrientes proteínas, grasas e hidratos de carbono (25 g/100 g, 14 g/100 g y 33g/100 g respectivamente). Cabe destacar que su nivel de sodio (800 mg/100 g) fue marcadamente superior al de las formulaciones desarrolladas con harina de amaranto.

4. Discusión

Durante la evaluación sensorial de los productos elaborados con harina de amaranto, los evaluadores informaron una aceptabilidad positiva, debido a la textura y jugosidad de los mismos, especialmente de la muestra F3, en la que la forma de incorporación de este ingrediente fue más efectiva en ligar y retener el agua después de la cocción, teniendo en cuenta también el contenido de fibra de la harina. Esto concuerda con lo que informaron Massari, Plencovich y Trouilh Zarza, (2017), en su trabajo referido a la elaboración de scones con harina de amaranto,

donde se reportó la buena aceptabilidad de los productos en lo que respecta especialmente al sabor y la textura de los mismos.

Pérez Touzón, Hernández et al., (2018), encontraron que la evaluación sensorial calificó el producto entre bueno y muy bueno a un producto cárnico elaborado con harina de arroz; harina de trigo y fécula de papa, y mostraron que las cantidades de ingredientes adicionados ejercen un importante efecto en las características cualitativas del producto. Del mismo modo, investigadores demostraron que la inclusión de harina de garbanzo y gel de *Aloe vera*, como ingredientes, modifican levemente las características sensoriales del producto, mejorándolas en comparación con las de un control (Acevedo Correa, Montero Castillo, Atencio Salas et al. 2017). Respecto del color, no se observaron diferencias significativas entre las distintas formulaciones ensayadas ($p > 0.05$). Además, en general, las muestras con harina de amaranto presentaron un color más oscuro después de la cocción. Esto concuerda con lo reportado por Guzmán Urrutia y López Lemus (2015), para galletas elaboradas con harina de amaranto, en las que, al aumentar la proporción de la harina, las galletas tendían a ser más oscuras.

El rendimiento de cocción indica la cantidad de agua absorbida durante este proceso. Las formulaciones ensayadas presentaron un mayor rendimiento que el control ($p < 0.003$), lo cual concuerda con lo hallado por Argel, Ranalli, Califano y Andrés (2017), en productos procesados de cerdo de bajo contenido lipídico, adicionados con aceite vegetal y harinas de legumbres. F3 presentó el mayor contenido de humedad, pero F1 presenta el mayor rendimiento debido a la absorción de agua por parte de la harina de amaranto y, además, retuvo mejor la grasa, lo que también incidió en una menor pérdida de peso y por lo tanto en un mejor rendimiento de cocción. Esto coincide con lo informado por Aslinah, Yusoff y Ismail-Fitry (2018), y Torres, Montero y Martello (2018) en productos cárnicos elaborados con harinas de frijoles y garbanzos respectivamente.

La forma en la que se incorporaron los ingredientes afectó el contenido de grasa y de hidratos de carbono en la composición proximal de las formulaciones ensayadas, lo que puede atribuirse a una mayor o menor retención de fluidos en los productos y a la contribución de nutrientes realizada por la harina (Romero, Fogar, Rolhaiser et al., 2018), ya que el contenido de carne se mantuvo constante en todas las formulaciones. El contenido de grasa fue menor para F3 respecto de C, F1 y F2, debido a las pérdidas durante la cocción, aunque F3 presentó el mayor contenido de humedad con respecto al resto de las formulaciones, probablemente debido a la incorporación de la emulsión gelificada, lo que fue corroborado en el análisis sensorial como la muestra de mayor jugosidad y ternura.

Asimismo, la muestra F3 evidenció un contenido de carbohidratos totales disponibles, comparable al del control, que solo tenía harina de amaranto como rebozador y un menor porcentaje al de las otras formulaciones, en donde este componente se usó como ingrediente. Respecto a los niveles de proteínas, no se presentaron diferencias significativas entre las formulaciones y el control sin HAO como ingrediente, lo que indicaría que la carne fue responsable de la totalidad de su aporte en las mismas. Estos resultados en general concuerdan a lo informado por Nagai (2018), quien indicó que el agregado de la harina de *Undaria* sp. permitió el desarrollo de productos cárnicos tipo hamburguesas, con aceite preemulsificado y con menor contenido de sodio respecto a los de consumo cotidiano, con buenas características fisicoquímicas. Similares resultados fueron informados por Santhi y Kalaikannan (2014), en productos elaborados con harina de avena.

El bocadito de carne comercial de acuerdo al rótulo del envase presentó un valor marcadamente superior de carbohidratos que las muestras ensayadas y además, como contiene

albúmina de huevo en polvo entre sus componentes (aditivo generalmente empleado en la industria), de acuerdo a lo informado en el rótulo, mostró un contenido de proteínas algo superior. Como puede observarse, todas las formulaciones analizadas presentaron menos contenidos de grasa y de sodio que el bocadito comercial, por lo que podrían ser consideradas como alimentos saludables y bajos en sodio, según el Código Alimentario Argentino (2005).

5. Conclusiones y recomendaciones

Los resultados obtenidos en estos ensayos indicaron que la harina de amaranto, incorporada al producto de diferentes maneras, podría emplearse en la formulación de bocaditos de carne de bajo tenor graso y reducido contenido de sodio, ya que presentaron buena aceptación sensorial, exhibiendo F3 una mayor jugosidad, terneza, sabor y aceptabilidad general que el control.

Se debe considerar que la estrategia de incorporación de HAo afectó el rendimiento en la cocción y el valor nutricional de los productos elaborados, por lo que estos deben ser mejorados. La formulación con harina de amaranto incorporada como ingrediente directamente a la pasta cárnica (F1) presentó el mayor rendimiento en la cocción, un mayor contenido graso y de carbohidratos que las demás formulaciones; mientras que la muestra F3, en donde la harina de amaranto fue añadida en una emulsión gelificada, brindó un producto de moderado rendimiento pero de bajo contenido de grasa y de sodio, y a su vez con valores adicionales de aceptación en lo que refiere a jugosidad y terneza. El producto comercial presentó mayores contenidos de todos los macronutrientes y también de sodio.

Aunque se deberían llevar a cabo estudios adicionales sobre perfil de ácidos grasos y sobre la calidad microbiológica y oxidativa del producto durante el almacenamiento, los resultados de esta investigación podrían ser útiles para la elaboración de otros productos cárnicos con harina de amaranto o su desarrollo a escala industrial en productos alimenticios de consumo masivo, y que puedan ser accesibles a una población con requerimientos nutricionales específicos, como lo son los enfermos celíacos.

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Nacional del Chaco Austral por permitirnos llevar a cabo la investigación.

Bibliografía

- Acevedo Correa, D.; Montero Castillo, P.; Atencio Salas, M. et al. (2017). *Elaboración de un producto cárnico tipo salchicha con incorporación de harina de garbanzo y gel de Aloe vera*. @limentech Ciencia y Tecnología Alimentaria, 15(1), 5-16.
- Administración Nacional de Medicamentos, Alimentos y Tecnología Médica (Anmat). (2018). *Nuevo listado de productos aptos para celíacos*. Recuperado de http://www.anmat.gov.ar/Alimentos/libres_gluten/Alimentos_Libres_de_Gluten.asp
- Argel, N.; Ranalli, N.; Califano, A. N. y Andrés, S. C. (2017). Incorporación de harinas de legumbres en medallones de carne porcina. *La Industria Cárnica Latinoamericana*. 206, 36-40.
- Aslinah, L. N. F.; Yusoff, M. M. y Ismail-Fitry, M. R. (2018). Simultaneous Use of Adzuki Beans (*Vigna angularis*) Flour as Meat Extender and Fat Replacer in Reduced-Fat Beef Meatballs (*Bebala daging*). *Journal of Food Science and Technology*. doi: 10.1007/s13197-018-3256-1

- Association of Official Analytical Chemists (AOAC). (1998). *Official Methods of Analysis* (16.º ed.). Washington DC, USA: Horowitz.
- Clegg, K. M. (1956). The application of the Anthrone Reagent to the Estimation of Starch in Cereals. *Journal of Science of Food and Agriculture*, 7:40-44.
- Código Alimentario Argentino. (2005). *Capítulo V: Normas para la rotulación y publicidad de los alimentos*. Resolución Conjunta SPRyRS 149/2005 y SAGPyA 683/2005. Disponible en: http://www.anmat.gov.ar/alimentos/codigoa/capitulo_v.pdf http://www.conal.gob.ar/ultimas_modificaciones/Capitulo_V.pdf
- Pérez Touzón, J.; Hernández, U.; Brito, Y. y Lezcano, A. (2018). Efecto de la harina de arroz sobre la calidad de un embutido tipo mortadela. *Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 28(3), 1-6.
- Fuentes, L.; Acevedo, D. y Gelvez, V. (2015). Alimentos funcionales: Impacto y retos para el desarrollo y bienestar de la sociedad colombiana. *Biotecnología en el sector agropecuario y agroindustrial*, 13(2), 140-149.
- Gao, X.; Zhang, W. y Zhou, G. (2014). Effects of Glutinous Rice Flour on the Physiochemical and Sensory Qualities of Ground Pork Patties. *LWT - Food Science and Technology*; 58, 135-141. doi: 10.1016/j.lwt.2014.02.044
- Guzmán Urrutia, M. P. y López Lemus, P. G. (2015). Propuesta de formulación de galletas elaboradas con harina compuesta de *Amaranthus cruentus* (Amaranto) y Sorghum bicolor. *Bachelor Thesis*. Universidad de El Salvador
- Herrera, D. S. y Montenegro, A. (2012). El Amaranto: prodigioso alimento para la longevidad y la vida. *Kalpana*; 8, 50-66.
- López, M. L. M.; Botero, M. J. y Arias, D. F. (2016). Obtención y evaluación fisicoquímica de la harina de cáscara de gulupa (*Passiflora edulis Sims f. edulis*) para su uso en carnes de hamburguesa. *La industria cárnica latinoamericana*; 195, 56-61.
- Massari, T. N.; Plencovich, R. P. y Trouilh Zarza, D. B. (2017). Harina de amaranto y semillas de lino en la elaboración de Scones: aportando aminoácidos y ácidos grasos esenciales. *Trabajo de investigación para la Licenciatura en Nutrición*. Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba.
- Ministerio de Salud de la Nación. Guías Alimentarias para la Población Argentina, Buenos Aires, Argentina. (2016). Recuperado de: http://www.msal.gov.ar/images/stories/bes/graficos/0000001007cnt-2017-06_guia-alimentaria-poblacion-argentina.pdf
- Presidencia de la Nación. Boletín Oficial Ley Nacional de Promoción de la Reducción del Consumo de Sodio en la Población. Ley 26.905. Recuperado de: http://www.saij.gov.ar/16-nacional-reglamentacion-ley-26905-sobre-promocion-reduccion-consumo-sodio-poblacion-dn20170000016-2017-01-04/123456789-0abc-610-0000-7102soterced?utm_source=newsletter-semanal&utm_medium=email&utm_term=semanal&utm_campaign=decreto-nacional#https://www.boletinoficial.gob.ar/detalleAviso/primera/99389/20131216?busqueda=1
- Moreno Vaca, A. y Maldonado Pacheco, P. (2015). Efecto de la sustitución de grasa dorsal de cerdo por aceite de aguacate en la calidad de salchichas de pollo tipo suiza. *Enfoque UTE*, 6(1), 55 - 70.
- Nagai, N. F. (2018). *Estudio de harinas de algas marinas comestibles y su incorporación en productos cárnicos*. Facultad de Ciencias Exactas. Licenciatura en Ciencia y Tecnología de Alimentos. Universidad Nacional de la Plata.
- Olmedilla Alonso, B. y Jiménez-Colmero, F. (2014). Alimentos cárnicos funcionales: desarrollo y evaluación de sus propiedades saludables. *Nutrición Hospitalaria*, 29(6), 1197-1209. doi: 10.3305/nh.2014.29.6.7389
- Pintado, T.; Herrero, A. M.; Ruiz-Capillas, C. et al., (2015). Effects of Emulsion Gels Containing Bioactive Compounds on Sensorial, Technological, and Structural Properties of Frankfurters. *Food Science and Technology International*, 0(0) 1-14. doi: 10.1177/1082013215577033
- Pintado, T.; Herrero, A. M.; Jiménez-Colmenero, F.; Ruiz-Capillas, C. (2016). Strategies for Incorporation of Chia (*Salvia hispanica L.*) in Frankfurters as a Health-promoting Ingredient. *Meat Science*, 114, 75-84. doi: 10.1016/j.meatsci.2015.12.009

- Rodríguez-Carpena, J. G.; Morcuende, D. y Estévez M. (2012). Avocado, Sunflower and Olive Oils as Replacers of Pork Back-Fat in Burger Patties: Effect on Lipid Composition, Oxidative Stability and Quality Traits. *Meat Science*, 90(1), 106-115. doi: 10.1016/j.meatsci.2011.06.007
- Rolhaiser, F.; Coronel, D; Michaluk, A. G. et al. (2019). Hidrogeles enriquecidos con harina de amaranto como posibles sustitutos de grasa en productos cárnicos. *Congreso Nacional de Estudiantes de Ingeniería Química*. Mendoza, Argentina.
- Romero, M. C.; Fogar, R. A.; Rolhaiser, F. et al. (2018). Development of Gluten-free Fish (*Pseudoplatystoma corruscans*) Patties by Response Surface Methodology. *Journal of Food Science and Technology*, doi: 10.1007/s13197-018-3106-1
- Sampere, S.; Sánchez, N.; Valerías, L. et al. (2014). Desarrollo y aceptabilidad de bocaditos de sabor para adultos mayores. *Actualización en nutrición*, 15(4), 99-106.
- Santhi, D. y Kalaikannan A. (2014). The Effect of the Addition of Oat Flour in Low-Fat Chicken Nuggets. *Journal of Nutrition and Food Science*, 4(1), 1-4. doi: 10.4172/2155-9600.1000260
- Shahiri Tabarestani, H. y Mazaheri Tehrani M. (2014). Optimization of Physicochemical Properties of Low-fat Hamburger Formulation Using Blend of Soy Flour, Split-pea Flour and Wheat Starch as Part of Fat Replacer System. *Journal of Food Processing and Preservation*, 38, 278-288. doi: 10.1111/j.1745-4549.2012.00774.x
- Schrotlin, R. M. y Secchi, C. M. (2018). Producto alimenticio elaborado a base de harina de algarroba y mijo adecuado para personas con intolerancia al gluten. *Actualización en nutrición*, 19(4), 113-121.
- Singh-Ackbarali, D. y Maharaj, R. (2014). Sensory Evaluation as a Tool in Determining Acceptability of Innovative Products Developed by Undergraduate Students in Food Science and Technology at The University of Trinidad and Tobago. *Journal of Curriculum and Teaching*; 3(1), 10-27.
- Torres, L. L.; Montero, P. M., y Martelo, R. J. (2018). Effect of Chickpea Flour Addition (*Cicer Arietinum L.*) in Cooking Losses During Blanching of Chorizos. *Contemporary Engineering Sciences*, 11(36), 1781-1787. doi: 10.12988/ces.2018.84170

Modeling of the variation of the electrical conductivity of the leachate of cocoa with different fermentation index

(Modelización de la variación de la conductividad eléctrica del lixiviado de cacao con diferentes índices de fermentación)

Loo-Miranda JLM¹, Chire-Fajardo, GC², Ureña-Peralta, MO³

Abstract

This study linked the fermentation index of two varieties of cocoa beans: CCN 51 and ICS 6 with electrical conductivity (EC) of the water where they were immersed using a laboratory conductimeter. Mixtures of 11 fermented cocoa beans and unfermented were performed in order to obtain fermentation index from 0% (unfermented beans) to that reached by the fermented cocoa beans. Immersion times tested for determination of the electrical conductivity were 90 and 180 minutes. The results of electrical conductivity for CCN 51 and ICS 6 were 56.1 ± 12.0 to 1375.0 ± 28.0 mS/cm and 150.0 ± 19.9 to 1199.3 ± 44.5 mS/cm, respectively. Subsequent conductivity values did not represent significant increases over time. The relationship between the fermentation index and electrical conductivity for CCN 51 showed positive trend, achieving a $R^2 = 63.1\%$. The following function by regression: $EC_{(CCN-51)} = 1196 + 10.83 * (FI) - 0.06 * (FI)^2$ got a model with significant adjustment to be used to determine its fermentation index.

Keywords

CCN 51, electrical properties, fermentation index, ICS 6, modeling.

Resumen

El presente estudio relacionó el índice de fermentación de dos variedades de granos de cacao: CCN 51 e ICS 6, con la conductividad eléctrica (CE) del agua donde estuvieron inmersos, utilizando un conductímetro de laboratorio. Para ello se realizaron 11 mezclas de granos de cacao fermentados y no fermentados, con el propósito de obtener índices de fermentación desde 0% (grano sin fermentar) hasta el alcanzado por el grano de cacao fermentado. Los tiempos ensayados de inmersión para la determinación de la conductividad eléctrica fueron de 90 y 180 minutos. Los resultados de la conductividad eléctrica para CCN 51 e ICS 6 fueron de 56.1 ± 12.0 a 1375.0 ± 28.0 μ S/cm, y de 150.0 ± 19.9 a 1199.3 ± 44.5 μ S/cm, respectivamente. Valores de conductividad posteriores no representaron incrementos significativos en el tiempo. La relación entre el índice de fermentación y la conductividad eléctrica para CCN 51, mostró tendencia positiva, y se obtuvo un $R^2 = 63.1\%$. Con la función lograda por regresión: $CE_{(CCN-51)} = 1196 + 10.83 * (IF) - 0.06 * (IF)^2$, se obtuvo un modelo con ajuste significativo a ser utilizado para determinar su índice de fermentación.

Palabras clave

CCN 51, índice de fermentación, ICS 6, modelamiento, propiedades eléctricas.

1. Introduction

Cocoa beans (*Theobroma cacao* L., Sterculiaceae) represent the seed of the tropical cocoa tree, growing in a limited geographical zone, of approximately 10° to the north and south of the Equator (in particular Central America, West Indian islands, South America, Africa), Caligiani *et al.* (2014). Raw cocoa beans are inedible because of their bitter and astringent flavor and unpalatable and unpleasant taste. In order to obtain its unique sensory characteristics it need

1 Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima – Perú (20111369@lamolina.edu.pe).
2 Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima – Perú (gchire@lamolina.edu.pe).
3 Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima – Perú (moup@lamolina.edu.pe).

to undergo subsequent treatments including fermentation, drying and roasting. Therefore, the process of cocoa bean fermentation plays a significant role in determining the composition and flavor of chocolate and other cocoa-based products and it hence lays at the basis of the entire chocolate-making process. (De Vuyst and Weckx, 2016; Wood and Lass, 2001). Cocoa beans fermentation is the first stage in cocoa processing and consists in a microbial fermentation of the pulp surrounding the beans. It is generally a spontaneous phenomenon, operated by a microbial succession of a wide range of yeast and of lactic-acid and acetic-acid bacteria, producing a wide range of metabolic end products, in particular alcohol and organic acids. During and after fermentation, internal autolytic enzymes are activated by microbial metabolites, such as acetic acid, starting the chemical reactions (proteolysis and breakdown of polysaccharides) that form the precursors of cocoa flavor (Schwan and Wheals, 2004).

Currently, the fermentation index of the cocoa bean is calculated from a qualitative analysis of a sample of 300 units, for which a cocoa guillotine is used that cuts longitudinally to each grain in order to observe its internal physical structure and to issue a judgment of value on the degree of fermentation (INACAL, 2016). A well-fermented cocoa bean is characterized by a light to dark brown coloration and by having internal stretch marks and clefts. As a result of the process there is a higher content of certain minerals (Afoakwa *et al.*, 2011) which can drive electrical energy. This characteristic of the change in composition motivated the use of electrical conductivity as an explanatory variable of the fermentation index, generating a faster, less tedious and more objective method by measuring its electrical conductivity. This could be possible with the existence of a mathematical function that correlates the fermentation index with the electrical conductivity of the cocoa beans. Several authors have proposed methodologies to determine the level of fermentation of the cocoa beans as the application of proton NMR together with chemometrics (Caligiani *et al.*, 2014); the use of FT NIRS and chemometrics (Teye *et al.*, 2015); determination of ammonia content by NIRS (Hue *et al.*, 2014); cocoa quality index (CQI) adapted from the soil quality index (Araujo *et al.*, 2014); artificial neural network model based on color measurements (León-Roque *et al.*, 2016) being these methods limited for cocoa-farmers in the cocoa centers. Therefore, the objective of the present study was to determine the mathematical relationship between cocoa beans fermentation index and the value of the electrical conductivity of the aqueous medium in which they are immersed using CCN 51 and ICS 6 cocoa beans.

2. Methodology

Cocoa bean samples.- CCN 51 and ICS 6 are described:

CCN 51 is a cocoa clone of Ecuadorian origin with a fat content of $59.6 \pm 0.45\%$, where the content of unsaturated fatty acids is 34,6% (oleic acid C:18:1 and linoleic acid C:18:2). The sensory profiles define a mild aroma of cocoa and acid, medium brown color, ripe fruit flavor, chocolate notes, sustained mean acidity, low nut notes (Perea *et al.*, 2013).

ICS 6 is a cocoa clone from Trinidad. ICS 6 was selected by Pound (1931) from the following crosses: trinitario x criollo hybrid. This clone is characterized by a fat content of $57.1 \pm 0.42\%$ where 36.2% corresponding to unsaturated fatty acids (oleic acid C:18:1 and linoleic acid C:18:2). The sensory profile define a dry fruit aroma, intense fruity (plum) flavor that lasts, with an average acidity at the end of the tasting, notes of chocolate and bitter very pleasant (Perea *et al.*, 2013).

For this study both cocoa bean samples, CCN 51 and ICS 6, were cultivated in Uchiza, Tocache, San Martín, Peru.

Analysis methods.– Samples of fermented (F) and unfermented (UF) cocoa beans (CCN 51 and ICS 6) (Garcia, 2012), were analyzed with the following methods:

- **Proximate analysis.**- Moisture content, crude protein, crude fat and ash were determined following the procedures in AOAC (2016) methods 931.04, 970.22, 920.75a, 972.15 respectively. Total carbohydrate was determined by difference (Alvarez, 2007) and crude fiber was determined following the procedures in AOAC (2016) methods 930.20a and 962.09e.
- **Cut test.**- The cut test was performed using the method described by NTP – ISO 1114 (INACAL, 2016). A total of 300 beans were cut lengthwise through the middle in order to expose the maximum cut surface of the cotyledons. Both halves were examined in full daylight and placed in one of the following categories: purple, pale purple, brown, slaty, germinated and moldy.
- **Fermentation index.**- The fermentation index was determined according to the method described by APPCACA0(2012) and Gutierrez(2009). The value of the fermentation index was calculated using the ration of well-fermented (brown) beans with respect to the total of beans analyzed in the cut test.
- **Sample mixing.**- Nine samples of mixtures of cocoa beans were prepared with the following ratios: (F: UF) 1:9, 2:8, 3:7, 4:6, 5:5, 6:4, 7:3, 8:2 and 9:1 for each of the varieties under study, with the purpose of having fixed values of fermentation indices that added to the sample of 100% of F (10:0) and the sample of 100%UF (0:10). Therefore a total of 11 experimental units were used for research.
- **Electrical conductivity** - The value of the electrical conductivity was measured with a laboratory conductivity-meter (INOLAB® COND Level 2P) following the method of Vitoria and Méndez-Natera (2011), Vitoria and Méndez-Natera (2007), Cepero et al. (2005) and Oblitas (2004). Samples of 20 g of cocoa beans mixtures were cut in halves. The samples were immersed in 200 ml of deionized water. To standardized the immersion time the electrical conductivity of three sample of cocoa bean mixtures (ratios 10:0, 5:5 and 0:10) were measured every 10 minutes for four hour. This ensure that the value of electrical conductivity does not change significantly in time. Mathematically, this mean that the electrical conductivity follows an asymptotic function. In other words, it ensures that the obtained electrical conductivity value is in an equilibrium system. Finally, the electrical conductivity of each sample were measure after the immersion time for each variety (CCN 51 and ICS 6).

Statistical design.- The procedure of the Method of Non-Significant Variation in Kinetics – NSVK (Rubio, 2004) was applied, where a randomized complete design (RCD) and a comparison test of means such as Tukey were used. For RCD ($p < 0.05$), the time factor of immersion of cocoa beans had 25 treatments with three replicates, defined by the measurement times of the electrical conductivity (10 minutes intervals for four hours).

3. Results and discussions

Table 1 shows the results obtained from the proximate analysis expressed on dry basis (d.b). For both varieties, the composition varies with fermentation, especially the fat content is increased for unfermented cocoa beans (Asep, *et al.*, 2008). Caligiani *et al.* (2014) found that possibly, the composition of the cocoa bean is influenced more by fermentation than by other factors such

as botanical or geographic. In the case of crude protein content there are conflicting results, Afoakwa *et al.* (2011) found that with fermentation, the crude protein content was reduced, while Aremu *et al.* (1995) reports an increase of crude proteins to the six-day of fermentation. In this research, it was observed that at six-day fermentation the crude protein content in the CCN 51 cocoa bean was increased and for the ICS 6 cocoa bean was decreased. The crude fat content decreased with fermentation in CCN 51 and ICS 6 cocoa beans. Afoakwa *et al.* (2011) reported a reduction in fat content from 55.2 to 53.4% after fermentation. There were not significant differences in ash content with fermentation for all the cocoa varieties. This behavior was observed by Aremu *et al.* (1995) who reported ash content values of 4.4 and 5.4% in unfermented and fermented cocoa beans respectively. Total carbohydrates content was no significantly different in unfermented than fermented cocoa beans. However, Afoakwa *et al.* (2013) reported an increase of 4.5% in the carbohydrate content of cocoa beans with fermentation. The crude fiber content increased with fermentation from 5.07 to 5.70% in CCN 51 cocoa beans. However, Aremu *et al.* (1995) reported a significant reduction in crude fiber content from 5.9 to 3.3% with fermentation.

Table 1. Proximate analysis (% dried base) for cocoa beans

Composition (%)	CCN 51		ICS 6	
	UF	F	UF	F
Crude fat	49.84 ± 0.12 ^a	47.06 ± 0.01 ^b	50.84 ± 0.22 ^a	47.39 ± 0.05 ^b
Crude protein	19.53 ± 0.21 ^a	17.44 ± 0.05 ^b	18.47 ± 0.04 ^a	20.58 ± 0.03 ^b
Ash	3.35 ± 0.01 ^a	3.26 ± 0.03 ^a	3.49 ± 0.01 ^a	3.36 ± 0.01 ^a
Total carbohydrates	27.28 ± 0.30 ^a	32.24 ± 0.09 ^a	27.20 ± 0.27 ^a	28.67 ± 0.12 ^a
Crude fiber	5.07 ± 0.06 ^a	5.70 ± 0.10 ^b	5.14 ± 0.00 ^a	5.16 ± 0.07 ^a

(a, b) Different letters in each row for each clone indicate that have significant difference ($p \leq 0.05$)

Table 2 shows the results of the cut test performed on the cocoa beans. It determined that the fermentation index for the underfermented cocoa (UF) was 0%. On the other hand, for six-day fermented cocoa beans, the fermentation index of the CCN 51 cocoa bean was found to be 90% (1621.67 $\mu\text{S}/\text{cm}$) and ICS 6 cocoa bean was 87% (1098.00 $\mu\text{S}/\text{cm}$). In particular, slate and purple cocoa beans contain a high level of epicatechins and sucrose, which decreases in fermented cocoa beans by the loss of polyphenols. During fermentation the free amino acids are released, in fact they are found in low concentrations in the slate cocoa beans and the oligopeptides in the purple and brown cocoa beans are increased (Caligiani *et al.*, 2014; Caligiani *et al.* 2016). According to Hansen *et al.* (1998), Misnawi *et al.* (2003) and Chire *et al.* (2016), the polyphenol oxidase is a key importance in pigment degradation during cocoa bean fermentation (50% and 6% of activity in first two days of fermentation). The increased intensity of brown color is attributed to the oxidation of polyphenols by the action of polyphenol oxidase and during drying, forms a darker brown color although the enzyme has only 2% residual activity. The fermentation index (FI) is based on the color changes in the cotyledons of the cocoa beans during fermentation (Del Boca, 1962 and Camu *et al.*, 2008), considered well-fermented the brown color beans (Caligiani *et al.*, 2016), FI determines its physical and chemical quality (Rivera *et al.*, 2012). However, this test could be subjective and not very consistent, because the human error increases with the fatigue making its results variable and not consistent at all (Llangantileke *et al.*, 1991).

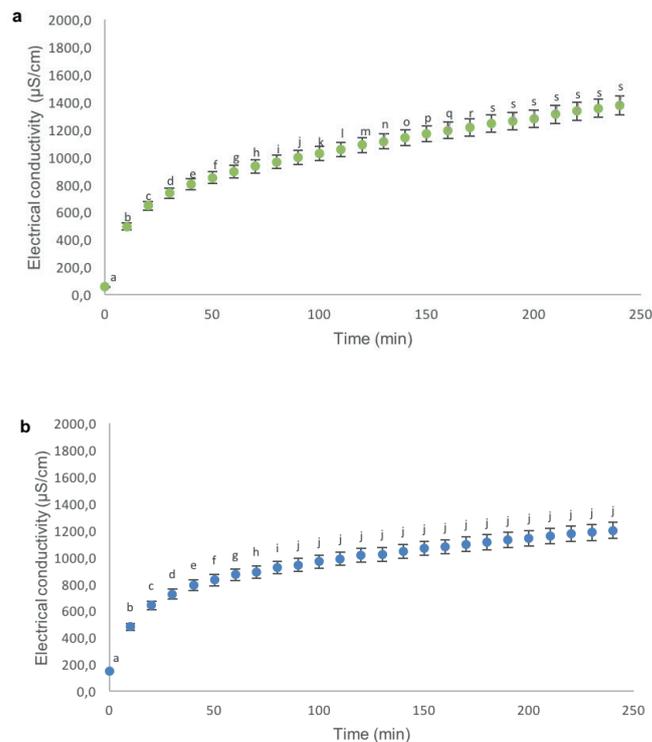
Table 2. Determination of fermentation index (FI)

Cocoa bean	Sample	Fermented cocoa beans	Unfermented cocoa beans		Moldy	FI (%)
			Slate	Purple		
CCN 51	UF	0	286	14	0	0
CCN 51	F	270	0	29	1	90
ICS 6	UF	0	279	21	0	0
ICS 6	F	260	0	40	0	87

The variation of the values of electrical conductivity as a function of the immersion time was recorded. The lowest immersion time values were found in the samples of unfermented (0:10) and fermented (10:0) cocoa beans (CCN 51 and ICS 6). However, the highest immersion time corresponding to 5:5 mixtures in the CCN 51 and ICS 6 cocoa beans, obtained at 180 and 90 minutes of immersion, respectively; times from which there were no significant differences ($p < 0.05$) between subsequent values. It should be noted that both measurement times were obtained by applying the method of Non-Significant Variation in Kinetics (NSVK), it means, from these values no significant differences ($p < 0.05$) were found in the posterior values.

Figure 1 show the variation of the electrical conductivity of CCN 51 and ICS 6 with a fermentation index of 45% and 43.5% respectively. The electrical conductivity values for CCN 51 increased from 56.1 ± 12.0 to 1375.3 ± 28.0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ and for ICS 6 increased from 150.0 ± 19.9 to 1199.3 ± 44.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Therefore, the time of immersion of CCN 51 and ICS 6 were 180 and 90 minutes respectively, subsequent values did not represent significant increases over time.

Figure 1. Variation of the electrical conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$) of a 5:5 blend for the (a) CCN 51 (45% FI) and (b) ICS 6 (43.5% FI) cocoa beans. Different letters show significant difference at $p \leq 0.05$



The electrical conductivity of the 11 mixtures were measure (by triplicate) taking into consideration the appropriate immersion time of 90 (CCN 51) and 180 (ICS 6) minutes. Figure 2 and 3 show the relationship between electrical conductivity and fermentation index of the 11 mixtures of CCN 51 and ICS 6 cocoa beans. The mathematical models that adjusted the experimental values by variety were the following:

$$EC_{(CCN\ 51)} = 1196 + 10.83 * (FI) - 0.06 *(FI)^2$$

$$EC_{(ICS\ 6,3)} = 1088 + 3.90 * (FI) - 0.05 *(FI)^2$$

Coefficient of determination of CCN 51 cocoa bean model was $R^2 = 63.1\%$, with $p\text{-value} \leq 0.05$. In the case of the ICS 6 cocoa bean model the coefficient of determination was $R^2 = 18.6\%$ ($p\text{-value} \leq 0.05$). R^2 is used to analyze how differences in one variable can be explained by a difference in a second variable (Triola, 2009). This means that 63.1 and 18.6% of the variance in electrical conductivity is due to the fermentation index of CCN 51 and ICS 6 respectively. Colosimo and Galetti (2012) tried to find a relation between the content of ashes and color with electric conductivity of 19 single-flowered lotus and eucalyptus honey. Only the color coefficient was statistically significant ($p \leq 0.05$) to predict the values of conductivity. The coefficient of determination of color with the electrical conductivity was equal to $R^2 = 0.74$.

Figure 2. Electrical conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$) with respect to the fermentation index of CCN 51 cocoa beans

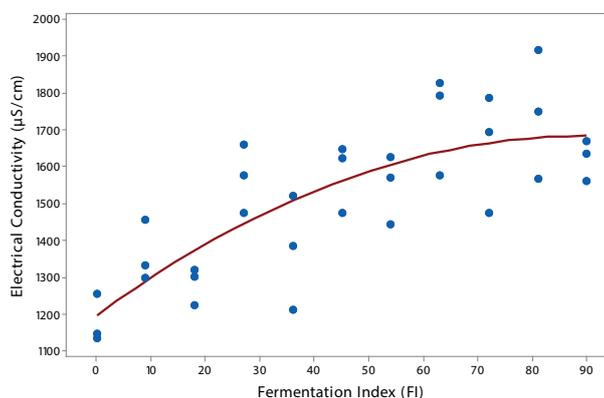
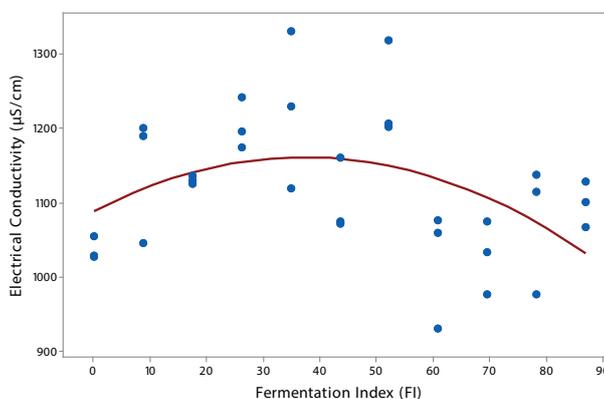


Figure 3. Electrical conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$) with respect to the fermentation index of ICS 6 cocoa beans



Lamsal and Jindal (2014), evaluated the electrical conductivity in orange, pineapple and tomato juice determining that it was influenced by the maturity of the fruit, and culture conditions, reporting that there was no high proportional relationship between the variables evaluated, stating that the fruits of the different localities showed a variation of 10% of the average of the value, as well as, the average values of electrical conductivity for pineapple and tomato juice with maximum variations due to the locality of 20 and 18.3% respectively. To summarize there are different variables than influence in the electrical conductivity. In this study, it should be noted that there are differences between varieties of cocoa beans. In this case, for ICS 6, it is recommended to carry out a larger number of tests, physical properties studies, as well as to know in depth its composition, with the purpose of knowing the cause of the reduction of the electrical conductivity to higher rate of fermentation.

4. Conclusions and recomendations

The study found that there is a relationship between the fermentation index of cocoa beans and the electrical conductivity of the deionized water containing them. It was also determined that the appropriate immersion time with stirring in deionized water was 180 minutes to measure conductivity in the horizontal part of the curve. The mathematical model that adjusts the experimental values was explained by a quadratic model: $EC_{(CCN51)} = 1196 + 10.83 * (FI) - 0.06 * (FI)^2$ with $R^2 = 63.1\%$ and $p\text{-value} \leq 0.05$ for CCN51. Cocoa companies and chocolate factories can use this model to judge the quality of the CCN 51 cocoa bean using a conductivity-meter. However, for other varieties like ICS 6 further studies are required to find closer mathematical relationships.

Acknowledgments: To research management office (RMO) at Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), for support funds for this research.

References

- Afoakwa, E.; Quao, J.; Takrama, J. et al. (2011). *Effect of Pulp Preconditioning On Acidification, Proteolysis, Sugars and Free Fatty Acids Concentration during Fermentation of Cocoa (Theobroma cacao) Beans*. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 62(7), 755-764.
- Afoakwa, E.; Quao, J.; Takrama, J., et al. (2013). *Chemical Composition and Physical Quality Characteristics of Ghanaian Cocoa Beans as Affected by Pulp Pre-Conditioning and Fermentation*. *Journal of Food and Science Technology*, 50(6), 1097-1105.
- Álvarez, C., Pérez, E., Lares, M.C. (2007). *Caracterización física y química de las almendras de cacao fermentadas, secas y tostadas cultivadas en la región de Cuyagua, Estado de Aragua*. *Agronomía Tropical*, 57(4), 249-256.
- AOAC. (2016). *Official Methods of Analysis of AOAC International. Method 931.04, 970.22, 920.75a, 972.15, 930.20a, 962.09e*. (20.º ed.), Vol. II. William Horwitz and George W. Latimer, Jr. (Eds.) Maryland, USA.
- APPCACAO. (2012). *Manual de control de calidad del cacao*. Perú.
- Araujo, Q. R.; Cinira, A. E.; Fernandes, C. A., et al. (2014). *Cocoa Quality Index - A proposal*. *Food Control*, 46, 49-54.
- Aremu, C. Y.; Agiang, M. A.; Ayatse, J. O. (1995). *Nutrient and Antinutrient Profiles of Raw and Fermented Cocoa Beans*. *Plant Foods Human Nutrition*, 48, 221-223.
- Camu, N.; De Winter, T.; Addo, S. K., et al. (2008). *Fermentation of Cocoa Beans: Influence of Microbial Activities and Polyphenol Concentrations on the Flavour of Chocolate*. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 88, 2288-2297.
- Caligiani, A.; Palla, L.; Acquotti, D., et al. (2014). *Application of H NMR for the Characterization of Cocoa Beans of Different Geographical Origins and Fermentation Levels*. *Food Chemistry*, 157, 94-99.

- Caligiani, A.; Marseglia, A.; Prandi, B., et al. (2016). Influence of Fermentation Level and Geographical Origin on Cocoa Bean Oligopeptide Pattern. *Food Chemistry*, 211, 431-439.
- Cepero, O.; Camacho, C.; Castillo, J. C., Salado, J. (2005). Conductividad eléctrica y california mastitis test en la detección de la mastitis subclínicas. *Revista electrónica de veterinaria Redvet*, VI, 3.
- Colosimo, J.; Galetti, V. (2012). Evaluación de la conductividad eléctrica y otros parámetros fisicoquímicos en mieles monoflorales de lotus y eucalipto. *Memorias de la 5ta Jornada de Eficiencia y Tecnología*, 1-6.
- Chire, G. C.; Verona, P.; Guzman, J. (2016). Cambios en el color durante el beneficio del grano de cacao (*Theobroma cacao* L.) peruano procedente de Piura. *Ciencia e investigación*, 19(1):29-34.
- Del Boca, C. (1962). *Cocoa Beans: Quality Requirements and Methods of Assessment*. Rev Int Chocolate-rie, 17, 218-221.
- De Vuyst, L.; Weckx, S. (2016). The Cocoa Bean Fermentation Process: From Ecosystem Analysis to Starter Culture Development. *Journal of Applied Microbiology*, 121, 5 - 17.
- García, L. F. (2012). *Catálogo de cultivares de cacao del Perú*. Ministerio de Agricultura. 1era Re-impresión.
- Gutiérrez, M. (2009). *Guía de gestión de la calidad en centro de acopio, secado y fermentación de cacao*. Perú: Dirección de Promoción y Competitividad. Ministerio de Agricultura..
- Hansen, C. E.; Del Olmo, M.; Burri, C. (1998). *Enzyme Activities in Cocoa Beans During Fermentation*. J. Sci. Food Agric., 77, 273-281.
- Hue, C.; Gunata, Z.; Bergounhou, A., et al. (2014). Near Infrared Spectroscopy as a New Tool to Determine Cocoa Fermentation Levels through Ammonia Nitrogen Quantification. *Food Chemistry*, 148, 240-245.
- Ilangantileke, S. G.; Wahyudi, T.; Bailon, M. G. (1991). Assessment Methodology to Predict Quality of Cocoa Beans for Export. *Journal of Food Quality*, 14(6), 481-496.
- Inacal (2016). NTP – ISO 1114. *Granos de cacao. Prueba de corte*. 4ta Edición. Lima, Perú, p.1-2.
- Lamsal, B. P.; Jindal, V. K. (2014). Variation in Electrical Conductivity of Selected Fruit Juices During Continuous Ohmic Heating. *International Journal of Applied Science and Technology*, 7(1), 47-56.
- León-Roque, N.; Abderrahim, M.; Nuñez-Alejos, L., et al. (2016). Prediction of Fermentation Index of Cocoa Beans (*Theobroma cacao* L.) Based on Color Measurement and Artificial Neural Networks. *Talanta*, 161, 31-39.
- Misnawi; Jinap, S.; Jamilah, B.; Nazamid, S. (2003). Effects of Incubation and Polyphenol Oxidase Enrichment in Color, Fermentation Index, Procyanidins and Astringency of Unfermented and Partly Fermented Cocoa Beans. *International Journal of Food Science and Technology*, 38, 285-295.
- Oblitas, F. A.; Barrantes, F. A.; Amorós, C. (2004). Valores de referencia de conductividad eléctrica y su relación con la concentración de cloruros en leches normales de bovinos de la campiña Cajamarca. *Revista Caxamarca*, 12(1), 87-92.
- Perea, A.; Martínez, N.; Aranzazu, F.; Cadena, T. (2013). *Características de calidad del cacao de Colombia. Catálogo de 26 cultivares*. Universidad Nacional de Santander, Federación Nacional de Cacaoteros. Bucaramanga.
- Rivera, R.; Mecías, F.; Guzmán, A., et al- (2012). Efecto del tipo y tiempo de fermentación en la calidad física y química del cacao (*Theobroma cacao* L.) tipo nacional. *Revista ciencia y tecnología*, 5(1), 7-12.
- Rubio, E. (2004). Determinación del tiempo óptimo de homogenización de partículas en un mezclador de volteo tipo pantalón. *Tesis para optar el título de Ingeniero en Industrias Alimentarias*. Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Schwan, R. F.; Wheals, A. E. (2004). The Microbiology of Cocoa Fermentation and its Role in Chocolate Quality. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 44, 205-221.
- Teye, E.; Huang, X.; Sam-Amoah, L. K., et al. (2015). Estimating Cocoa Bean Parameters by FT-NIRS and Chemometrics Analysis. *Food Chemistry*, 166, 403-410.
- Triola, M. F. (2009). *Estadística*. (10.º ed.). México D. F.: Pearson Education.. 904.
- Viloria, H.; Méndez Natera, J. R. (2011). Relación entre la conductividad eléctrica, pH del agua de remojo, germinación de semillas y crecimiento de plántulas de maíz (*Zea mays* L.) bajo dos condiciones experimentales. *Scientia agropecuaria*, 2, 213-228.

- Viloria, H.; Méndez Natera, J. R. (2007). Determinación del periodo de remojo adecuado para las mediciones de pH y conductividad eléctrica en semillas de maíz (*Zea mays*). *Boletín del Centro de Investigaciones Biológicas*, 41(2), 227-243.
- Wood, G.; Lass, R. A. (2001). *Cocoa*. Oxford; Fourth Ed. Blackwell Science.

Estudio experimental sobre el corte con láser de CO₂ a baja potencia, del compuesto de plástico reforzado con fibras naturales

(Experimental study on the low power CO₂ laser cutting of natural fibers reinforced plastic composite)

Cristian Pérez-Salinas¹, Marilyn Riera², Carlos Tonato³

Resumen

La aplicación de los plásticos reforzados con fibras naturales en la industria puede aumentar mediante el uso de tecnologías más rápidas y flexibles, como el corte por láser. La naturaleza anisotrópica y el grado de combustión de las fibras naturales en este tipo de compuestos hacen que el procesamiento con láser sea muy desafiante. Este estudio trata sobre el rendimiento de corte de un láser de CO₂ a baja potencia, para cortar placas de compuestos poliméricos (matriz de resina poliéster y epoxi), reforzado con fibras naturales (abacá y cascarilla de arroz), de 3 mm de espesor promedio. Se empleó un diseño experimental DOE y un análisis de varianza Anova para determinar los parámetros significativos e influyentes en la calidad de corte y el efecto térmico en el material. Los parámetros de procesamiento fueron la potencia de corte, velocidad de corte y tipo de matriz termoestable. Los cortes con una zona mínima afectada por el calor, de aproximadamente 600 mm y un Ra mínimo de 3.18 μm, se lograron al trabajar con 76 W y 14 mm/s de potencia y velocidad de corte, respectivamente, en el material compuesto de matriz poliéster reforzado con fibra de arroz.

Palabras clave

Corte láser; compuesto; fibras naturales, superficie de respuesta; rugosidad superficial; afectación térmica.

Abstract

The application of plastics reinforced with natural fibers in the industry can be increased using faster and more flexible technologies, such as laser cutting. The anisotropic nature and the degree of combustion of natural fibers in these types of compounds make laser processing very challenging. This study deals with the cutting performance of a low power CO₂ laser to cut polymer composite plates (matrix of polyester and epoxy resin) reinforced with natural fibers (Abaca and rice husk) with an average thickness of 3 mm. An experimental DOE design and an Anova analysis of variance were used to determine the significant and influential parameters in the quality of cut and the thermal effect on the material. The processing parameters were the cutting power, cutting speed and type of thermoset matrix. The cuts with a minimum zone affected by heat, of approximately 600 mm and a minimum Ra of 3.18 μm, were achieved by working with 76 W and 14 mm/s of power and cutting speed respectively in the composite material of reinforced polyester matrix with rice fiber.

Keywords

Laser cut; composite; natural fibers, Response Surface; surface roughness; thermal affectation

1. Introducción

Actualmente el uso de materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras está en continuo crecimiento, debido a sus propiedades físico-mecánicas, como su alta resistencia y bajo peso (Yashas Gowda et al., 2018). Un ejemplo tradicional y muy empleado ha sido el compuesto reforzado con fibra de vidrio con resina poliéster, como matriz. La industria automotriz y aeronáutica han aprovechado este compuesto tradicional por muchos años y aunque este tipo

1 Universidad Técnica de Ambato, Ambato – Ecuador (cf.perez@uta.edu.ec).

2 Universidad Técnica de Ambato, Ambato – Ecuador (marilynriera@gmail.com).

3 Universidad Técnica de Ambato, Ambato – Ecuador (carlos94tonato@gmail.com).

de material se sigue usando, la tendencia de hoy es el uso de fibras naturales que reemplacen a las fibras sintéticas tradicionales (Peças, Carvalho, Salman y Leite, 2018).

Por medio del láser es posible el corte de varios materiales avanzados, como metales, plásticos, cauchos, madera, cerámica y diferentes compuestos. En países del llamado primer mundo, el proceso de corte se ha vuelto común. Las grandes industrias manufactureras han empleado esta tecnología para el corte de partes y piezas especialmente de acero; aunque para el corte de materiales no metálicos no ha sido la excepción (Lamikiz et al., 2005; Radovanovic y Madic, 2011). La investigación del proceso de corte láser continúa. Varios estudios se han centrado en la determinación de las condiciones de corte más idóneas para manufacturar los materiales poliméricos como: polietileno (PE), policarbonato (PC), polimetilmetacrilato (PMMA), cloruro de polivinilo (PVC), y los termoendurecibles como resinas epoxi y fenólicas (Lohr Rodríguez, 2011; Ramírez et al., 1998).

Las ventajas más importantes al realizar un corte mediante láser, a diferencia de los sistemas convencionales existentes, son, entre otras: corte con mayor rapidez en espesores pequeños, concentración de la energía en una zona muy pequeña del material sin afectar el resto, la eliminación de vibraciones en este proceso, ya que interactúa únicamente el haz con el material; no es necesaria la sujeción del material durante el corte, etc. (Ramírez et al., 1998).

Aunque dentro de la familia de materiales los parámetros de corte son parecidos, cada material necesita parámetros de corte particulares para una manufactura satisfactoria. Choudhury y Shirley (2010), en su estudio sobre el corte láser en polímeros, demostraron que la combinación de diferentes polímeros y distintos parámetros del proceso de corte producen resultados muy diferentes entre cada uno de ellos; también se incluyó el grabado láser en envases poliméricos y materiales utilizados para los *airbags* integrados en vehículos. En un estudio realizado por J. Paulo Davim, Carlos Oliveira, Nuno Barricas y Marta Conceição (2008), se muestra una evaluación del efecto de corte, bajo distintos parámetros (potencia y velocidad de corte) en el polímero PMMA. Los resultados obtenidos en este estudio fueron: una zona de afectación térmica por el haz láser entre 0.12 y 0.37mm, ausencia de rebabas y con una rugosidad superficial Ra menor a 1 μ m.

Los principales parámetros de corte de la tecnología láser, en general son: potencia suministrada por el láser, distancia entre emisor y material (distancia focal), longitud de onda, velocidad de corte y sección transversal del haz (Karataş y Gökkaya, 2018; Choudhury y Chuan, 2013; Patel, Sheth y Patel, 2016). Las propiedades físicas del material también pueden aportar o atenuar el rendimiento del corte, como por ejemplo, nivel de cuerpo negro, conductividad térmica, densidad, calor específico y, entre otras, el espesor del material (Ramírez et al., 1998).

Los resultados de estudios sobre procesos convencionales y modernos de corte en materiales compuestos se han obtenido mediante el uso de técnicas, como análisis de varianza (ANOVA), diseño de experimentos (DOE) a través de técnicas de optimización de Taguchi, superficie de respuesta, diseños ortogonales, análisis de datos mediante regresión lineal, etc. (Choudhury y Shirley, 2010; Choudhury y Chuan, 2013; Radovanovic y Madic, 2011). Los mecanismos de falla y la calidad de la superficie se discuten con la ayuda de microscopía electrónica de barrido, óptica y análisis de rugosidad (Davim, Barricas, Conceicao y Oliveira, 2008). También se reportan el uso del método de elementos finitos (FEM), para evaluar la transferencia de calor en la zona de corte (Karataş y Gökkaya, 2018).

La tecnología láser por gas CO₂ es empleada mayormente en la industria, debido a su buena calidad de haz combinado con alta potencia de salida. Complementario a lo anterior, el costo

del equipo y el costo operacional son más manejables en comparación con otras tecnologías. El corte láser por gas CO₂ es ampliamente utilizado para cortar materiales como polímeros, materiales opacos no metálicos como maderas, cuero y materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras naturales (Davim, Oliveira, Barricas y Conceição, 2008; Pou et al., 2001). Una de las razones del uso en materiales compuestos es que la matriz polimérica y las fibras absorben altamente la radiación emitida por este tipo de láseres. En resumen, en la actualidad los sistemas láser son muy utilizados, debido a la ventaja que tienen para cortar patrones de geometrías complicadas con el menor daño posible en la zona de corte (Dewil, Vansteenwegen y Cattrysse, 2016; Powell, 1993; Zaeh, Byrne y Stock, 2017).

El objetivo de estos estudios es analizar el efecto que tiene la variación de los parámetros de corte sobre la calidad superficial (rugosidad), así como también realizar un análisis térmico sobre la superficie de corte, para tener una idea de la distribución de temperaturas alrededor de la zona de corte, provocada por el haz de luz láser.

2. Metodología

2.1. Materiales compuestos

Se estratificó manualmente placas de 3 mm de espesor promedio sobre un molde de acero A36. Se obtuvo 4 placas: 1 placa por cada compuesto reforzado con una fibra natural y, a la vez, 1 placa por cada resina termostable (tabla 1). Una fracción volumétrica del 83 % de matriz y un 17 % de refuerzo se empleó para la elaboración del compuesto. Dicha fracción volumétrica fue la de mejor comportamiento mecánico estudiado anteriormente por Pérez, Paredes, Lalaleo, Arroba y Nuñez (2018). Para el material de refuerzo se empleó dos tipos de fibras naturales, la primera una fibra tejida de abacá de 1.5 a 2 mm de diámetro de hilo y otra, una fibra particulada de cascarilla de arroz triturada y filtrada en tamiz No. 4. Para la matriz se empleó resina epoxi Repox 6090a-QcuadCarbon y poliéster serie PolyLite 33200-Reichold.

2.2. Experimentos de corte

Todos los experimentos se realizaron mediante una máquina CNC láser CO₂ marca Ricoma, que posee una potencia láser de salida máxima de 100 kW, a una longitud de onda de 10,64 μm con precisión de localización ≤ 0.01 , fuente de alimentación de 220V con una frecuencia de 60Hz. El haz láser se enfocó usando un diámetro de láser de 0.2 mm y 5 mm de longitud focal sobre la superficie de la pieza de trabajo. La geometría de corte se realizó en un rectángulo de 40 x 20 mm, con el fin de evaluar la rugosidad superficial en las dos direcciones del corte *x* e *y* (figura 1a). Esta geometría de corte se elige en concordancia a estudios anteriores (Davim, Barricas, Conceição y Oliveira, 2008; Kurt et al., 2009), capacidad de la mesa de trabajo de la máquina y para garantizar la evaluación de la rugosidad superficial de forma correcta según la norma ISO 1302, en la cual se requiere una longitud libre alrededor de 1 cm para su análisis.

Previamente se realizaron ensayos preliminares para seleccionar rango de potencias y velocidades de corte, que permitan el corte total del espesor del compuesto. Los rangos permisibles fueron, en cuanto a la potencia láser, un mínimo de 60W y la máxima disponible de la máquina 100W. Por otro lado, el rango de las velocidades de corte fue seleccionado según la menor zona de afectación térmica; estas fueron, de 10 a 14 mm/s.

Posteriormente se efectuó un diseño de experimentos DOE, donde se trabajó con dos parámetros cuantitativos a tres niveles (potencia láser y velocidad de corte) y dos variables nominales cualitativas a dos niveles (material de matriz y refuerzo). Los parámetros estudiados se resumen en la tabla 1. Se utilizó la técnica superficie de respuesta (MRS), con un diseño central compuesto con la ayuda del software Minitab. Se obtuvo 52 corridas (26 experimentos con dos réplicas) tanto para la fibra de abacá como para la cascarilla de arroz.

Tabla 1. Asignación de niveles a los factores de mecanizado

Parámetros de estudio	Símbolo	bajo	medio	alto
Potencia (W)	P	60	80	100
Velocidad de corte (mm/s)	Vc	10	12	14
Material matriz	M	Poliéster	-	Epoxi
Material refuerzo	R	Fibra de abacá	-	Cascarilla de arroz

Las variables que se evaluaron son la rugosidad superficial "Ra" y la temperatura superficial generada "Ts" (efecto térmico), por el proceso de corte láser en cada uno de los materiales compuestos.

2.3. Evaluación del corte láser

La calidad del corte se la evaluó con respecto a la rugosidad superficial Ra, bajo norma ISO 4288-96 (ISO), la misma que fue medida con un rugosímetro marca Mitutoyo SJ 210, calibrado a 2.4 µm, según norma ISO 5436-1: 2000-03 (ISO Standard). Al final los resultados obtenidos se contrastaron con los rangos determinados para rugosidades superficiales (Ra), obtenidos por diferentes procesos de manufactura según ISO 1302 (ISO UNE).

La inspección de los especímenes, tanto el borde de corte como su sección transversal se estudiaron después del proceso de corte por láser, a través de microscopía electrónica de barrido SEM TESCAN modelo VEGA 3-SBU y microscopía óptica IM-3MET marca OPTIKA. Se examinó tanto la probeta con mejor y peor calidad superficial, con el propósito de diferenciar las afectaciones superficiales extremas.

2.4. Evaluación de la temperatura superficial

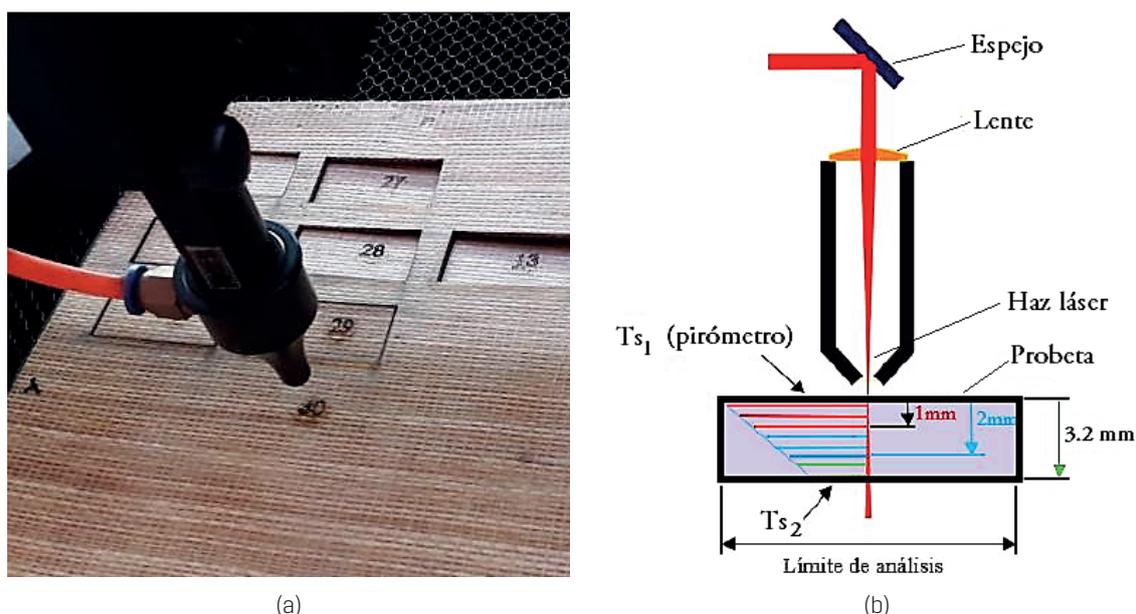
Se la evaluó la temperatura (T), generada en la superficie del material al momento del corte, mediante un pirómetro infrarrojo marca CEM DT-886H, que posee un rango de trabajo de entre -30 °C a 900 °C. Para el análisis de la transferencia de calor por pulso de energía, la ecuación 1 propuesta por Çengel y Ghajar (2011), fue utilizada para los cálculos térmicos.

$$T(x,t) - T_i = \frac{e_s}{k \times \sqrt{\frac{\pi \times t}{\alpha}}} \exp\left(-\frac{x^2}{4 \times \alpha \times t}\right)$$

Se limitó al área superficial de 800 mm² (40 x 20 mm), la misma dimensión de las probetas cortadas. Con el pirómetro se midió la temperatura superficial en la zona de corte (figura 1b) cinco veces, y el valor promedio se consideró para el análisis. La distancia estándar para la toma de las temperaturas fue de 1 metro desde el puntero del equipo hasta 1 cm aproximadamente

del haz de corte láser. Luego se determinó la temperatura superficial teórica a través de la ecuación 1, para su comparación con la medición real. Finalmente se determinó la temperatura teórica analítica a 1, 2 y 3 mm del espesor del material

Figura 1. Ensayo experimental de corte láser por CO₂ en material compuesto (a), Esquema de la medición del efecto térmico (b)



Una vez obtenidos los datos de rugosidad superficial (R_a) y temperatura superficial (T_s), se realizó el análisis experimental de los efectos de cada uno de los parámetros sobre las variables de respuesta. Además, se presentó los resultados del análisis de varianza Anova, para determinar los efectos significativos de cada una de las variables de entrada o parámetros del proceso estudiado.

3. Resultados

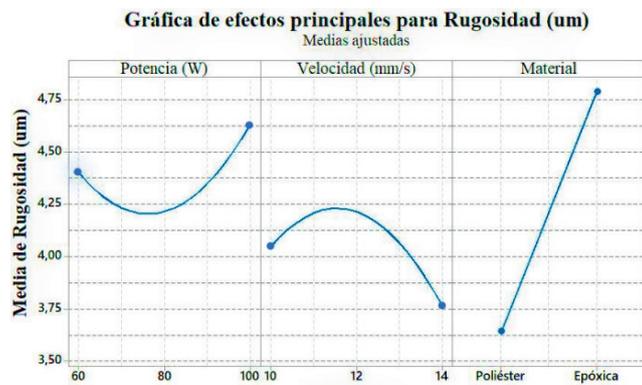
Los valores obtenidos de R_a y T_s de la ejecución experimental se presentan en la tabla 2. A partir del análisis experimental superficie de respuesta se obtuvo los efectos principales de los factores hacia la respuesta rugosidad (R_a) y la temperatura superficial (T_s), para cada uno de los distintos materiales compuestos (figura 2). Se puede observar que los efectos influyentes son el material para el caso de R_a (figura 2a y 2c), siendo la resina poliéster la que presenta menor R_a . Para la potencia y la velocidad de corte presentan influencias distintas; para la CRFB hay una influencia lineal (figura 2c) y para CRFA, la influencia se describe mediante una curva (figura 2a).

Por otra parte, el factor de mayor influencia en la T_s es la potencia de corte láser (figura 2b y 2d). El material es otro factor influyente en la T_s , siendo la resina poliéster quien presenta menor afectación térmica; además, se observa que el grado de influencia térmica es menor en el CRFB (figura 2d). En menor grado, la velocidad de avance influye en la afectación térmica, obteniendo el menor valor cuando se trabaja a velocidades mayor igual a 14 mm/s (figura 2b y 2d).

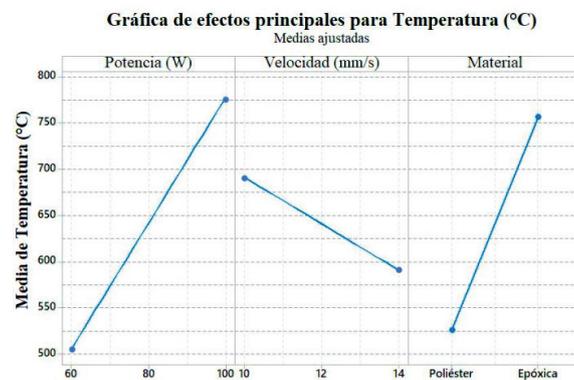
Tabla 2. Resultados obtenidos de la ejecución experimental

Parámetros de entrada						Resultados			
Orden Ejecución	No. Corrida	Tipo Punto	Potencia (W)	Velocidad (mm/s)	Material Matriz	CRFB		CRFA	
						Rugosidad	Temp. (°C)	Rugosidad	Temp. (°C)
17	1	1	100	14	Epoxi	3.757	740.20	4.735	835.23
31	2	-1	60	12	Poliéster	3.391	417.94	3.891	390.73
16	3	1	60	14	Epoxi	4.070	440.50	4.906	601.70
30	4	1	100	14	Poliéster	3.745	625.00	4.159	577.47
24	5	0	80	12	Epoxi	3.849	641.00	4.755	781.80
11	6	0	80	12	Poliéster	3.712	540.30	3.018	549.80
12	7	0	80	12	Poliéster	3.636	516.80	3.765	535.53
32	8	-1	100	12	Poliéster	3.728	682.89	4.686	659.07
14	9	1	60	10	Epoxi	3.886	396.09	3.772	634.60
33	10	-1	80	10	Poliéster	3.613	590.96	4.194	535.00
42	11	1	60	14	Epoxi	3.949	445.09	5.110	568.30
37	12	0	80	12	Poliéster	3.724	571.50	3.097	510.30
1	13	1	60	10	Poliéster	3.696	447.90	4.080	430.87
5	14	-1	60	12	Poliéster	3.511	397.20	4.003	416.47
2	15	1	100	10	Poliéster	3.639	625.00	3.208	730.03
10	16	0	80	12	Poliéster	3.630	493.10	3.617	561.47
52	17	0	80	12	Epoxi	3.732	649.00	4.614	776.70
7	18	-1	80	10	Poliéster	3.707	569.96	4.104	550.77
48	19	0	80	12	Epoxi	3.791	641.50	4.342	719.33
4	20	1	100	14	Poliéster	3.574	606.99	3.680	567.23
51	21	0	80	12	Epoxi	3.905	649.55	5.047	778.80
34	22	-1	80	14	Poliéster	3.610	473.30	3.259	490.90
36	23	0	80	12	Poliéster	3.562	522.40	3.766	539.93
29	24	1	60	14	Poliéster	3.465	364.40	2.326	382.43
15	25	1	100	10	Epoxi	3.841	885.21	4.813	970.33
6	26	-1	100	12	Poliéster	3.802	668.00	3.940	621.23
9	27	0	80	12	Poliéster	3.711	543.10	2.871	515.57
19	28	-1	100	12	Epoxi	3.893	813.60	5.090	926.60
21	29	-1	80	14	Epoxi	3.708	591.50	3.930	716.80
18	30	-1	60	12	Epoxi	4.074	489.30	5.977	551.73
43	31	1	100	14	Epoxi	4.104	733.82	4.572	816.17
50	32	0	80	12	Epoxi	3.697	650.00	4.859	768.00
22	33	0	80	12	Epoxi	3.604	649.00	4.762	743.90
44	34	-1	60	12	Epoxi	4.080	486.16	5.368	597.53
46	35	-1	80	10	Epoxi	3.808	705.90	5.269	832.23
45	36	-1	100	12	Epoxi	4.017	810.94	4.977	900.73
39	37	0	80	12	Poliéster	3.557	476.30	3.871	548.83
35	38	0	80	12	Poliéster	3.703	570.30	3.235	502.23
8	39	-1	80	14	Poliéster	3.816	499.10	3.308	455.37
40	40	1	60	10	Epoxi	3.723	390.12	4.584	653.07
23	41	0	80	12	Epoxi	3.658	649.50	5.313	726.60
25	42	0	80	12	Epoxi	3.796	644.00	4.019	764.70
38	43	0	80	12	Poliéster	3.740	540.50	3.865	559.87
41	44	1	100	10	Epoxi	3.717	878.67	5.034	945.90
3	45	1	60	14	Poliéster	3.554	382.60	2.887	346.50
49	46	0	80	12	Epoxi	3.754	649.50	5.230	754.73
28	47	1	100	10	Poliéster	3.346	747.45	4.174	708.30
20	48	-1	80	10	Epoxi	3.887	702.54	4.276	863.30
13	49	0	80	12	Poliéster	3.645	543.92	4.094	559.27
26	50	0	80	12	Epoxi	3.652	650.00	4.352	735.47
27	51	1	60	10	Poliéster	3.343	401.70	3.472	415.43
47	52	-1	80	14	Epoxi	3.647	588.46	4.701	705.17

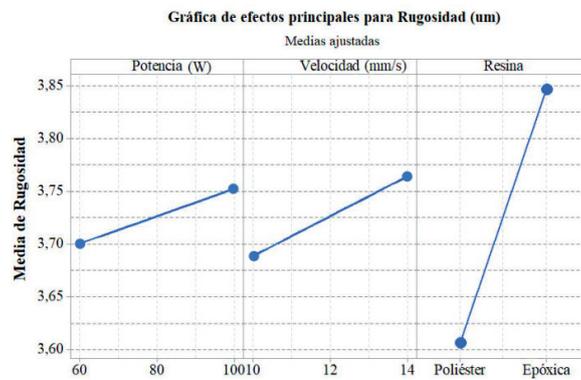
Figura 2. Efectos principales de los factores sobre las variables de respuesta Ra y Ts, a) y b) compuesto reforzado con fibra de arroz, c) y d) compuesto reforzado con fibra de abacá



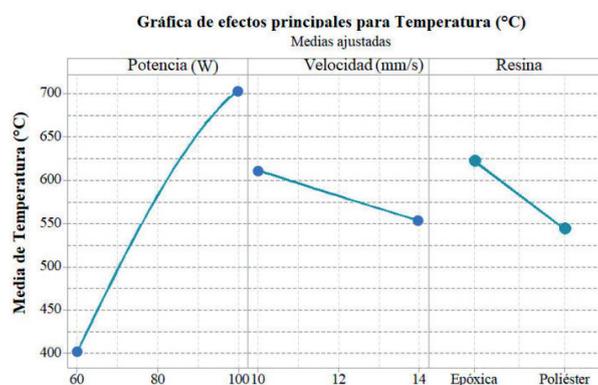
a)



b)



c)



d)

El Anova depurado para Ra y Ts, para cada uno de los materiales con un nivel de significancia del 5 %, se presenta en las tablas 3 y 4. Una vez demostrado el cumplimiento de los requisitos de esta prueba paramétrica los resultados fueron que los modelos explicativos para cada respuesta son aceptables. Para Ra en el material CRFA el R² ajustado es del 68 % y 98 % para Ts. Por otro lado, el modelo explicativo para Ra en el material CRFB el R² ajustado es de 54 % y 90.2% para Ts respectivamente. En la tabla se presenta el p-valor de los factores principales y secundarios significativos.

Tabla 3. Análisis de varianza (Anova) cascarilla de arroz

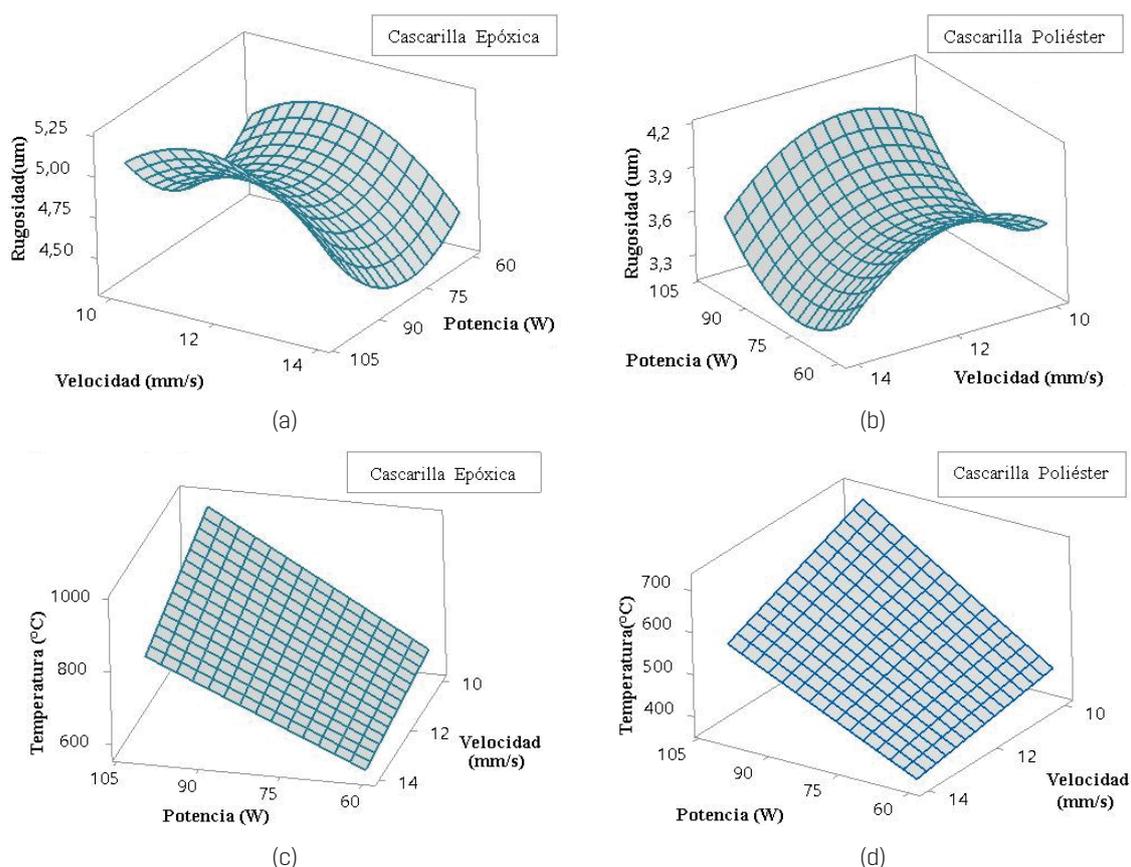
Fuente	Rugosidad (um)					Temperatura superficial (°C)				
	GL	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F-valor	P-valor	GL	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F-valor	P-valor
P	1	0.3020	0.3020	1.28	0.264	1	445 246	445 246	789.60	0.000
Vc	1	0.4837	0.4837	2.04	0.160	1	60 658	60 658	107.57	0.000
M	1	17.1201	17.1201	72.36	0.000	1	694 345	694 345	1231.36	0.000
p ²	1	0.4375	1.0068	4.26	0.045	-	-	-	-	-
Vc ²	1	1.0582	1.0582	4.47	0.040	-	-	-	-	-
PxVc	-	-	-	-	-	1	6538	6538	11.59	0.001
PxM	-	-	-	-	-	1	3930	3930	6.97	0.011
Error	46	10.8841	0.2366	-	-	46	25 939	564	-	-
Falta ajuste	12	5.1445	0.4287	2.54	0.016	12	11 041	920	2.10	0.045
Error Puro	34	5.7396	0.1688			34	14 897	438		
Total	51	30.2855				51	1 236 655			

Tabla 4. Análisis de varianza (Anova) abacá

Fuente	Rugosidad (um)					Temperatura superficial (°C)				
	GL	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F-valor	P-valor	GL	Suma de cuadrados	Media de cuadrados	F-valor	P-valor
P	1	0.0683	0.0317	2.00	0.161	1	2.7417	2.7417	313.62	0.000
Vc	1	1.5024	0.0683	4.30	0.041	1	0.0902	0.0902	10.32	0.002
R	1	0.1685	1.5024	94.57	0.000	1	0.3582	0.3582	40.97	0.000
p ²	-	-	-	-	-	1	0.1263	0.1263	14.45	0.000
PxVc	-	-	-	-	-	1	0.0934	0.0934	10.68	0.002
PxR	1	0.7846	0.1685	10.61	0.002	1	0.1307	0.1307	14.95	0.000
Vc*R	-	-	-	-	-	1	0.0341	0.0341	3.90	0.054
Error	99	1.5728	0.0159	-	-	44	0.3847	0.0087	-	-
Falta ajuste	13	0.7882	0.0604	6.58	0.000	10	0.2293	0.0229	5.02	0.000
Error Puro	86	3.3438	0.0092			34	0.1554	0.0046		
Total	103	0,0683				51	3.9592			

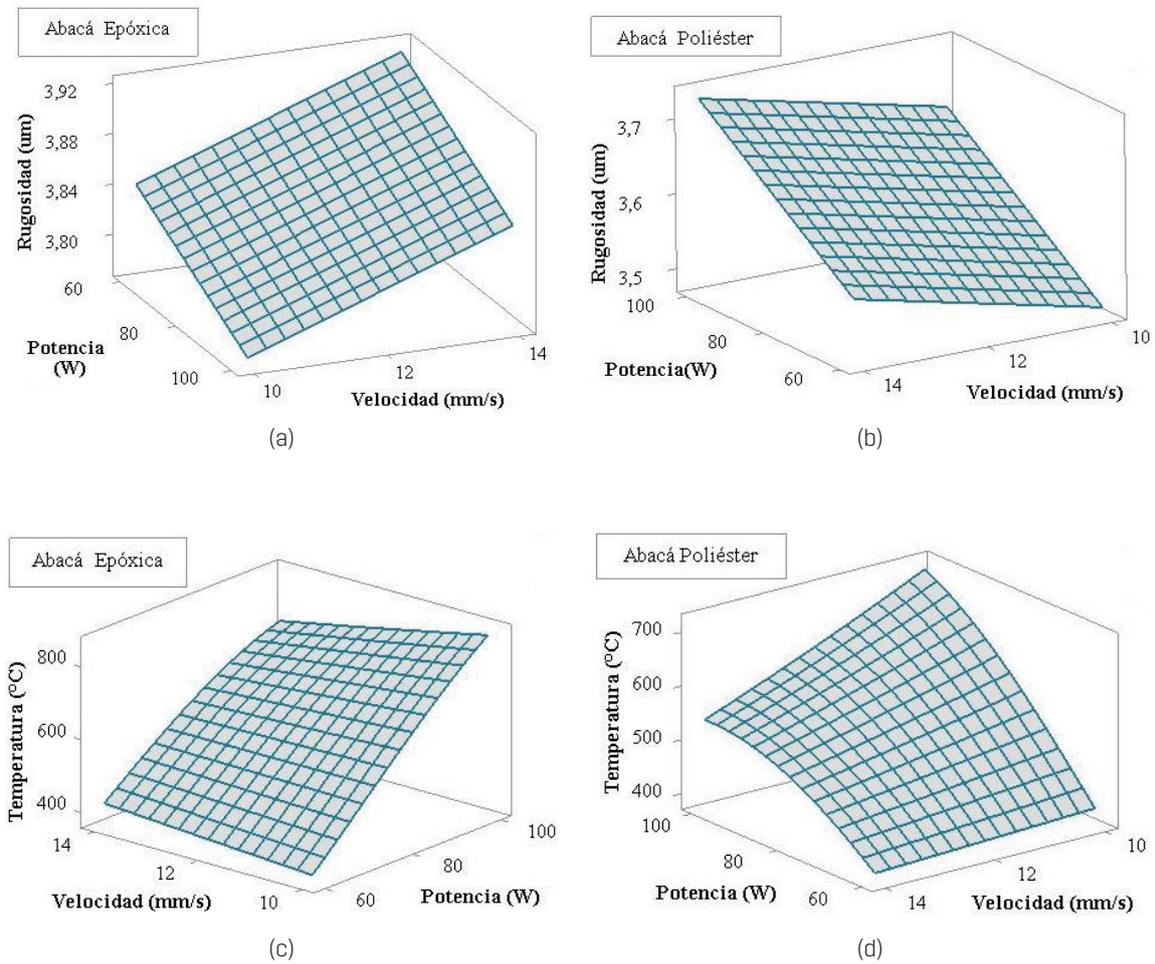
La figura 3 presenta las gráficas de superficie de respuesta, que indica la relación entre los diferentes parámetros de corte por láser y las variables de respuesta para el material CRFA. Las gráficas 3a y 3b de superficie en 3D revelan que si se corta con una potencia de 75W y velocidad de corte de 14 mm/s, se obtiene como resultado las menores rugosidades (Ra). Por otro lado, las gráficas 3c y 3d revelan que el menor efecto térmico (Ts), resultado del corte láser, se da cuanto menor potencia y mayor velocidad de corte se utilicen.

Figura 3. Gráfica superficie de respuesta, (a,b) para Ra y (c,d) para Ts del material CRFA, para los diferentes materiales de matriz



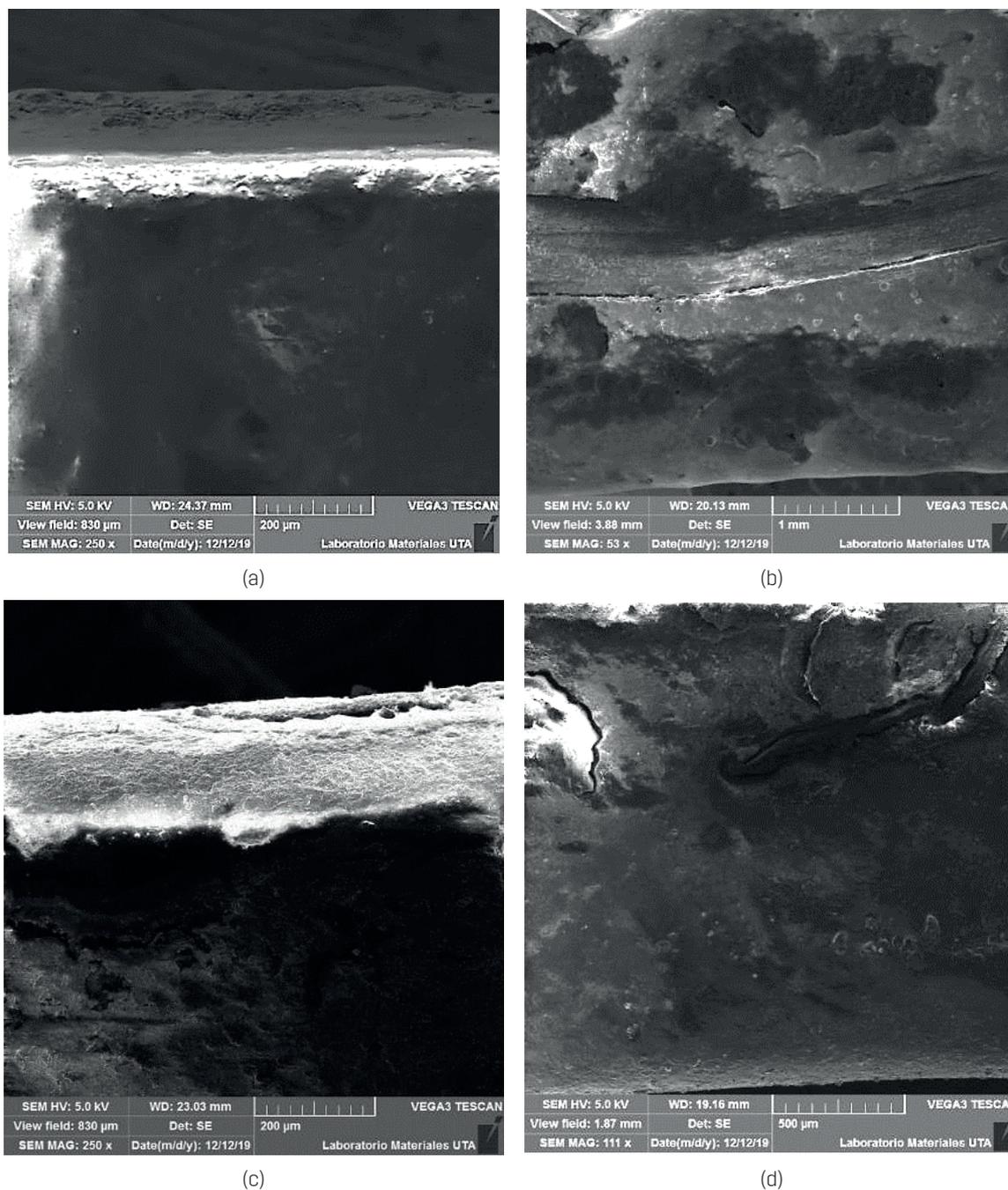
Para el material CRFB, las gráficas de superficie de respuesta se muestran en la figura 4. En matriz epoxi la menor Ra se obtiene utilizando 100W de P a una Vc de 10 mm/s; en cambio en matriz poliéster, la menor Ra resulta del uso de 60W de P con 10 mm/s de Vc. Por otro lado, las gráficas 3c y 3d revelan que el menor Ts en matriz epoxi se da a 60W de P con 10 mm/s de Vc y en matriz poliéster 60W de P con 14 mm/s de Vc.

Figura 4. Gráfica superficie de respuesta, (a,b) para Ra y (c,d) para Ts del material CRFB, para los diferentes materiales de matriz



La inspección del borde cortado desde una vista superior y transversal de la zona de corte de las mejores muestras, para cada tipo de fibra, se muestran la figura 5. El borde cortado de las muestras procesadas indica un acabado más uniforme y limpio en CRFA en matriz poliéster (figura 5a), con respecto al CRFB en matriz poliéster. Se puede apreciar que el corte láser por CO₂ corta efectivamente la matriz y fibras de refuerzo naturales sin problema. En las figuras 5b, 5c y 5d se puede ver el corte limpio de las fibras naturales por carbonización y fundición vaporización de la matriz polimérica, resultado de la alta temperatura en el proceso de corte láser.

Figura 5. Imágenes de microscopía electrónica de barrido SEM de la zona de corte, (a,c) vista superior y (b,d) sección transversal de la zona de corte para CRFA y CRFB respectivamente



La figura 6a muestra la diferencia de la afectación térmica entre los dos tipos de resinas utilizadas para un mismo material compuesto (CRFA). Se ve con claridad que la resina epoxi presenta una quemadura alrededor del contorno de corte (zona café) de aproximadamente de 2.5 mm, a diferencia de la zona de afectación en el compuesto con matriz poliéster la zona de afectación, que es de aproximadamente 0.6 mm, lo cual evidencia una reacción química por presencia de una alta temperatura concentrada generada por el proceso. Una ampliación del

borde de corte en una probeta afectada térmicamente, se observa en la figura 6b. En la mencionada imagen se puede ver dos zonas: la zona clara es la zona café afectada térmicamente, explicada antes, y la zona oscura representa la quemadura del borde de corte del compuesto con un ancho de promedio de 75 micras.

Figura 6. Zona de afectación térmica por corte láser (a). Diferencias entre la matriz poliéster y epoxi (b). Imagen de afectación térmica por microscopia electrónica a 40X



4. Discusión

Interpretar los resultados de acuerdo con estudios similares, es decir correlacionar los resultados del estudio con otros realizados; enunciar ventajas del estudio y sus aportaciones, evitando adjetivos que elogien los resultados.

Los valores óptimos de los parámetros de operación (potencia y velocidad de corte), del proceso de corte por láser de CO_2 , para el material CRFA, para obtener la mejor rugosidad en matriz poliéster ($3,179 \mu\text{m}$) y en la matriz epoxi ($4,327 \mu\text{m}$), es de $76,16 \text{ W}$ y 14 mm/s . En particular, el compuesto de matriz poliéster reforzado con cascarilla de arroz muestra el mejor resultado. Por otra parte, al combinar una potencia de 60 W con una velocidad de 10 mm/s , para cortar una matriz de resina poliéster, se logra reducir la rugosidad superficial del material y se obtiene un valor de $3,483 \mu\text{m}$, y con una potencia de 80 W a 12 mm/s se obtuvo una rugosidad R_a mínima de $3,705 \mu\text{m}$ sobre la matriz epoxi.

Se evidenció que tanto la potencia y velocidad de corte influyen en la calidad como en el efecto térmico; sin embargo, su comportamiento e influencia es distinto dependiendo del tipo de fibra y material matriz del compuesto. Lo dicho tiene concordancia con trabajos similares como los de A. Riveiro et al. (2012 y 2007).

Los valores adecuados de operación para el proceso de corte láser de CO_2 , con el cual se consigue la óptima temperatura superficial del material compuesto de matriz poliéster ($371,93 \text{ }^\circ\text{C}$) y del compuesto de matriz epoxi ($577,45 \text{ }^\circ\text{C}$), reforzados con cascarilla de arroz, es de 60 W de potencia y de una velocidad de corte de 14 mm/s . Con ello se consigue que en los materiales compuestos cortados por rayo láser se queme en menor proporción. Utilizando los parámetros

de corte: una potencia de 60W con una velocidad de 10 mm/s y una matriz de resina epoxi, se logra obtener una temperatura superficial mínima de 385.74°C, y para el caso de una matriz poliéster, se logra tener una temperatura superficial de 370.02 °C, al emplear 60 W combinado con 14 mm/s, con lo cual, al utilizar estos parámetros respectivamente, se obtendrá la menor afectación térmica en los compuestos estudiados.

Estas temperaturas provocaron una afectación térmica en los materiales compuestos de 0.6 mm (60 µm) en la matriz de resina poliéster y de hasta 2.5 mm en epoxi. Tales resultados son comparables a estudios similares de corte láser a alta potencia, donde la zona de afectación térmica (HAZ) fue de entre 0.28 a 0.4 mm para diferentes termoplásticos (Choudhury y Shirley, 2010). Asimismo, en matrices termoestables con fibras sintéticas se llegó a obtener una HAZ de 0.54 a 058 mm aproximadamente (Riveiro et al., 2017).

5. Conclusiones y recomendaciones

Cuanto menor tiempo quede el material expuesto al láser, mayor será la calidad de la superficie del material. En el corte por láser, el material es eliminado por la alta energía generada por un rayo láser enfocado, que evapora el material a lo largo de la trayectoria del corte.

El corte láser en CRFA en matriz poliéster presenta la menor rugosidad y además brinda el corte más limpio resultado del corte láser a potencia baja. También se agrega que la afectación térmica es menor y a simple vista no es notorio, a diferencia de la afectación térmica sobre la resina epoxi.

Mediante los resultados de la rugosidad promedio (Ra) de los materiales compuestos manufacturados por corte láser CO₂, se determinó que se encuentran dentro del rango aceptable [6,3 – 1,6] µm, que establece la norma ISO 1302, es decir que ambos materiales compuestos presentan un buen acabado superficial.

La selección minuciosa de los parámetros de procesamiento permite obtener cortes con buena calidad (cortes limpios sin delaminación), lo que permite expresar que es una tecnología apropiada para cortar este tipo de materiales como una opción alterna a los procesos de manufactura convencionales. Esto abre una brecha importante para explorar aún más si el corte con láser CO₂ de baja potencia puede reemplazar el corte mecánico en términos de precisión, productividad y costos.

Bibliografía

- Altin Karataş, M. y Gökkaya, H. (2018). A Review on Machinability of Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) and Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Composite Materials. *Defence Technology*, 14(4), 318-326. doi: 10.1016/j.dt.2018.02.001
- Çengel, Y. A. y Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de calor y masa. Fundamentos y Aplicaciones*. Mc.Graw Hill
- Choudhury, I. y Shirley, S. (2010). Laser Cutting of Polymeric Materials: An Experimental Investigation. *Optics & Laser Technology*, 42(3), 503-508. doi: 10.1016/j.optlastec.2009.09.006
- Choudhury, I. A. y Chuan, P. C. (2013). Experimental Evaluation of Laser Cut Quality of Glass Fibre Reinforced Plastic Composite. *Optics and Lasers in Engineering*, 51(10), 1125-1132. doi: 10.1016/j.optlaseng.2013.04.017
- Davim, J. P.; Barricas, N.; Conceicao, M. y Oliveira, C. (2008). Some Experimental Studies on CO₂ Laser Cutting Quality of Polymeric Materials. *Journal of materials processing technology*, 198(1-3), 99-104. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2007.06.056

- Davim, J. P.; Oliveira, C.; Barricas, N. y Conceição, M. (2008). Evaluation of Cutting Quality of PMMA Using CO2 Lasers. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 35(9), 875-879. doi: 10.1007/s00170-006-0766-1
- Dewil, R.; Vansteenwegen, P. y Cattrysse, D. (2016). A Review of Cutting Path Algorithms for Laser Cutters. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(5-8), 1865-1884. doi: 10.1007/s00170-016-8609-1
- ISO, E. 4288. (1996). *Geometrical Product Specifications (GPS). Surface texture. Profile Method. Rules and Procedures for the Assessment of Surface Texture*. Geneva: International Organization for Standardization.
- ISO Standard. (2000-03) 5436-1. (E), Geometrical Product Specifications (GPS)-Surface texture: Profile method. *Measurement standards-Part, 1*.
- ISO UNE, E. (2002) 1302. Especificación geométrica de productos (GPS). *Indicación de la calidad superficial en la documentación técnica de productos. (ISO 1302: 2002)*.
- Kurt, M.; Kaynak, Y.; Bagci, E. et al. (2009). Dimensional Analyses and Surface Quality of the Laser Cutting Process for Engineering Plastics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 41(3-4), 259-267.
- Lamikiz, A.; de Lacalle, L. L.; Sánchez, J. et al. (2005). CO2 laser Cutting of Advanced High Strength Steels (AHSS). *Applied Surface Science*, 242(3-4), 362-368. doi: 10.1016/j.apsusc.2004.08.039
- Lohr Rodríguez, C. (2011). *Mejoramiento de la calidad del borde cortado en PMMA por láser de CO2*. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Patel, P.; Sheth, S. y Patel, T. (2016). Experimental Analysis and ANN Modelling of HAZ in Laser Cutting of Glass Fibre Reinforced Plastic Composites. *Procedia Technology*, 23, 406-413. doi: 10.1016/j.protcy.2016.03.044
- Peças, P.; Carvalho, H.; Salman, H. & Leite, M. (2018). Natural Fibre Composites and Their Applications: A Review. *Journal of Composites Science*, 2(4), 66. doi: 10.3390/jcs2040066
- Pérez, C.; Paredes, J.; Lalaleo, E. et al. (2017). Análisis numérico/experimental de las propiedades mecánicas del compuesto de matriz poliéster reforzado con cascarilla de arroz. *Revista Ciencia*, 19(4).
- Pou, J.; Boutinguiza, M.; Quintero, F., et al. (2001). Comparative Study of the Cutting of Car Interior Trim Panels Reinforced by Natural Fibers. *Journal of Laser Applications*, 13(3), 90-95. doi: 10.2351/1.1373436
- Powell, J. (1993). *CO2 Laser Cutting* (Vol. 214): Springer.
- Radovanovic, M. y Madic, M. (2011). Experimental Investigations of CO2 Laser Cut Quality: A Review. *Non-conventional Technologies Review*, 4, 35-42.
- Ramírez, A.; Pascual, J.; Lasema, J. (1998). Efecto de las condiciones de corte de un láser de Nd: YAG sobre la estructura y microcomposición de la superficie de aceros inoxidables. *Revista de metalurgia*, 34(2), 220-226.
- Riveiro, A.; Quintero, F.; Lusquiños, F., et al. (2012). Experimental Study on the CO2 Laser Cutting of Carbon Fiber Reinforced Plastic Composite. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 43(8), 1400-1409. doi: 10.1016/j.compositesa.2012.02.012
- Riveiro, A.; Quintero, F.; Lusquiños, F. et al. (2017). Laser Cutting of Carbon Fiber Composite materials. *Procedia Manufacturing*, 13, 388-395. doi: 10.1016/j.promfg.2017.09.026
- Yashas Gowda, T.; Sanjay, M.; Subrahmanya Bhat, K. et al. (2018). Polymer Matrix-natural Fiber Composites: An overview. *Cogent Engineering*, 5(1)
- Zaeh, M. F.; Byrne, G. y Stock, J. W. (2017). Peak Stress Reduction in the Laser Contouring of CFRP. *CIRP Annals*, 66(1), 249-252. doi: 10.1016/j.cirp.2017.04.126

Temperatura superficial y estado de la vegetación del bosque de *Polylepis spp*, distrito de San Marcos de Rocchac, Huancavelica - Perú

(Surface temperature and states of the vegetation of the forest of Polylepis spp, district of San Marcos de Rocchac, Huancavelica - Peru)

Quispe Reymundo Bimael J.¹, Révalo Acevedo Ronald H.²

Resumen

El efecto de la temperatura superficial sobre el estado de la vegetación en el bosque de *Polylepis spp* es el objetivo de esta investigación. Como metodología se utilizó 9 imágenes satelitales del Sensor Landsat 8 OLI/TIRS, evaluadas mediante la percepción remota, aplicando correlación r Pearson e hipótesis estadística t student. Como resultado se obtuvieron las relaciones durante los 9 meses del año 2018 - 2019 entre LST - NDVI $r=0.11$, $t=0.29$; LST - NDWI $r=-0.43$, $t=1.27$; LST - SAVI $r=0.13$, $t=0.34$ y LST - MSI $r=0.56$, $t=1.77$; la relación promedio de 9 imágenes clasificado en valores Jenks Natural Breaks entre LST - NDVI $r=0.99$, $t=47.12$; LST - NDWI $r=-0.98$, $t=28.93$; LST - SAVI $r=-0.99$, $t=65.39$ y LST - MSI $r=0.99$, $t=30.39$; y el efecto del "TVX" para NDVI (Este: $-0.0778/0.0549$; Oeste: $0.6434/-0.0120$), NDWI (Oeste: $-0.6128/-0.0463$; Este: $0.3057/0.0474$), SAVI (Oeste: $0.4089/0.0232$; Este: $-0.0073/-0.0011$) y MSI (Este: $0.5565/0.1856$; Oeste: $1.3993/0.0362$). En conclusión, se confirma que en los 9 meses que duró el monitoreo no existió correlación estadística pero que en promedio de las 9 imágenes clasificados en Jenks Natural Breaks sí existe correlación; TVX confirmó la influencia de temperatura superficial sobre el estado de vegetación dentro del bosque a través del tiempo.

Palabras clave

Polylepis; LST; Estado de la Vegetación; TVX; Jenks Natural Breaks.

Abstract

The effect of surface temperature on the state of the vegetation in the forest of Polylepis spp and to relate it is the objective of this research. As methodology 9 satellite images of the Landsat 8 OLI / TIRS Sensor were used, evaluated using remote sensing, applying Pearson r correlation and statistical t student hypothesis. The following results were obtained: the relationships during the 9 months of the year 2018 - 2019 between LST - NDVI $r = 0.11$, $t = 0.29$; LST - NDWI $r = -0.43$, $t = 1.27$; LST - SAVI $r = 0.13$, $t = 0.34$ and LST - MSI $r = 0.56$, $t = 1.77$; the average ratio of 9 images classified in Jenks Natural Breaks values between LST - NDVI $r = 0.99$, $t = 47.12$; LST - NDWI $r = -0.98$, $t = 28.93$; LST - SAVI $r = -0.99$, $t = 65.39$ and LST - MSI $r = 0.99$, $t = 30.39$; and the effect of "TVX" for NDVI (East: $-0.0778 / 0.0549$; West: $0.6434 / -0.0120$), NDWI (West: $-0.6128 / -0.0463$; East: $0.3057 / 0.0474$), SAVI (West: $0.4089 / 0.0232$; East: $-0.0073 / -0.0011$) and MSI (East: $0.5565 / 0.1856$; West: $1.3993 / 0.0362$). In conclusion, it is confirmed that during the 9 months that the monitoring lasted, there was no statistical correlation and that on average of the 9 images classified in Jenks Natural Breaks there is a correlation; TVX confirmed the influence of surface temperature on the state of vegetation within the forest over time.

Keywords

Polylepis; LST; Vegetation States; TVX; Jenks Natural Breaks

1. Introducción

Los bosques de *Polylepis* representan una columna de existencia y supervivencia para la flora y fauna nativa del Perú. Su importancia es tanto ecológica como humana (Fjeldså, 1993; Hoch yy

1 Ciencias Forestales y del Ambiente - UNCP, Huancayo - Perú (bjqrforesamb@gmail.com).
2 Ciencias Forestales y del Ambiente - UNCP, Huancayo - Perú (rrevolo@uncp.edu.pe).

Körner, 2005; Kessler, 2006). Estos bosques se encuentran ubicados cerca de áreas con neblinas (Hoch y Körner, 2005), zona áridas (Dourojeanni P., 2008), laderas pedregosas y pendientes empinadas (Fjeldsá, 1993; Segovia-Salcedo, Domic, Boza, y Kessler, 2018), asociadas con musgos, líquenes y plantas epifitas (Hoch y Körner, 2005; Kessler, 2006). Existen pocos estudios que evalúan los bosques de *Polylepis* mediante el uso de las imágenes satelitales (Landsat) (Braun, 1997; Campomanes, 2017; Contreras, 2019; Dourojeanni P., 2008; Mejia Rios, 2014; Pacheco, Franco, Cáceres, Navarro, y Jove, 2018; Zutta et al., 2012) Uno de los primeros es Braun (1997), que evalúa las características ambientales, estado vegetal y ecológico utilizando imágenes Landsat en bosque de *Polylepis tarapacana*.

El "Estado de la Vegetación" mencionado por Alshaikh, 2015, Anbazhagan y Paramasivam (2016); Gilabert, González-Piqueras, y García-Haro (1997) y Muñoz (2013) busca evaluar cuantitativa/cualitativa, (Campomanes, 2017; Ito et al., 2007) y describir su medio ambiente vegetal (Contreras, 2019; Gonzaga, 2015; Ito et al., 2007) por medio de imágenes Landsat, mediante los índices de vegetación, (Gilabert et al., 1997; Ito et al., 2007; Weng, Lu, y Schubring, 2004), determinando la densidad, estrés hídrico, estado sanitario y la influencia de la temperatura (Alshaikh, 2015; Anbazhagan y Paramasivam, 2016; Carvajal y Pabón, 2014; Galvão, Formaggio, y Tisot, 2005; Gilabert et al., 1997). Los índices de vegetación son transformaciones que implican efectuar una combinación matemática entre los niveles digitales almacenados en dos o más bandas espectrales de la misma imagen (Gilabert et al., 1997; Gonzaga, 2014; Speranza y Zerda, 2002).

El NDVI determina el verdor y vigor, y la densidad de biomasa de las cubiertas vegetales (Rouse, Hass, Schell, y Deering, 1973; Silva Laurentino, 2014; Weng et al., 2004) indicando la salud de las masa forestales y estado de fitosanidad (Jepsen et al., 2009; Silva Laurentino, 2014); el NDWI se utilizó en estudios forestales (Ito et al., 2007; Stimson, Breshears, Ustin, y Kefauver, 2005), el cual indica el agua que posee la vegetación o el nivel de saturación de humedad que posee el suelo (Almeida, 2015), así como el contenido de humedad interno de la vegetación (Galvão et al., 2005); diferenciando la humedad del suelo de la densidad y cobertura del suelo (Campomanes, 2017); el SAVI minimiza el efecto del suelo en áreas con baja cobertura o baja densidad vegetal (Gilabert et al., 1997; Huete, 1988) y porcentaje de cubierta vegetal (Jepsen et al., 2009); en orientaciones y zona altitudinal en estos bosque determina su densidad, en relación con el suelo desnudo (Campomanes, 2017; Dourojeanni P., 2008; Mejia Rios, 2014; Pacheco et al., 2018), la mayor densidad de *Polylepis* se ubica en 4400 – 4500 m.s.n.m. (Braun, 1997; Dourojeanni P., 2008); y, por último, el MSI, la cual es utilizado para conocer el estrés de una cobertura vegetal (Hardisky, Klemas, y Smart, 1983), relacionando con la temperatura de la planta y la humedad aprovechable del suelo (Silva Laurentino, 2014); relacionando a la humedad del suelo, precipitación y la temperatura (Hong, Lakshmi, y Small, 2007).

La temperatura superficial controla el intercambio de calor y agua superficial con la atmosfera; el uso/cobertura del suelo es un factor importante que tiene un impacto sobre el ecosistema (Alshaikh, 2015; Anbazhagan y Paramasivam, 2016); la interacción entre la temperatura y la vegetación diferencia el tipo de cobertura del suelo y su estado (De Sousa y Júnior, 2012; Gonzaga, 2014; Weng et al., 2004), así como el potencial de sequía y efecto hacia las plantas (Goward et al., 1994; Orhan, Ekercin, y Dadaser-Celik, 2014). Este análisis es conocido como Índice Temperatura – Vegetación (Goward et al., 1994). La temperatura tiene influencia en las características de la vegetación (Campomanes, 2017; Carvajal y Pabón, 2014; Hong et al., 2007): si aumenta la cubierta vegetal, la temperatura descenderá (Alshaikh, 2015; Anbazhagan y Paramasivam, 2016; De Sousa y Júnior, 2012). En otras palabras, si existen variaciones térmicas a través del tiempo,

la densidad de la cobertura vegetal se transformará cambiando así su estado vegetal (Alshaikh, 2015; Anbazhagan y Paramasivam, 2016; Campomanes, 2017; Orhan et al., 2014).

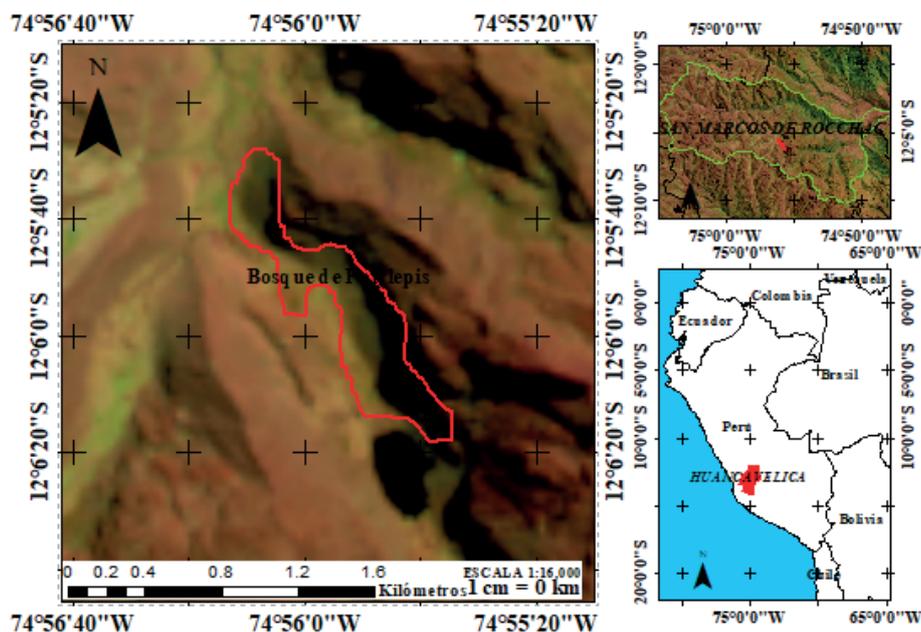
No existen estudios que evalúen la influencia y la relación de la temperatura a través del tiempo sobre el bosque de *Polylepis* mediante imágenes satelitales Landsat, lo cual es importante (De Sousa y Júnior, 2012; Goward et al., 1994; Orhan et al., 2014; Weng et al., 2004) para observar el estado de vegetación por el efecto de la temperatura (Goward et al., 1994; Weng et al., 2004). La investigación implica relacionar la temperatura superficial y los índices de vegetación durante los 9 meses del año 2018 – 2019, con un promedio de 9 imágenes clasificadas en 20 valores naturales y, finalmente, analizar la influencia de la temperatura sobre el estado de la vegetación del bosque de *Polylepis*.

2. Metodología

A. Área de estudio

El bosque de *Polylepis* spp se localiza en el distrito de San Marcos de Rocchac en la provincia de Tayacaja – Huancavelica, cuya ubicación geográfica es Log.: 75°9'38.80" y Lat.:12°37'16.43", a unos 3800 – 4500 m.s.n.m., con una extensión de 56.2639 Ha.

Figura 1. Mosaico bandas espectrales 6,5 y 4 "Análisis de Vegetación", *Polylepis* (limite rojo)



B. Obtención de imágenes satelitales

Se utilizó 9 imágenes satelitales Landsat 8 OLI/TIRS, tomadas durante los años 2018 y 2019; con cubierta de nubes terrestre 50 %, georreferenciación Path 6 y Row 68 extraído del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) cuyo sitio web es <https://earthexplorer.usgs.gov/>

C. Temperatura Superficial Terrestre (LST)

CORRECCIÓN DE BANDA ESPECTRAL

Resplandor de la parte superior de la atmósfera (TOA), datos del texto (_MTL.txt) (Anandababu, Purushothaman, y Suresh Babu, 2018; Bravo, 2017; USGS, 2019).

$$L_{\lambda} = (ML)*(Qcal) + AL \quad [1]$$

Donde:

L_{λ} : radiancia espectral TOA (Watts/(m²*sr* μ m)).

ML: banda multiplicativa de resplandor (Radiancia_Mult_Band_X, x: número de la banda).

AL: agregar resplandor de banda (Radiancia_Mult_Band_X, x: número de banda).

Qcal: valor de pixel de productos estándar cuantificados y calibrados.

Temperatura de brillo de la parte superior de la atmósfera: datos de (_MTL.txt). (Anandababu et al., 2018; Bravo, 2017; USGS, 2019).

$$T_b = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\lambda}} + 1\right)} - 272.15 \quad [2]$$

Donde:

T_b: temperatura de brillo de la parte superior de la atmosfera (°C).

L_{λ} : radiancia espectral TOA. K1: k1 constante de la banda (_MTL.txt: número de banda).

K2: k2 constante de la banda (_MTL.txt: número de banda)

Emasividad de la superficie terrestre: calculada por valores de NDVI. Cálculo de la proporción de la vegetación (Anandababu et al., 2018).

$$P_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}\right)^2 \quad [3]$$

Donde:

P_v: proporción de la vegetación

NDVI: índice de vegetación de diferencia normalizada

NDVI (max. - min.): valores máximos y mínimos de NDVI.

Cálculo de la Emasividad (Anandababu et al., 2018).

$$\varepsilon = 0.004 * P_v + 0.986 \quad [4]$$

Donde:

ε : emasividad de la superficie terrestre.

P_v: proporción de la vegetación

Ecuación general de la temperatura superficial terrestre (Anandababu et al., 2018; Carnahan y Larson, 1990).

$$LST = \frac{T_s}{1 + \ln \varepsilon * \left(\frac{T_s * W}{14380}\right)} \quad [5]$$

Donde:

Bt: temperatura de brillo de la parte superior de la atmósfera (°C).

W: longitud de onda de Radiancia emitida.

ϵ : emisividad de la superficie terrestre.

D. Estimación de los Índices de Vegetación

CORRECCIÓN DE BANDAS ESPECTRALES

Determinación de reflectancia aparente (TOA) y conversión de los niveles digitales a valores de reflectancia, (_MTL.txt) (Bravo, 2017; USGS, 2019).

$$\rho_{\lambda} = \frac{M_{\rho} * Q_{cal} + A_{\rho}}{\cos(\theta_{ZE})} \quad [6]$$

Donde:

ρ_{λ} : reflectancia TOA del sensor, con corrección del ángulo solar.

Qcal: valor de pixel producto estándar cuantificado y calibrado (ND).

M_{ρ} : factor de cambio de escala multiplicativo (Reflectance_Mult_Band_X, x: número de banda).

A_{ρ} : banda específico aditivo reescala factor de los metadatos (Reflectance_Add_Band_X, x: número de banda).

θ_{ZE} : ángulo de elevación del sol local (Sun_Elevation). Equivalente a $90 - \theta_{ZE'}$, donde θ_{ZE} es la elevación solar.

ECUACIÓN PARA BANDAS ESPECTRALES

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) determina el vigor de la vegetación, biomasa vegetal sin presencia de enfermedades (Rouse et al., 1973) y estado fitosanitario (Silva Laurentino, 2014); los valores digitales se encuentran entre -1 a 1, donde 1 demuestra un buen vigor de la vegetación.

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad [7]$$

Donde:

NIR es reflectancia de la banda infrarroja cercano (banda 5).

R es reflectancia de la banda roja (banda 4).

El índice de agua de diferencia normalizada (NDWI) analiza el contenido de humedad en las plantas y contenido de agua que posee el suelo; los valores se encuentran entre -1 a 1; donde 1 es el contenido de agua abundante y -1 lo inverso (Hardisky et al., 1983).

$$NDWI = \frac{G - NIR}{G + NIR} \quad [8]$$

Donde:

G: reflectancia de la banda verde (banda 4)

NIR: reflectancia de la banda infrarroja cercano (banda 5).

El índice ajustado a la vegetación del suelo (SAVI) determina la erosión del suelo en relación con la densidad de la vegetación (Gonzaga, 2014; Huete, 1988); el valor se encuentran entre -1 a 1, el valor 1 representa excesiva erosión y - 1 todo lo contradictorio.

$$SAVI = \left(\frac{NIR-R}{NIR + R + 1} \right) * (1 + L) \quad [9]$$

Dónde:

NIR: reflectancia de la banda infrarroja cercano (banda 5),

R: reflectancia de la banda roja (banda 4)

L: (densidad: 0.00 u 0.25 cubierta vegetal, 0.5 cobertura de vegetación medio y 1 cubierta de vegetación baja).

El índice de estrés hídrico (MSI) determina el estrés hídrico o déficit hídrico de la cobertura vegetal; estos valores oscilan entre -3 a 3. El valor 3 obtendrá un mayor estrés hídrico de la cobertura vegetal (Rock, Vogelmann, Williams, Vogelmann, y Hoshizaki, 1986).

$$MSI = \frac{SWIR}{NIR} \quad [10]$$

Donde:

SWIR: reflectancia de la banda infrarroja medio (banda 6)

NIR: reflectancia de la banda cercano (banda 5).

E. Clasificación de estándares, Análisis de correlación e hipótesis estadístico

La clasificación estándar se realizó mediante el método de "Jenks Natural Breaks 1967", diseñando intervalos de clases naturales y estableciendo agrupaciones inherentes a los datos (Smith, Goodchild, y Longley, 2018); mediante el QGIS 3.10.1; relación lineal r Pearson e hipótesis estadística t student con $\alpha=0.05$ se realizó con el programa R studio.

F. Índice Temperatura – Vegetación (TVX)

Determina la relación entre la temperatura superficial y el índice de vegetación (potencial efecto/sequia de las plantas) (Goward et al., 1994), comparando el resultado de los índices de vegetación mediante los valores digitales de la imagen Landsat 8 OLI/TIRS.

$$TVX = \frac{sVI}{LST} \quad [11]$$

Donde:

LST: temperatura superficial terrestre

sVI: índice de vegetación espectral.

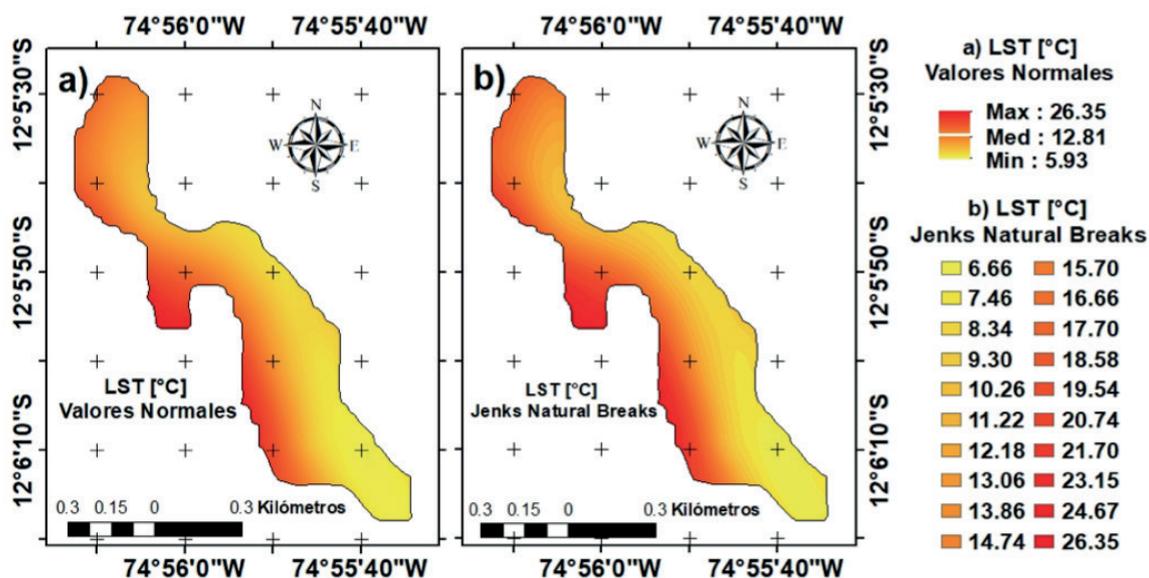
3. Resultados

A. Temperatura Superficial Terrestre (LST)

La Tabla 1 muestra la temperatura mínima registrada con las imágenes satelitales. Como se puede observar, durante los 9 meses del año 2018 – 2019 la temperatura es de 4.79°C, que corresponde a la fecha (23/04/19), y la máxima temperatura es 30.64°C, con fecha (13/10/18). La temperatura

superficial terrestre promedio de las 9 imágenes satelitales clasificados en 20 valores naturales encontró valor mínimo de 6.66°C y temperatura máxima de 26.35°C (Figura 2.a y b).

Figura 2. Imagen a) LST promedio de 9 imágenes durante el año 2018 – 2019;
b) promedio de 9 imágenes clasificadas en 20 Jenks Natural Breaks. Tamaño de pixel 30X30m aplicando técnica de remuestreo de visualización interpolación bilineal (proporcionando resultado de aspecto suavizado)



B. NDVI, NDWI, SAVI y MSI durante los 9 meses entre el 2018 y 2019

El NDVI máximo, durante los 9 meses de monitoreo, fue de 0.6937, lo cual se considera un muy buen estado fitosanitario, correspondiendo a la fecha 01/01/19. Este valor se encuentra en los rangos establecidos de los valores NDVI; el valor mínimo durante los 9 meses es -0.3220, presentando en mal estado fitosanitario y corresponde a la fecha 23/04/19.

Tanto el mínimo como el máximo valor corresponden a la fecha 23/04/09 del NDWI con 0.8318, indicando un alto contenido de humedad o contenido de agua, y el valor mínimo es -0.6642, indicando un bajo contenido de agua o humedad.

El SAVI dentro del bosque de *Polylepis* indicó un valor máximo de 0.5037, obtenido así alta erosión y bajo contenido de *Polylepis*, en la fecha 01/01/19, y un valor mínimo de -0.0406, indicando así un bajo contenido de erosión y una abundancia de *Polylepis*, correspondiendo a la fecha 23/04/19.

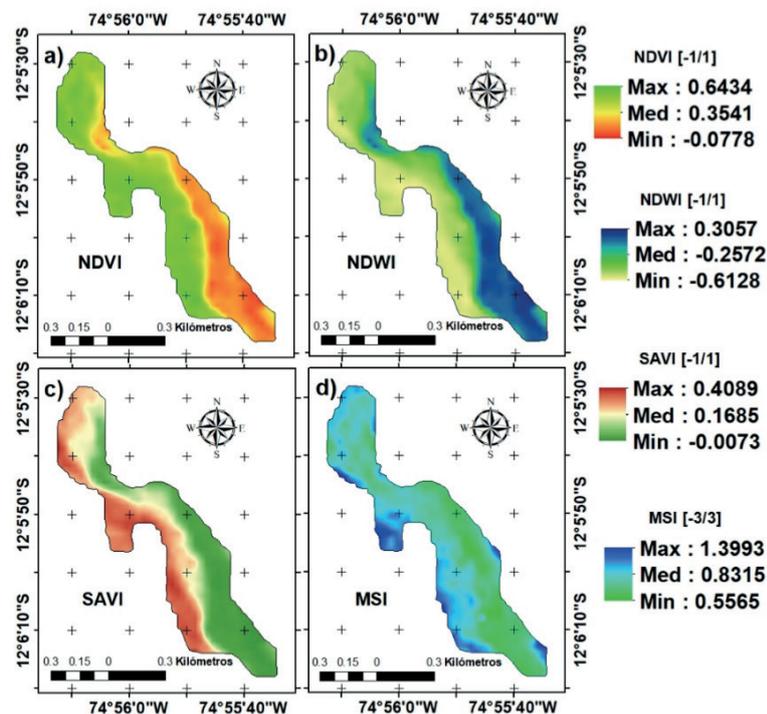
El MSI registró un valor mínimo de 0.5355, presentando un contenido de agua moderado, el cual corresponde a la fecha 23/04/19, y el valor máximo es 1.7320, siendo un estrés hídrico alto de la cobertura vegetal; es decir, el contenido de agua del tejido o célula vegetal está abajo del contenido de agua más alto, y corresponde al 07/06/18.

Tabla 1. Resultado de valores digitales del bosque de *Polylepis spp*

Fecha	NDVI		SAVI		NDWI		MSI		LST	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
22/05/2018	-0.0468	0.6543	-0.0059	0.4129	-0.6262	0.2541	0.3772	1.4068	6.97	28.37
07/06/2018	0.0472	0.6455	-0.0117	0.3839	-0.6197	0.3090	0.4172	1.7320	5.85	25.98
23/06/2018	-0.0984	0.6568	-0.0089	0.4260	-0.6390	0.3477	0.5355	1.4974	5.05	28.19
13/10/2018	0.0308	0.6601	-0.0035	0.4238	-0.6258	0.2538	0.5149	1.4833	6.70	30.64
01/01/2019	0.1401	0.6937	-0.0159	0.5037	-0.6607	0.3607	0.4540	1.3411	6.47	22.26
23/04/2019	-0.3220	0.6750	-0.0407	0.4733	-0.6642	0.8318	0.3133	1.5707	4.79	23.81
25/05/2019	0.2039	0.6680	-0.0177	0.4408	-0.6438	0.4301	0.3786	1.5916	5.15	24.37
26/06/2019	0.0273	0.6275	0.0040	0.4031	-0.6023	0.1611	0.5241	1.4191	5.05	25.73
12/07/2019	-0.0700	0.6254	-0.0072	0.3787	-0.6072	0.3051	0.5348	1.4976	5.84	29.90

Resultados máximos y mínimos de valores digitales durante 9 meses del año 2018 – 2019.

Figura 3. Análisis del bosque de *Polylepis spp* mediante los valores mínimos y máximos de los índices de vegetación, durante 9 meses en el periodo 2018 - 2019. Figura: a) menciona el estado fitosanitario; b) contenido de agua; c) erosión del suelo; y d) estrés hídrico del bosque. Tamaño de celda/píxel 30x30m aplicando técnica de remuestreo de visualización interpolación bilineal



C. NDVI, NDWI, SAVI y MSI promedio de las 9 imágenes satelitales clasificados en 20 valores naturales

El valor mínimo del NDVI es 0.0013 ubicado en la orientación Este, y valor máximo es 0.6434 Oeste. Estos valores demostraron que la vegetación está en media-alto estado fitosanitario; el

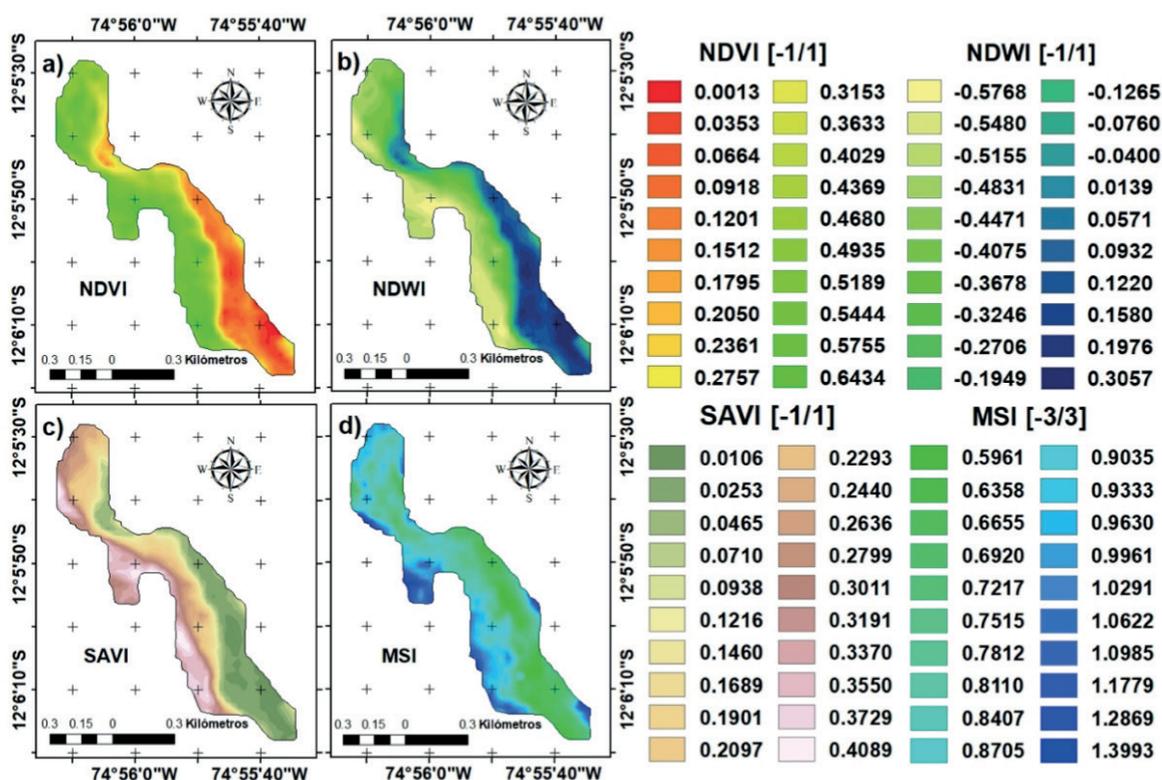
valor 0.6434 indica que el bosque de *Polylepis* está en un buen estado fitosanitario y el valor mínimo no excede a 0 o -1, lo que indica que la vegetación está medianamente enferma, como se observa en la Figura 4, a).

El NDWI demostró un valor mínimo de -0.5768 indicando un bajo contenido de humedad o contenido de agua; este valor se encuentra identificado en la orientación Suroeste-y el valor máximo de 0.3057, indicando un contenido de humedad medio, está ubicado en la orientación Este, Figura 4, b). Cabe recordar que este valor no alcanzó a -1 y, en especial, a 1, ya que es un indicador del contenido de agua en el bosque de *Polylepis*.

En tanto los valores naturales del SAVI encontraron el máximo de 0.4089, indicando que existe una erosión del suelo media con cobertura de vegetación casi nula, este valor se encuentra ubicado en la orientación Suroeste; y valor mínimo de 0.0106 indicando un contenido de erosión casi nulo y cobertura de vegetación media, se encuentra en la orientación Noreste, donde se confirma que estos valores clasificados naturalmente no alcanza a -1, cuyo indicador es primordial para determinar si el bosque no presenta nada de erosión y tiene una cobertura de vegetación alta. También se puede observar esto en la Figura 4, c).

El MSI mostró valor máximo de 1.3993, correspondiendo a un estrés hídrico medianamente alto; es decir, que el contenido de agua del tejido o célula vegetal está abajo del contenido de agua más alto, y el valor mínimo es 0.5961, mencionando que el estrés hídrico del bosque de *Polylepis* es moderado, como se observa en la Figura 4, d).

Figura 4. Análisis de mínimos y máximo de los índices de vegetación promedio de 9 imágenes clasificado en 20 valores Jenks Natural Breaks. Figura: a) estado fitosanitario; b) contenido de agua; c) erosión del suelo; y d) estrés hídrico. Tamaño de pixel/celda 30x30m (proporcionando un resultado más suavizado) aplicando técnica de remuestreo de visualización interpolación bilineal



D. Test de correlación

(LST – NDVI, NDWI, SAVI Y MSI) DURANTE LOS 9 MESES DEL AÑO 2018 – 2019

En la Figura 5 se muestra la correlación lineal Karl Pearson entre los 4 índices de vegetación y la temperatura superficial terrestre, contrastada con la prueba de hipótesis estadística t de student ($7;0.05$) = 2.36 bilateral, durante los 9 meses del periodo 2018 – 2019, demostró lo siguiente:

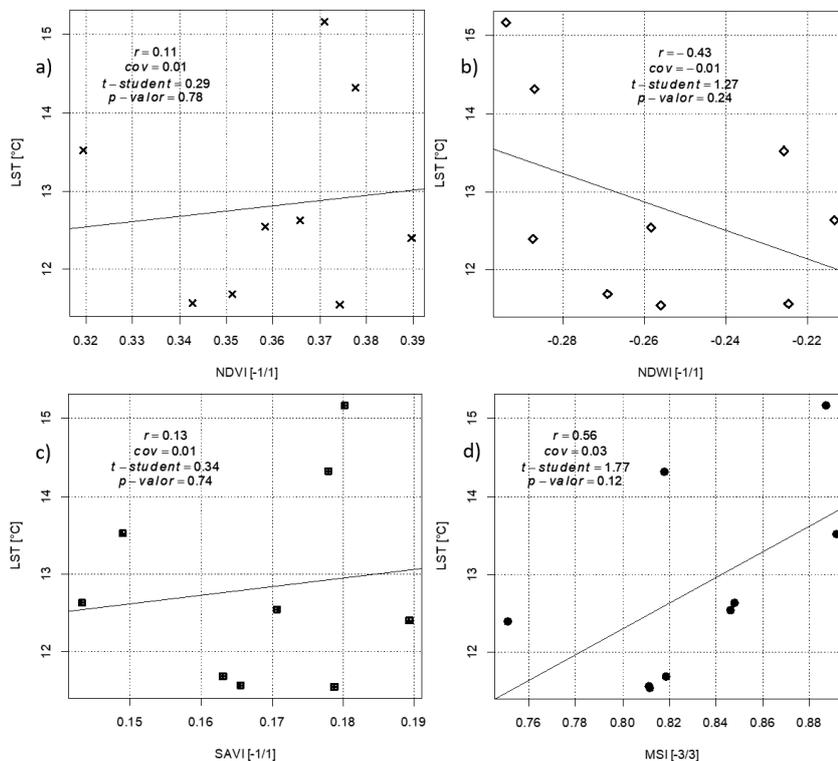
Para el NDVI – LST obtuvo un $r = 0.11$, demostrando una correlación negativa muy baja, coeficiente de covariación $cov = 0.01$; contrastando con la hipótesis, la estadística t student resultó ser mayor al valor calculado en $t = 0.29$ y $p\text{-valor} = 0.78$.

La correlación entre NDWI – LST indicó un $r = -0.43$ siendo una correlación negativa moderada, coeficiente de covariación $cov = -0.01$; contrastada con la prueba estadística t de student demostró ser mayor al resultado calculado $t = 1.27$ y $p\text{-valor} = 0.24$.

La correlación SAVI – LST reveló un $r = 0.13$, siendo una correlación positiva muy baja, con covariación $cov = 0.01$; aplicando la prueba t de student demostró ser muy alta al valor calculado con un $t = 0.34$ y $p\text{-valor} = 0.74$.

Y el test de correlación entre MSI – LST indicó un $r = 0.56$, demostrando la existencia de una correlación positiva medianamente alta, covariación $cov = 0.03$; contrapuesta con la prueba de hipótesis estadística t de student resultó ser mayor al valor calculado con $t = 1.77$ y $p\text{-valor} = 0.12$; por lo tanto, se afirmó que no existe correlación lineal estadística alguna entre la temperatura superficial terrestre y los 4 índices de vegetación.

Figura 5. Correlación de la LST – NDVI, NDWI, SAVI, MSI durante los 9 meses del periodo 2018 - 2019. La figura a) es la relación entre LST - NDVI; b) relación entre LST - NDWI; c) relación entre LST – SAVI; y d) la última relación entre LST - MSI



(LST – NDVI, NDWI, SAVI, MSI) PROMEDIO DE LAS 9 IMÁGENES
CLASIFICADO EN 20 VALORES NATURALES

La correlación lineal entre la temperatura superficial terrestre y los cuatro índices de vegetación (Figura 6), promedio de las 9 imágenes satelitales clasificadas en 20 valores naturales, contrastada la prueba de hipótesis estadística t de student (18;0.05) = 2.10 bilateral, manifestó lo siguiente:

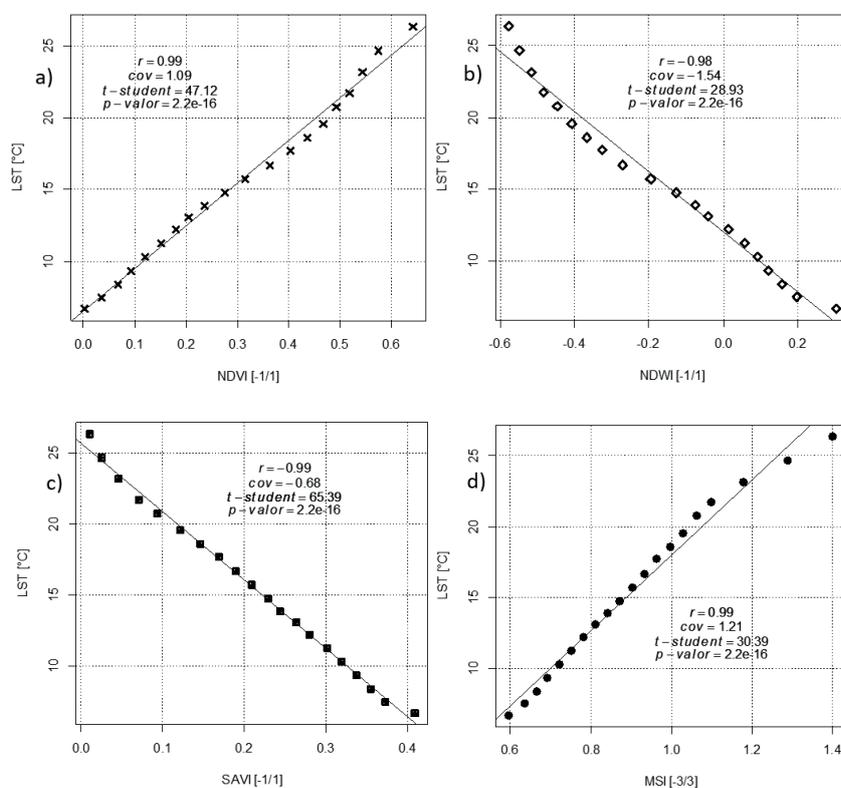
La correlación lineal entre NDVI – LST es de $r = 0.99$, demostrando que, sí existe correlación positiva muy alta, con covariación $cov = 1.09$; contrastando con la prueba estadística t student resultó ser menor al resultado obtenido $t = 47.12$ y $p\text{-valor} = 2.2e-16$.

En la correlación NDWI – LST se obtuvo un $r = -0.98$, siendo una correlación negativa muy fuerte, covariación $cov = 1.54$; aplicando la hipótesis estadística t student resultó ser muy menor al valor calculado $t = 28.93$ y $p\text{-valor} = 2.2e-16$.

La correlación lineal de SAVI – LST tiene un $r = -0.99$, correlación negativa muy alta, covariación $cov = -0.68$, la cual fue destacada con la prueba de hipótesis estadística t student y resultó ser menor al valor calculado de $t = 65.39$ y $p\text{-valor} = 2.2e-16$.

La correlación entre MSI – LST mostró un $r = 0.99$ siendo una correlación positiva muy alta, covariación $cov = 1.21$; aplicando la prueba de hipótesis t student correspondió ser menor al valor calculado $t = 30.39$ y $p\text{-valor} = 2.2e-16$ (figura 6); consiguientemente, se afirmó que sí existe correlación lineal estadística altamente significativa entre los índices de vegetación y la temperatura superficial terrestre.

Figura 6. Correlación entre LST – NDVI, NDWI, SAVI, MSI, promedio de las 9 imágenes satelitales clasificado en 20 Jenks Natural Breaks. Los valores digitales se encuentran entre los rangos mínimos y máximos respecto a los intervalos de los índices, como también el LST mínimo a máximo



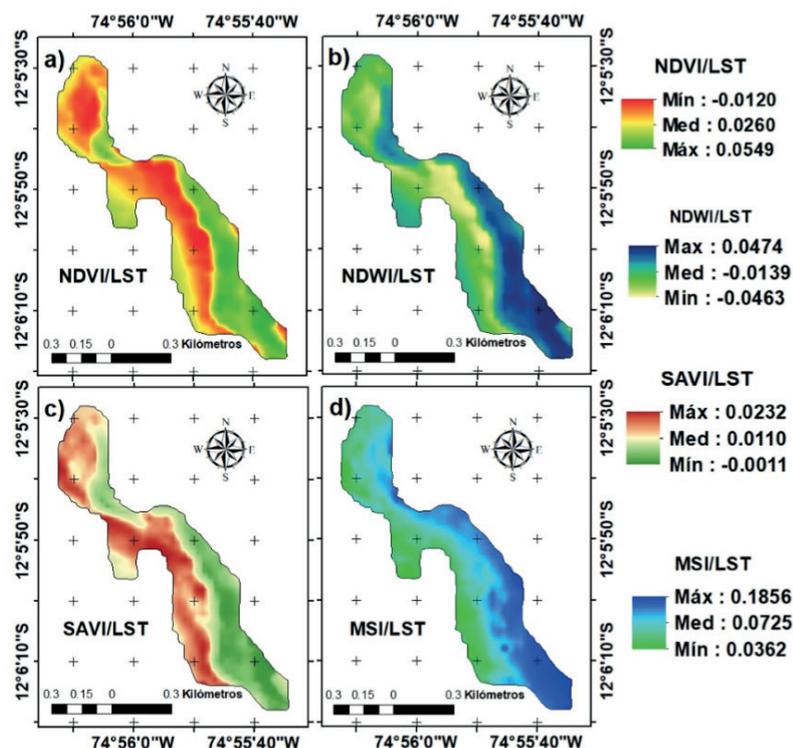
E. Índice Temperatura – Vegetación (TVX)

El efecto entre NDVI/LST determinó la influencia en el vigor de la biomasa fitosanitaria de la vegetación, aumentando en la orientación ESTE (-0.0778/0.0549) y disminuyendo en la orientación Oeste (0.6434/-0.0120) y creando un efecto de borde de (0.3541/0.0260), disminuyendo el estado fitosanitario del bosque.

Asimismo, en el efecto del NDWI/LST la temperatura influyó en el contenido de humedad o contenido de agua dentro del bosque, aumentó en la orientación Oeste (-0.6128/-0.0463), descendiendo en la orientación Este (0.3057/0.0474) y creando un efecto de borde (-0.2572/-0.0139), incrementando contenido de agua dentro del bosque.

Por otro lado, el efecto del SAVI/LST determinó la influencia de la temperatura sobre la cobertura de la vegetación respecto al suelo en la orientación Oeste (0.4089/0.0232); la cobertura vegetal aumentó, en la orientación Este (-0.0073/-0.0011) la cobertura disminuye, creando un efecto de borde mínimo (0.1685/0.0110). Y el efecto del MSI/LST influyó en el estrés hídrico o déficit hídrico, disminuyendo en ambas orientaciones Este (0.5565/0.1856), Oeste (1.3993/0.0362), como también en el efecto de borde (0.8315/0.0725); por lo tanto, afirmamos que la temperatura influye en el vigor de la biomasa fitosanidad, contenido de humedad o contenido de agua, la cobertura vegetal respecto al suelo y estrés o déficit hídrico a través del tiempo.

Figura 7. Influencia de LST durante los 9 meses del periodo 2018 - 2019; analizando los valores digitales maximos y minimos. Figura a) NDVI/LST aumentó la fitosanidad en ESTE descendiendo en OESTE; b) NDWI/LST aumentó el contenido de agua en Este y disminuyó en Oeste; c) SAVI/LST aumentó la erosion en Oeste y disminuyó en Este; y d) MSI/LST disminuyó el estrés hídrico en ambas orientaciones. Tamaño de pixel/celda es de 30x30m mejorado aplicando técnica de remuestreo de visualizacion interpolacion bilineal (proporcionando resultado de aspecto mas suavizado)



4. Discusión

La temperatura máxima que alcanzó este bosque es de 30.63°C, validando así la investigación de Hoch y Körner (2005) de que la temperatura de estos bosques no supera de los 30°C; y negando la investigación de Braun (1997) que afirma que la vegetación supera los 20°C; esto ocurre debido a que existe espacios abiertos dentro del bosques en la orientación Oeste, permitiendo el ingreso de la luz del sol reportándose pequeños arboles de *Polylepis*, por desaparecer y emerger; afirmando así investigaciones de Braun (1997), Campomanes (2017) y Pacheco et al. (2018)), que la densidad de los bosques de *Polylepis* está directamente relacionado con la altitud y orientaciones.

Durante los 9 meses el NDVI indicó un estado saludable la vegetación con valores mínimo y máximos (-0.0778 – 0.6434), afirmando la descripción de Silva Laurentino (2014) y Weng et al. (2004) indicando un buen estado de sanidad del bosque (Silva Laurentino, 2014). El valor de -0.0778 pudo haber ocurrido debido a fenómenos meteorológicos dentro del bosque ya que esos bosques se encuentran en contacto con nubosidades (Hoch y Körner, 2005); el valor digital máximo del NDVI superó las investigaciones realizadas por Braun (1997), Contreras (2019) y Pacheco et al. (2018). Asimismo, los bosques se encuentran asociados a musgos y epifitas impidiendo la actividad fotosintética de las plantas. Durante un determinado mes el valor digital mínimo del NDVI fue de -0.3220, indicando su estado enfermo, ya que existe actividades antropogénicas (como la quema y forestación) que interviene en el desarrollo de la planta o enfermedades transmitidas entre árbol a árbol, lo cual confirma las causas presentadas en investigaciones realizadas por Alshaikh (2015), Anbazhagan y Paramasivam (2016), Carvajal y Pabón (2014) y Hong et al. (2007). En otros lugares se ha observado que el valor mínimo es de -0.41 (Braun, 1997; Contreras, 2019), convirtiendo el bosque en un bajo estado fitosanitario, lo cual no ocurre precisamente en el bosque de *Polylepis* estudiado. El valor digital del NDWI mayor es 0.83179, indicando un alto contenido de agua sobre el bosque. Estos bosques requieren un buen nivel de humedad en el suelo (Almeida, 2015; Galvão et al., 2005), esto ocurre en la orientación Noreste, ya que la separación de árbol a árbol es menor a 5m almacenando mayor cantidad de agua (Kessler, 2006) convirtiéndolos en resistentes a las sequías.

Otras investigaciones (Carvajal y Pabón, 2014; Contreras, 2019; Hoch y Körner, 2005; Hong et al., 2007) reportaron un NDWI menor a 0.42, en el cual el bosque no contiene más humedad de agua relacionado con la vegetación; la densidad de los bosques ayuda a conservar el agua superficial del suelo. Esto no ocurrió en la orientación Suroeste por la baja densidad de estos bosques. El SAVI, idea de Huete (1988), ayudó a identificar el problema de la erosión del suelo dentro del bosque, reportando un valor máximo de 0.5037, aunque no identificó el porcentaje de área erosionada como menciona Jepsen et al. (2009).

Considerando la orientación del bosque respecto al sol, se observó que existe un tramo de erosión en la orientación Suroeste, afirmando así la investigación por Campomanes (2017), Dourojeanni (2008), Mejia Rios (2014), Pacheco et al. (2018) y Braun (1997), ya que esto no ocurre en la orientación Este, donde existe la mayor densidad del bosque de *Polylepis*. La ecuación propuesta por Hardisky et al. (1983) determinó con éxito el estrés del bosque, encontrándose valor máximos de 1.7320; también podemos mencionar que la humedad aprovechable del suelo está directamente relacionada por el estrés hídrico de la planta y su temperatura, como lo afirma Silva Laurentino (2014) ya que no presentó un estrés hídrico muy intenso; también se observó que la mayor cantidad de estrés ocurre en la orientación Suroeste, donde existe una

baja densidad de cobertura vegetal y el aumento de la temperatura, afirmando así su relación entre ambos (Hong et al., 2007); entonces, el estrés hídrico de la planta está relacionado con la orientación y densidad de vegetación.

La relación de la temperatura superficial terrestre y los 4 índices de vegetación está diferenciada por dos tipos de correlación: durante los 9 meses del periodo 2018 – 2019 y el promedio de las 9 imágenes satelitales clasificado en 20 valores naturales; existen distintas correlaciones entre el NDVI, NDWI, SAVI y MSI – LST ejecutado en distintos lugares donde la densidad y el tipo de bosque es diferente. No existen relaciones en bosques de un solo género, por ello existe variaciones de correlaciones. Analizando la correlación entre NDVI – LST realizadas por De Sousa y Júnior (2012) y Gonzaga (2014) se determinó correlaciones positivas $r = 0.328$ y $r = 0.74$, muy por encima y totalmente diferenciado de correlación negativa $r = -0.0507$ realizado en el bosque de *Polylepis*, similares y muy por encima realizado por Alshaikh (2015), Anbazhagan y Paramasivam (2016), Carvajal y Pabón (2014) y Orhan et al. (2014) con $r = -0.181$, $r = -0.72$, $r = -0.9$ y $r = -0.98 - 0.94$; el análisis de correlación realizado en el bosque de *Polylepis* y diferenciado por fuentes bibliográficas afirma que cada área geográfica, densidad, grado de cobertura y fenómenos ambientales determina el tipo de correlación, sea positivo o negativo; si es positivo quiere decir que a mayor temperatura obtendrá un vigor de la biomasa fitosanidad del bosque. Si la correlación es negativa sucederá lo contrario. Ocurre algo totalmente diferente con la correlación promedio de las 9 imágenes satelitales clasificado en 20 valores naturales, donde la correlación obtuvo un $r = 0.9959$ afirmando investigaciones realizadas por De Sousa y Júnior (2012), Gonzaga (2014). Estos valores naturales (Jenks) brindan un mejor distribución de los valores digitales del NDVI, creando así rango de clases entre mínimos y máximos; la correlación con los valores naturales de la temperatura determinarán una mejor correlación entre ambos conceptos, lo cual fue comprobado por investigadores como Alshaikh (2015) y Orhan et al. (2014). La diferencia de correlación entre NDWI – LST determinó un $r = -0.4325$ negativo en el bosque de *Polylepis* durante los 9 meses del periodo estudiando y totalmente diferente al promedio de las 9 imágenes satelitales clasificados en 20 valores, siendo casi similar a la investigación realizada por Carvajal y Pabón (2014) con un $r = -0.85$; se deduce que los valores naturales (Jenks) y durante un determinado tiempo la temperatura superficial influye en el contenido de humedad o contenido de agua en el suelo: a mayor temperatura el contenido de humedad en el bosque descenderá. En la relación entre SAVI – LST existen dos tipos de correlación: la positiva en el bosque de *Polylepis* durante los 9 meses del periodo con $r = 0.1288$, se puede decir que es similar a la investigación realizada por De Sousa y Júnior (2012) con $r = 0.27$, afirmando así que a mayor temperatura la cobertura vegetal interfiere a la erosión del suelo; todo lo opuesto ocurre con los valores naturales (Jenks), donde obtuvo una correlación negativa de $r = -0.9979$, siendo diferente a la correlación realizada por Gonzaga (2014) con $r = -0.342$, afirmando así que la temperatura superficial va aumentando a través del tiempo y que en la cobertura, suelo erosionado y densidad vegetal no existirá diferencia alguna. Esto pudo deberse a que este bosque no se encuentra en una intervención extrema o actividad antropogénica que altera el comportamiento y estado de la vegetación y que los bosques de *Polylepis* puede soportar el efecto de la temperatura y evitar la erosión del suelo. La correlación del MSI – LST que determina el estrés hídrico o déficit hídrico dentro del bosque ha sido influenciada por la temperatura; la relación entre ambos durante los 9 meses del periodo es un $r = 0.5551$ siendo diferente al promedio de las 9 imágenes clasificadas en 20 valores naturales (Jenks) donde se obtuvo un $r = 0.9903$; a medida que la temperatura aumenta o descienda el déficit o estrés hídrico lo hará de la misma manera; lo cual ocurre de manera to-

talmente diferente en la investigación de Gonzaga (2014) con un $r = -0.087$ negativo; entonces el comportamiento de un área vegetal es totalmente diferente a su género, cualquier intervención y situación geográfico. Así mismo, las correlaciones fueron afirmadas mediante hipótesis de correlación y test de student, encontrándose diferencias entre la correlación entre los 9 meses del periodo estudiado y promedio de las 9 imágenes satelitales, evidenciando respectivamente que no existe correlación alguna entre los 9 meses del periodo y sí existe correlación mediante los valores naturales; esto pudo suceder debido que hubo cambios en valores naturales a través del tiempo, y los valores digitales del bosque permanecieron constantes.

La ecuación TVX afirma la influencia del LST sobre los índices de vegetación; comparada con otras fuentes de investigación, la única investigación que se aplica a los bosques de *Polylepis* es la de Goward et al. (1994), quien propuso la ecuación para determinar la influencia de la temperatura sobre el NDVI siempre en cuando existe relación entre ambas; por lo tanto, podemos afirmar que la ecuación determinó que existió la influencia de la temperatura sobre el bosque de *Polylepis spp*, la cual se aplicó a los 4 índices, y se evidencia en las orientaciones dentro del bosque; NDVI reportó un descenso del estado fitosanitario en la orientación Oeste y aumentó un buen estado fitosanitario en la orientación Este, de la misma manera en el NDWI descendió el contenido de agua dentro del bosque en la orientación Este y aumentó en la orientación Oeste; por otra parte, el SAVI reportó un deterioro de la vegetación en la orientación Oeste y no hubo efecto del LST en la orientación Este; y, por último, en el MSI el estrés dentro del bosque disminuyó en un estado medio en ambas orientaciones; también se observó que la LST crea un efecto de borde dentro del bosque la cual está diferenciado por los valores digitales de los índices de vegetación entre la densidad máxima y mínima del bosque; por lo cual podemos afirmar que es el intermediario para estimar mejor el estado de la vegetación.

5. Conclusiones y recomendaciones

LST mínimo/máximo del bosque de *Polylepis spp* 2018 – 2019 es 5.93°C – 26.35°C.

Durante 2018 – 2019 el bosque se encuentra en un buen estado fitosanitario y vigor de biomasa (-0.0778 – 0.6434), contenido de humedad media-alta (-0.6128 – 0.3057), con cobertura respecto al suelo, de erosión media-alta (0.0073 – 0.4089), estrés o déficit hídrico media-alta (0.5565 – 1.3993), el bosque de *Polylepis* presenta diferentes tipos de valores digitales (de los índices de vegetación) debido a la orientación, distribución altitudinal, problemas atmosféricos/ecológicos, características edafológicas y asociaciones a otras plantas.

La correlación lineal de Karl Pearson durante los 9 meses del periodo 2018 y 2019 entre la temperatura superficial terrestre y los cuatro índices de vegetación presentó correlaciones medianamente bajas; el test de hipótesis t de student afirma que no existe correlación entre la temperatura y los índices de vegetación.

La correlación lineal promedio de las 9 imágenes satelitales clasificados en 20 Jenks Natural Breaks presentó correlación alta entre la temperatura y los cuatro índices de vegetación; el test de hipótesis t student determinó que sí existe relación lineal estadística alta entre los índices de vegetación y la temperatura superficial terrestre.

La ecuación TVX determinó la influencia del LST sobre los índices de vegetación, cambiando así su estado de vegetación en diferentes orientaciones como también crea un efecto de borde entre las zonas de mayor cobertura y menor densidad; diferenciando la sequía/efecto de la temperatura dentro del bosque de *Polylepis spp*.

Se recomienda utilizar imágenes satelitales sin defectos meteorológicos (0 % nubosidad) para obtener una mejor precisión y descripción de los valores digitales de los índices de vegetación, mejorando la calidad de la imagen y su respectivo procesamiento algebraico de bandas espectrales. Utilizar mayor cantidad de imágenes satelitales para obtener una mejor correlación y el test de hipótesis estadística durante diferentes meses. Aplicar todo tipo de índice de vegetación y correlacionar con la temperatura superficial terrestre para observar una mejor influencia de la temperatura sobre las coberturas vegetales y los estados de vegetación del bosque de *Polylepis*. Se recomienda utilizar los valores numéricos clasificados naturalmente (Jenks Natural Breaks) pues crea intervalos de clase basándose en su naturaleza numérica de valores digitales de cada índice de vegetación, el cual brinda una mejor correlación estadística, e interpretación de los valores naturales digitales de los índices de vegetación.

Bibliografía

- Almeida, A. (2015). *Procesamiento Digital De Imágenes Multiespectrales Landsat 8, Para Aplicaciones Agronómicas En La Subcuenca Del Río Guayllabamba* (Universidad Central del Ecuador). Obtenido de <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/6489/3/T-UCE-0004-17.pdf>
- Alshaiikh, A. (2015). Vegetation Cover Density and Land Surface Temperature Interrelationship Using Satellite Data, Case Study of Wadi Bisha, South KSA. *Advances in Remote Sensing*, 04(03), 248–262. <https://doi.org/10.4236/ars.2015.43020>
- Anandababu, D., Purushothaman, B. M., y Suresh Babu, S. (2018). Estimation of Land Surface Temperature using LANDSAT 8 Data. *International Journal of Advance Research*, 4(2), 177–186. Obtenido de www.IJARIIT.com
- Anbazhagan, S., y Paramasivam, C. R. (2016). Statistical Correlation between Land Surface Temperature (LST) and Vegetation Index (NDVI) using Multi-Temporal Landsat TM Data. *International Journal of Advanced Earth Science and Engineering*, 5(1), 333–346. <https://doi.org/10.23953/cloud.ijaese.204>
- Braun, G. (1997). The Use of Digital Methods in Assessing Forest Patterns in an Andean Environment: The Polylepis Example. *Mountain Research and Development*, 17(3), 253. <https://doi.org/10.2307/3673852>
- Bravo, F. (2017). *Teledetección espacial* (Primera Ed). Obtenido de https://acolita.com/wp-content/uploads/2018/01/Teledeteccion_espacial_ArcGeek.pdf
- Campomanes, Y. (2017). Escenario de distribución de los bosques de Polylepis al 2030 frente a los elementos climatológicos de Temperatura y Precipitación, en el distrito de Pomabamba -Ancash, utilizando Maxent y GIS, 2017. Universidad César Vallejo.
- Carnahan, W. H., y Larson, R. C. (1990). An analysis of an urban heat sink. *Remote Sensing of Environment*, 33(1), 65–71. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(90\)90056-R](https://doi.org/10.1016/0034-4257(90)90056-R)
- Carvajal, A. F., y Pabón, J. D. (2014). Temperatura de la superficie terrestre en diferentes tipos de cobertura de la Región Andina Colombiana. *Sociedade y Natureza*, 26(1), 95–112. <https://doi.org/10.1590/1982-451320140107>
- Contreras, O. (2019). *Identificación De La Especie Polylepis reticulata Mediante Teledetección En Las Zonas Alto Andinas Del Ecuador*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- De Sousa, S. B., y Júnior, L. G. F. (2012). Relação entre temperatura de superfície terrestre, índices espectrais e classes de cobertura da terra no município de Goiânia (GO). *RA'E GA - O Espaço Geográfico Em Análise*, 26(26), 75–99. <https://doi.org/10.5380/raega.v26i0.30151>
- Dourojeanni P. (2008). Distribución Y Conectividad De Bosques Alto Andinos (Polylepis) En La Cuenca Alta Del Río Pativilca (Pontificia Universidad Católica del Perú). Obtenido de <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/628>

- Fjeldsá, J. (1993). The avifauna of the polylepis woodlands of the Andean highlands: the efficiency of basing conservation priorities on patterns of endemism. *Bird Conservation International*, 3, 37–55.
- Galvão, L. S., Formaggio, A. R., y Tisot, D. A. (2005). Discrimination of sugarcane varieties in Southeastern Brazil with EO-1 Hyperion data. *Remote Sensing of Environment*, 94(4), 523–534. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.11.012>
- Gilabert, M. A., González-Piqueras, J., y García-Haro, J. (1997). Acerca de los índices de vegetación. *Revista de Teledetección*, Vol. 8(May 2014), 1–10. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/39195330_Acerca_de_los_indices_de_vegetacion
- Gonzaga, C. (2014). Aplicación de Índices de Vegetación Derivados de Imágenes Satelitales Landsat 7 ETM + y ASTER para la Caracterización de la Cobertura Vegetal en la Zona Centro de la Provincia De Loja, Ecuador. Universidad Nacional de La Plata.
- Gonzaga, C. (2015). Aplicación de índices de vegetación derivados de imágenes satelitales para análisis de coberturas vegetales en la provincia de Loja, Ecuador. *Cedemaz*, 5(1), 30–41. Obtenido de <http://revistas.unl.edu.ec/index.php/cedamaz/article/view/43/41>
- Goward, S. N., Waring, R. H., Dye, D. G., Yang, J., Applications, S. E., May, N., ... Waring, R. H. (1994). *Ecological Remote Sensing At Otter: Satellite Macroscale Observations* '. 4(2), 322–343. <https://doi.org/10.2307/1941937>
- Hardisky, M. A., Klemas, V., y Smart, R. M. (1983). The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral radiance of *Spartina alterniflora* canopies. *Photogrammetric Engineering y Remote Sensing*, 49(1), 77–83. Obtenido de https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1983journal/jan/1983_jan_77-83.pdf
- Hoch, G., y Körner, C. (2005). Growth, demography and carbon relations of *Polylepis* trees at the world's highest treeline. *Functional Ecology*, 19(6), 941–951. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2435.2005.01040.x>
- Hong, S., Lakshmi, V., y Small, E. E. (2007). Relationship between vegetation biophysical properties and surface temperature using multisensor satellite data. *Journal of Climate*, 20(22), 5593–5606. <https://doi.org/10.1175/2007JCLI1294.1>
- Huete, A. R. (1988). A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(2), 295–309. <https://doi.org/10.1006/geno.1994.1397>
- Ito, E., Lim, S., Pol, S., Tith, B., Pith, P., Khorn, S., ... Araki, M. (2007). Use of ASTER Optical Indices to Estimate Spatial Variation in Tropical Seasonal Forests on the West Bank of the Mekong River, Cambodia. *Forest Environments in the Mekong River Basin*, 232–240. https://doi.org/10.1007/978-4-431-46503-4_21
- Jepsen, J. U., Hagen, S. B., Høgda, K. A., Ims, R. A., Karlsen, S. R., Tømmervik, H., y Yoccoz, N. G. (2009). Monitoring the spatio-temporal dynamics of geometrid moth outbreaks in birch forest using MODIS-NDVI data. *Remote Sensing of Environment*, 113(9), 1939–1947. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.05.006>
- Kessler, M. (2006). Bosques de *Polylepis*. *Botánica Económica de Los Andes Centrales*, 110–120. Obtenido de http://www.beisa.dk/Publications/BEISA_Book_pdfer/Capitulo_07.pdf
- Mejía Ríos, A. A. (2014). *Metodología para la cartografía de bosques del género Polylepis, aplicando Geomática* (Universidad Nacional Agraria la Molina).
- Muñoz, P. (2013). Apuntes de Teledetección: Índices de vegetación. In *Centro de información de recursos Naturales* (Pimera Edi). [https://doi.org/http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/26389/Tema %20Indice %20de %20vegetaci %C3 %B3n %2C %20Pedro %20Mu %C3 %B1oz %20A.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://doi.org/http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/26389/Tema%20Indice%20de%20vegetaci%C3%B3n%20Pedro%20Mu%C3%B1oz%20A.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Orhan, O., Ekercin, S., y Dadaser-Celik, F. (2014). Use of Landsat land surface temperature and vegetation indices for monitoring drought in the Salt Lake Basin Area, Turkey. *The Scientific World Journal*, 2014(December), 13. <https://doi.org/10.1155/2014/142939>

- Pacheco, M., Franco, P., Cáceres, C., Navarro, M., y Jove, C. (2018). *Aplicación De Técnicas SIG Para La Cobertura Superficial Y Distribución Del Bosque De Polylepis En La Zona Andina De Moquegua 2018*. 17(2), 26–32. <https://doi.org/10.33326/26176033.2018.23.753>
- Rock, B. N., Vogelmann, J. E., Williams, D. L., Vogelmann, A. F., y Hoshizaki, T. (1986). Remote Detection of Forest Damage. *BioScience*, 36(7), 439–445. <https://doi.org/10.2307/1310339>
- Rouse, J. W., Hass, R. H., Schell, J. A., y Deering, D. W. (1973). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *Third Earth Resources Technology Satellite (ERTS) Symposium*, 1, 309–317. <https://doi.org/citeulike-article-id:12009708>
- Segovia-Salcedo, M., Domic, A., Boza, T., y Kessler, M. (2018). Situación taxonómica de las especies del género *Polylepis*. Implicancias para los estudios ecológicos, la conservación y la restauración de sus bosques. *Ecología Austral*, 28, 188–201. <https://doi.org/https://doi.org/10.25260/EA.18.28.1.1.527>
- Silva Laurentino, M. L. (2014). *Aplicaciones de la teledetección en el análisis de daños en masas de coníferas en la provincia de Burgos - España* (Universidad de Valladolid). Obtenido de <https://uvadoc.uva.es/bitstream/10324/6649/1/TFM-L187.pdf>
- Smith, M. J. de, Goodchild, M. F., y Longley, P. A. (2018). *Geospatial Analysis A Comprehensive Guide to Principles Techniques and Software Tools* (Sixth Edit). <https://doi.org/www.spatialanalysisonline.com>
- Speranza, F. C., y Zerda, H. R. (2002). *Potencialidad De Los Índices De Vegetación Para La Discriminación De Coberturas Forestales*. (1), 1–10. Obtenido de https://www.academia.edu/13450382/POTENCIALIDAD_DE_LOS_ÍNDICES_DE_VEGETACIÓN_PARA_LA_DISCRIMINACIÓN_DE_COBERTURAS_FORESTALES
- Stimson, H. C., Breshears, D. D., Ustin, S. L., y Kefauver, S. C. (2005). Spectral sensing of foliar water conditions in two co-occurring conifer species: *Pinus edulis* and *Juniperus monosperma*. *Remote Sensing of Environment*, 96(1), 108–118. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.12.007>
- USGS. (2019). LANDSAT 8 (L8) DATA USERS HANDBOOK. In USGS (Ed.), *Department of the Interior, U.S. Geological Survey* (Version 4., Vol. 4). Obtenido de https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/LSDS-1574_L8_Data_Users_Handbook_v4.0.pdf
- Weng, Q., Lu, D., y Schubring, J. (2004). Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, 89(4), 467–483. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.005>
- Zutta, B. R., Rundel, P. W., Saatchi, S., Casana, J. D., Gauthier, P., Soto, A., ... Buermann, W. (2012). Prediciendo la distribución de *Polylepis*: bosques Andinos vulnerables y cada vez más importantes. *Revista Peruana de Biología*, 19(2), 205–212. <https://doi.org/10.15381/rpb.v19i2.849>

Análisis termoenergético del sistema de generación de vapor de una central térmica de 49 MW

(Thermo-energetic analysis of the steam generation system in a 49 MW power plant)

Yoalbys Retirado Mediaceja¹, Héctor Luis Laurencio Alfonso², Andres A. Sánchez- Escalona³, Yanán Camaraza-Medina⁴, Marcelo Fabián Salazar Corrales⁵, Marbelis Lamorú Urgelles⁶, Ever Góngora Leyva⁶

Resumen

En el trabajo se realiza un análisis termoenergético integral del sistema de generación de vapor de una termoeléctrica de 49 MW, lo cual no ha sido estudiado con rigor desde el punto de vista energético. En un algoritmo se sintetiza la metodología para el cálculo de los rendimientos térmicos brutos y exergéticos de las calderas que lo integran, aspectos que no se han interrelacionado en estudios precedentes. Los resultados evidencian un elevado grado de aprovechamiento de la energía térmica y una baja capacidad de utilización de la exergía disponible en las instalaciones, provocados por el deterioro de algunos de sus parámetros de operación y por irreversibilidades inherentes al proceso de transformación del agua en vapor. Los rendimientos, térmico y exergético del sistema, ascendieron a 90.106 y 45.491 %, respectivamente. El algoritmo propuesto prevé el cálculo y la comparación de los parámetros termoenergéticos reales de las calderas con los nominales y las acciones científicas, y técnico-organizativas, a desarrollar para lograr rendimientos termoexergéticos superiores. Su implementación futura tendrá en cuenta el análisis de los rendimientos térmicos netos, los indicadores económico-ambientales y la optimización energético-operacional de las calderas.

Palabras clave

Calderas; eficiencia; térmico y exergético; algoritmo; generadores de vapor.

Abstract

In the work carries out a comprehensive thermo-energetic analysis of the steam generation system of a 49 MW thermal power plant, which has not been rigorously studied from an energy point of view. In a algorithm synthesizes the methodology for calculating the gross thermal and exergetic performances of the boilers that comprise it, aspects that have not been interrelated in previous studies. The results show a high degree the harnessing of thermal energy and a low capacity for using the exergy available in the facilities, caused by the deterioration of some of its operational parameters and by irreversibilities inherent in the process of transforming water into steam. The thermal and exergetic yields of the system amounted to 90.106 and 45.491%, respectively. The proposed algorithm foresees the calculation and the comparison of the real thermo-energetic parameters of the boilers with the nominal ones and the scientific and technical-organizational actions to develop out to achieve superior thermo-exergetic performances. Its future implementation will take into account the analysis of the net thermal yields, the economic-environmental indicators and the energy-operational optimization of the boilers.

Keywords

Boilers; efficiency; thermal and exergetic; algorithm; steam generators.

1 Universidad de Moa, Moa-Cuba (yretirado@ismm.edu.cu). <https://orcid.org/0000-0002-5098-5675>.
2 Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga-Ecuador (hector.laurencio@utc.edu.ec).
3 Empresa Moa Nickel S.A.- Pedro Sotto Alba, Moa-Cuba (aescalon@moanickel.com.cu).
4 Universidad de Matanzas, Matanzas-Cuba (yanan.camaraza@umcc.cu).
5 Universidad de las Fuerzas Armadas, Latacunga-Ecuador (mfsalazar@gespe.edu.ec).
6 Universidad de Moa, Moa-Cuba ({mlamoru, egongora}@ismm.edu.cu).

1. Introducción

Los generadores de vapor son instalaciones esenciales en el funcionamiento de prácticamente todas las empresas industriales. Por su importancia se consideran el corazón de toda industria moderna (Kitto y Stultz, 2015; Rubio, 2015). Estos equipos también se conocen comúnmente como calderas de vapor y se clasifican entre los intercambiadores de calor más difundidos y utilizados, de los encontrados en la técnica moderna (Camaraza, 2017). Su estudio, desde el punto de vista de la termotransferencia, resulta interesante porque en ellos se manifiestan todos los modos de transmisión del calor (Camaraza, 2018). Además, consumen gran cantidad de combustibles y contaminan el medio ambiente. Por ello se requiere explotarlos eficientemente (Buecker, 2012).

En las grandes empresas de la producción y los servicios, así como en las centrales termoeléctricas (CTE) las calderas juegan un rol más relevante (Martha de Souza, 2012), por su gran tamaño, productividad y consumos de portadores energéticos (agua, combustible y electricidad, entre otros). En ocasiones solo se dispone de un equipo, pero en la mayoría de los casos las instalaciones de calderas están dotadas de dos o más generadores de vapor. Esta realidad, casi generalizada, exige la operación eficiente de cada equipo y del sistema de generación de vapor (SGV) en su conjunto.

Las instalaciones investigadas en el presente trabajo (cuatro calderas) constituyen puestos clave en la gestión energética de la empresa donde están enclavadas. La entidad productiva no puede prescindir de estas, debido a que constituyen el SGV de la termoeléctrica convencional de 49 MW, que se requiere imprescindiblemente para garantizar la energía calorífica y una parte de la energía eléctrica que demanda el proceso productivo principal de la fábrica.

El análisis termoenergético de las calderas es una tarea compleja y laboriosa, debido a la gran cantidad de parámetros energéticos que caracterizan el funcionamiento de estos equipos y sus agregados. Sin embargo, resulta vital para diseñar estrategias que permitan la explotación eficiente de las instalaciones. En relación con lo anterior, un elemento importante a considerar en la operación eficiente y el análisis de los rendimientos térmicos y exergéticos de estos equipos lo constituye el agua de alimentación, su pureza y calidad (Borroto y Rubio, 2010), así como la resistencia por incrustaciones (Camaraza, 2020a), que influye en la operación del domo. Además, resultan relevantes el tipo de combustible y sus propiedades, el flujo de aire de combustión y su temperatura, entre otros parámetros.

En la literatura científica se reportan importantes estudios relacionados con el análisis termoenergético de calderas. En estos se aplican los métodos, directo e indirecto, de balance térmico y la modelación matemática para el cálculo del rendimiento (Patro, 2015; Harish y Baldi, 2018; Cortés, Cornes, Alomá y González, 2019), y se implementa la simulación computacional y la optimización para la evaluación energética y la selección de calderas industriales (Flynn, 2013; Hasnain et al., 2020). Asimismo, se reportan trabajos orientados a incrementar la eficiencia energética de las instalaciones mediante: el desarrollo de métodos de diagnóstico de fallos más eficientes (Rodríguez-Ramos y Llanes-Santiago, 2014), la implementación de un sistema para el control de la calidad de los gases de combustión (Pérez, Cordovés y Terán, 2016), y la optimización aplicando un sistema de gestión de energía basado en la norma ISO 50001 (Valencia, Piero y Campos, 2019).

Relacionado con el balance exergético, Jiménez, Jarquin, Durán y García (2011) analizan una caldera de 350 MW, operando a diferentes cargas (100; 75; 50 y 25 %). Para ello realizaron

un modelo considerando el equipo como un volumen de control y demostraron que la generación de irreversibilidades se maximiza cuando la caldera trabaja a cargas menores (50 y 25 %). Krasniqi-Alidema, Filkoski y Krasniqi (2018) desarrollan un modelo de optimización para determinar la disipación de exergía en los componentes de una CTE de 315 MW, concluyendo que la mayor destrucción de exergía ocurre en la caldera, debido a irreversibilidades de los procesos de combustión y transferencia de calor entre los gases y la mezcla agua-vapor. A estos aspectos también se han referido otros autores (Jiménez, Madrigal, Lapido y Vidal, 2016; Velázquez, Corrales y Pérez, 2019).

Como se aprecia, existen varias publicaciones que abordan aspectos específicos relacionados con el análisis termoenergético de los generadores de vapor que operan en el sector industrial y las CTE. Sin embargo, los estudios previos consultados no establecen un algoritmo que integre las metodologías establecidas para el balance termoexergético de estas instalaciones. En general, se limitan a la exposición y aplicación de las ecuaciones propuestas para el cálculo de los rendimientos, térmico y exergético, de las calderas. En la presente investigación resulta novedoso la sistematización de los procedimientos establecidos en trabajos precedentes y su integración en un algoritmo, en el cual se establece la secuencia de pasos a seguir y los parámetros que se requieren para la evaluación térmica (por los métodos directo e indirecto), y exergética, de los generadores de vapor estudiados y otros de similares características.

Teniendo en cuenta los aspectos anteriores, se plantea como objetivo del presente trabajo realizar el análisis termoenergético del sistema de generación de vapor investigado, para las condiciones actuales de explotación. Y sus aportes más significativos se sintetizan en el algoritmo que sistematiza la metodología establecida para el balance térmico y exergético de calderas de vapor convencionales (acuotubulares y pirotubulares); la determinación de los principales parámetros termoenergéticos de las instalaciones; y las acciones científicas y técnico-organizativas que contribuyen a incrementar los rendimientos térmicos y exergéticos de las calderas.

En las secciones restantes del trabajo se exponen los métodos de balance térmico y exergético, el algoritmo mediante el cual se sistematiza la metodología establecida y los datos experimentales usados en la evaluación termoenergética de las calderas y el sistema de generación de vapor. Luego, se discuten los resultados obtenidos en los balances (térmico y exergético) realizados, se arriba a conclusiones sobre los aspectos más relevantes abordados y se expone sobre las líneas futuras de investigación.

2. Materiales y métodos

La evaluación termoenergética del SGV tiene en cuenta los procedimientos establecidos para balance térmico, métodos directo e indirecto, y exergético, de las calderas que lo integran (Jiménez et al., 2016; Pérez-Sánchez, Fernández y González, 2017). También considera diversos aspectos teóricos relevantes para este análisis (Annaratone, 2019). Su adecuación a las instalaciones estudiadas se expone a continuación.

2.1. Balance térmico: métodos directo e indirecto

El método directo consiste en medir un grupo de parámetros de operación directamente en las calderas y con ellos determinar la eficiencia térmica bruta de las instalaciones, mediante la ecuación 3 de la figura 1 (Ganapathy, 2013; Rastogi, Sharma y Gupta, 2018).

El calor útil ($Q_{\text{útil}}$) se calcula por la ecuación 1 de la figura 1, considerando que en las calderas solo se produce vapor sobrecalentado. Para el calor disponible (Q_d), se calcula el valor calórico inferior del combustible (Q_b), mediante la fórmula de Mendeleev (Rubio, 2015). La misma posibilidad determina la exergía química del combustible, como una función de su composición química elemental (Peduzzi, Boissonnet y Maréchal, 2016).

Por su parte, en el método indirecto se determinan las pérdidas de calor presentes en las calderas y con estas se calcula la eficiencia térmica bruta de las instalaciones, a través de las ecuaciones 4 y 5 de la figura 1 (Valles, Acosta y Pérez, 2014; Rubio, 2015).

La pérdida de calor con los gases de salida (q_2), por incombustión química (q_3), por incombustión mecánica (q_4), por transferencia térmica al medio ambiente (q_5), con los residuos extraídos del horno (q_6) y con las extracciones o purgas (q_7), se calculan usando las ecuaciones propuestas por Rubio (2015). En los análisis se consideran despreciables las pérdidas por incombustión mecánica y con los residuos extraídos del horno ($q_4 \gg q_6 \gg 0$), por no tener significación práctica cuando se quema combustible líquido en las calderas.

Los flujos de aire y gases trasegados por el ventilador de tiro forzado (VTF) y el ventilador de tiro inducido (VTI) se calculan con las ecuaciones 8 y 9 (Pankratov, 1987).

$$Q_a = \beta_1 \cdot B \cdot V_a^o \cdot \alpha_h \cdot \left(\frac{T_{af} + 273,15}{273,15} \right) \cdot \frac{1,01 \cdot 10^5}{h_b} \quad (8)$$

$$Q_g = \beta_1 \cdot B \cdot [V_g^o + (\alpha_{as} - 1) \cdot V_a^o] \cdot \left(\frac{T_g + 273,15}{273,15} \right) \cdot \frac{1,01 \cdot 10^5}{h_b} \quad (9)$$

Donde: Q_a y Q_g - flujos de aire y de gases trasegados por el VTF y el VTI, m³/s; β_1 - coeficiente de reserva de la alimentación ($\beta_1 = 1.05$ para $D_{\text{vsc}} > 5.6$ kg/s), adimensional; B - flujo de combustible quemado, kg/s; V_a^o - volumen de aire teórico seco, m³N/kg; α_h y α_{as} - coeficientes de exceso de aire en el hogar y antes del VTF, adimensional; T_{af} - temperatura del aire frío que entra al VTF, °C; h_b - presión barométrica del aire, Pa; V_g^o - volumen total teórico de gases, m³N/kg; T_g - temperatura de los gases antes del VTI, °C.

2.2. Método exergético

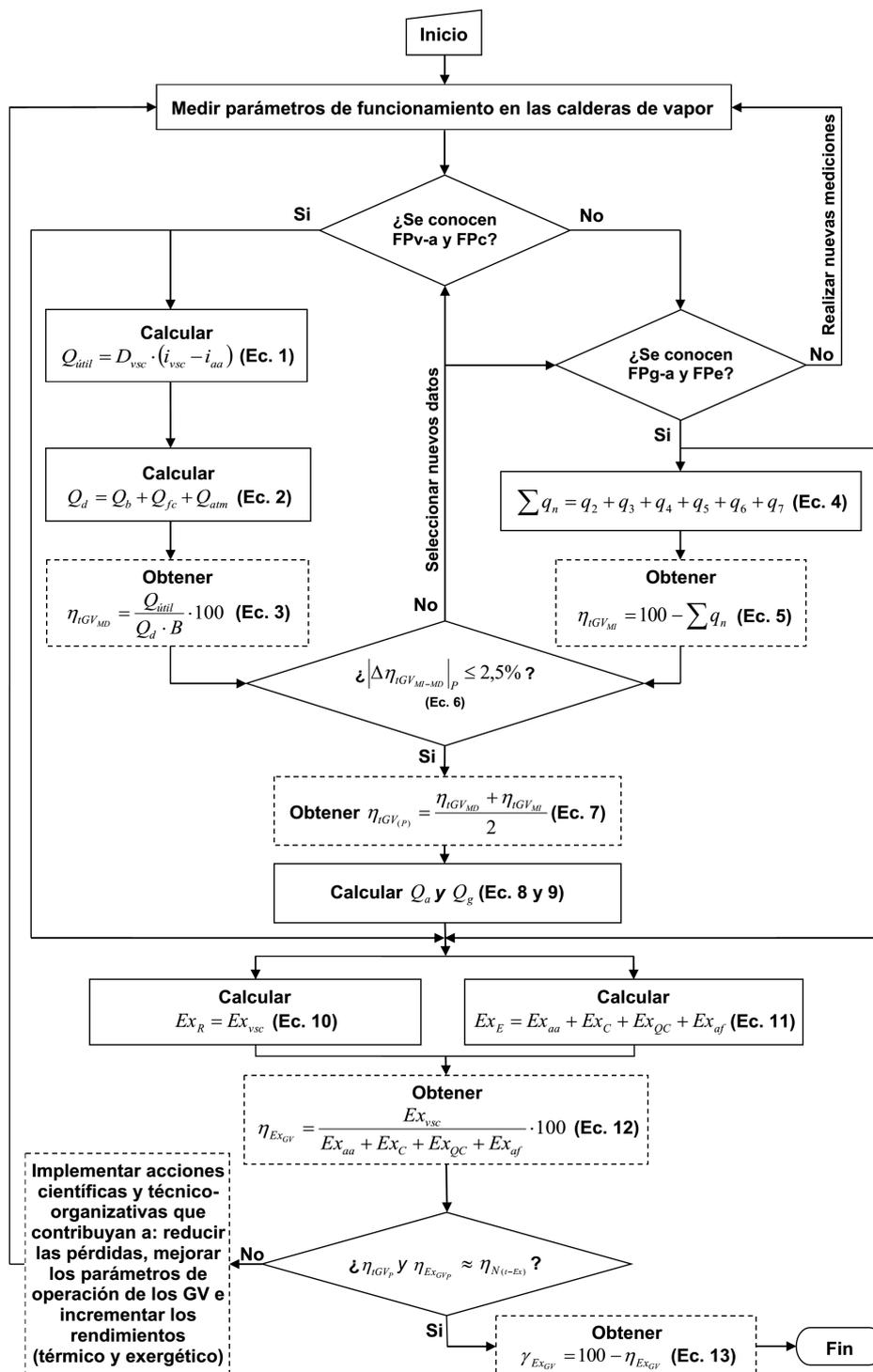
La exergía es el trabajo útil máximo que puede obtenerse de un sistema en un estado y ambiente determinados (Çengel y Boles, 2014; Bluestein, 2020). En la evaluación cuantitativa del grado de perfección o de irreversibilidad de un proceso, equipo o instalación se utiliza el concepto de rendimiento exergético. Su definición general más aceptada es la representada a través de la ecuación 12 de la figura 1 (Arshad et al., 2019; Tozlu, Büyükmurat y Özahi, 2020). Asimismo, la exergía perdida puede expresarse mediante el grado de pérdida, según la ecuación 13 de la figura 1.

En las calderas estudiadas, la exergía recuperada es la del vapor sobrecalentado (Ex_{vsc}) y la exergía empleada es la suma de las exergías del agua de alimentación (Ex_{aa}), el combustible (Ex_c), el calor de combustión (Ex_{qc}) y el aire frío (Ex_{af}), estas se calculan por las ecuaciones propuestas por Agung et al. (2017) y Javadi et al. (2019).

Los métodos de cálculo generales establecidos en la literatura para la evaluación térmica y exergética de calderas de vapor y el procedimiento específico expuesto, para las calderas investigadas, se sintetizan y sistematizan en el algoritmo de la figura 1, el cual constituye el apor-

te fundamental del presente trabajo. El mismo prevé el cálculo de los parámetros termoenergéticos fundamentales de las instalaciones y las acciones a implementar para lograr rendimientos térmicos y exergéticos superiores.

Figura 1. Algoritmo para la sistematización de la metodología del balance termoexergético



Leyenda para la figura 1: *FPv-a* (Flujos y propiedades termodinámicas del vapor sobrecalentado, el vapor de atomización y el agua de alimentación); *FPc* (Flujo y propiedades del combustible, incluye la composición química); *FPg-a* (Flujos, composición química y propiedades de los gases y el aire); *FPe* (Flujo y propiedades termodinámicas de las extracciones o purgas) y $\eta_{N(t-Ex)}$ (Rendimiento térmico o exergético establecido para las condiciones nominales de operación).

Parámetros de las ecuaciones de la figura 1: $Q_{\text{útil}}$ - calor útil, kJ/h; D_{vsc} - flujo de vapor sobrecalentado, kg/h; i_{vsc} - entalpía del vapor sobrecalentado, kJ/kg; i_{aa} - entalpía del agua de alimentación, kJ/kg; Q_{d} - calor disponible, kJ/kg; Q_{b} - poder calórico inferior del combustible, kJ/kg; Q_{fc} - calor físico del combustible, kJ/kg; Q_{atm} - calor que aporta el vapor de atomización, kJ/kg; η_{tGVMD} - rendimiento térmico bruto de la caldera (obtenido por el método directo), %; B - consumo de combustible (se mide); kg/h; $\hat{a}q_n$ - sumatoria de las pérdidas de calor, %; η_{tGVMI} - rendimiento térmico bruto de la caldera (obtenido por el método indirecto), %; $|\eta_{\text{tGVMD-MI}}|$ - valor absoluto de la diferencia entre los valores de rendimiento térmico bruto obtenidos por los métodos directo e indirecto, %. $\eta_{\text{tGV(P)}}$ - rendimiento térmico bruto promedio, %; Ex_R y Ex_E - exergías recuperada y empleada, J/s; η_{ExGV} - rendimiento exergético del generador de vapor, %; Ex_{vsc} , Ex_{aa} , Ex_C , Ex_{QC} , Ex_{af} - exergías del vapor sobrecalentado, el agua de alimentación, el combustible, el calor de combustión y el aire frío, kJ/s; Ex_{GV} - grado de pérdida de exergía en la caldera, %.

2.3. Características de la CTE y sus áreas principales

La CTE es la encargada de producir y distribuir los portadores energéticos necesarios para el proceso tecnológico. Tiene como equipos fundamentales siete calderas, dos de 150 t/h y cinco de 75 t/h, todas están diseñadas para producir vapor sobrecalentado a 39 atm y 440 °C. Además, consta con tres turbinas de vapor, dos de 12 MW y una 25 MW (49 MW total). En la actualidad la CTE se opera con un generador de vapor de 150 t/h (GV-6) y tres de 75 t/h (GV-2; G-4 y GV-5). Además, se emplean dos turbinas, una de 12 MW y la de 25 MW. Los restantes equipos no utilizados (tres calderas y una turbina) se tienen de reserva para garantizar la permanente disponibilidad de las plantas de generación térmica y eléctrica. Las áreas fundamentales que integran la planta termoenergética son: base de petróleo, tratamiento químico de agua, calderas, turbinas y torres de enfriamiento. Las áreas de mayor influencia en el proceso de producción de vapor se describen a continuación; las restantes se detallan en la bibliografía consultada (Labañino, 2015).

2.3.1. ÁREA DE TRATAMIENTO QUÍMICO DEL AGUA

Está formada por tres instalaciones tecnológicas: suavizamiento, desmineralización y neutralización. El agua inicial es potable y proviene de la planta potabilizadora de la comunidad, la cual llega por dos tuberías de diámetro de 300 mm. Se somete a un proceso químico en la referida planta para eliminar las impurezas en suspensión y coloides, evitando la contaminación de las resinas en la planta, la formación de incrustaciones y las causas que atentan contra la calidad del vapor producido en la CTE. A las calderas se debe alimentar agua con las siguientes especificaciones de calidad: temperatura (145 °C) contenido de SiO_2 (0.02 mg/l), dureza (5 $\mu\text{mol/l}$ máx.), pH (9.0), conductividad eléctrica específica (0.20 $\mu\text{S/cm}$ máx.), contenido de O_2 (0.02 mg/l máx.), oxidabilidad como KMnO_4 (3.0 mg/l) y contenido del aceite (0.5 mg/l). A la fecha, estos estándares de calidad se garantizan con estabilidad porque de lo contrario no será posible emplearla para el enfriamiento de vapor en el atemperador de las calderas.

2.3.2. ÁREA DE CALDERAS DE VAPOR

Debe garantizar el flujo de vapor estable al proceso productivo, con los parámetros adecuados de presión y temperatura, así como el flujo de gases producto de la combustión para la carbonatación en la planta de recuperación de amoníaco de la empresa. Las características técnicas de las calderas que se operan en la CTE y del combustible que se debe utilizar se exponen a continuación.

Características técnicas de las calderas		
País y año de fabricación	República Eslovaca (2007)	*URSS (1986)
Cantidad instalada (y en operación)	2 (1)	5 (3)
Parámetros nominales de diseño		
Producción de vapor	150 t/h	75 t/h
Presión del vapor sobrecalentado	39 atm	39 atm
Temperatura del vapor sobrecalentado	440 °C ± 8 °C	440 °C ± 8 °C
Temperatura de agua de alimentación	145 °C	145 °C
Eficiencia térmica bruta	92-93%	90-91%
*Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas		

Las calderas deben operar con el combustible petróleo crudo cubano 1400, con las siguientes especificaciones técnica de calidad: viscosidad a 50 °C (859-1484 cSt), viscosidad a 80 °C (133-213 cSt), peso específico a 15.5 °C (0,9881-0.9994 kg/dm³), punto de inflamación en el recipiente abierto (40 °C), carbón conradson (10.55-13.34 %), ceniza (0.044-0.076%), agua (1.6-2.0%), azufre (6.33-8.0%), vanadio (64-86 ppm), níquel (30-48 ppm), sales (310-462 ppm), asfaltenos (17.3-19.75%), hidrógeno (9.64-10.27%), carbono (79.70- 80.95%) y potencia calorífica inferior (9200-9208 kcal/kg). Además, la temperatura de bombeo tiene que estar en el rango de 50 a 75 °C.

2.3.3. ÁREA DE TURBINAS DE VAPOR

Está equipada con tres turbinas a condensación con extracciones reguladas para el proceso (a 10.5 y 2.0 bar), así como una extracción no regulada para el calentamiento del agua de alimentación a las calderas. Sus características se exponen a continuación.

Características técnicas		
País y año de fabricación	República Eslovaca (2015)	*URSS (1986)
Cantidad instalada (y en operación)	1 (1)	2 (1)
Parámetros nominales de diseño		
Identificación	Skoda KP-25-3.5	PR-12/12-3.5/1/0.2
Potencia	25 MW	12 MW
Consumo máximo de vapor	188 t/h	110 t/h
Presión del vapor	35 atm	35 atm
Temperatura del vapor	435 °C	435 °C
Número de revoluciones	3600 rpm	3600 rpm

2.3.4. PRINCIPALES PROBLEMAS EXISTENTES EN LA CTE

A partir del diagnóstico energético realizado en la planta termoeléctrica se corroboró que en la misma existen los siguientes problemas no resueltos:

- **Trabajo por tiempo prolongado de las calderas en condiciones de explotación que difieren significativamente de las de diseño:** operación a cargas parciales pequeñas que fluctúan constantemente; reducción de la calidad del vapor producido, respecto a la nominal, insuficiente calentamiento del agua suministrada al domo de las calderas; cambio de combustible sin realizar las modificaciones necesarias a los quemadores e insuficiente mantenimiento, entre otros.
- **Frecuentes salidas de servicio** debido a: sub y sobre nivel de agua en el domo, insuficiente temperatura del petróleo alimentado a las calderas, alta presión en el horno, ponches en los economizadores y fallos en equipos auxiliares.
- **Irreversibilidades típicas de los procesos de combustión, transferencia de calor y de transformación del agua en vapor,** debido a la notable diferencia de temperatura que existe entre la sustancia de trabajo y los gases de la combustión, la cual se ha acentuado por deficiencias en la operación de los economizadores.
- **No implementación de acciones científicas y técnico-organizativas en la planta térmica,** que contribuyan a reducir las pérdidas de calor y elevar los rendimientos térmicos y exergéticos de las instalaciones objeto de estudio.

2.4. Parámetros de funcionamiento de las calderas

Debido al régimen de producción continuo de las instalaciones estudiadas se aplicó un experimento pasivo. Este consiste en la observación y registro de las variables de entrada y salida del proceso en el régimen normal de trabajo del objeto investigado, sin la manipulación de las variables por parte del investigador. En su lugar, el control se ejerce sobre los niveles de los parámetros estudiados (Edmonds y Kennedy, 2017).

Durante seis semanas se tomaron 24 mediciones diarias (cada una hora) de los parámetros de operación de las calderas estudiadas en la CTE (2; 4; 5 y 6) y se determinó el valor promedio por semana, el cual corresponde a cada una de las variantes analizadas (V-1, ..., V-6). Por razón de espacio solo se exponen los datos seleccionados de la caldera 5, ver Tablas 1 y 2. Se escoge esta instalación por tener el mejor desempeño exergético.

Tabla 1. Principales parámetros de funcionamiento medidos en las calderas seleccionadas¹

Parámetros de la Caldera 5	Variantes consideradas (valores promedios)						Unidades
	V-1	V-2	V-3	V-4	V-5	V-6	
D_{vsc}	46.0	41.1	38.7	39.7	43.3	40.0	t/h
P_{vsc}	3.80	3.72	3.68	3.65	3.65	3.66	MPa
P_D	3.90	3.90	3.99	3.87	4.00	3.89	MPa
T_{vsc}	431.4	312.3	428.8	440.0	440.0	437.2	°C
t_{aa}	138.7	142.4	142.7	131.5	143.0	142.3	°C
T_{gsc}	176.6	180.3	181.9	211.0	179.3	198.5	°C
t_c	134.6	136.2	139.6	138.3	142.0	142.0	°C
B	3.6	3.2	3.0	3.2	3.4	3.2	t/h

Nota: en la evaluación de las calderas también se consideró el vapor de atomización.

Instrumentos utilizados para la medición de los parámetros de operación seleccionados (están conectados y controlados mediante el sistema SCADA):

- Flujo de vapor y agua (D_{vsc} y D_{aa}): Transmisor diferencial de presión (0-100 kPa), salida 4-20 mA. Modelo EJA110A-EHS5A-64NC Tag. 6LBA01F1 (Rango 0-180 t/h)
- Presión del vapor y el domo (P_{vsc} y P_D): Transmisor de presión relativa, salida 4-20 mA. Modelo EJA430A-EBS5A-64NC. Tag- 6LBA01P1 (Rango 0-6 MPa).
- Temperatura del vapor y el agua (T_{vsc} y t_{aa}): Convertidor térmico con termopar 1xNiCr-Ni "K" EL= 2400 mm, D = 6 mm, transmisor programable, salida 4-20 mA. Modelo dTANS T01, número 956550/999-888-888 (Rango 0-600 °C).
- Temperatura de los gases y el aire (T_{gsc} y $T_{aa} = 30-33$ °C): Convertidor térmico PT100 simple en barra, D = 15mm, salida 4-20 mA. Modelo dTANS T01 (Rango 0-300 °C).
- Flujo de combustible (B): Transmisor de peso flujómetro. Alimentación 230 V AC, salida 4-20 mA. Tag 6HJF10F1 (Rango 0-15000 kg/h).

1. **Leyenda:** P_{vsc} y T_{vsc} (Presión y temperatura del vapor sobrecalentado); P_D (Presión en el domo); t_{aa} , T_{gsc} y t_c (Temperatura del agua de alimentación, de los gases y del combustible).

La composición química del petróleo, en masa principal, se obtuvo en el laboratorio especializado de la empresa. Los análisis químicos se desarrollaron por métodos ASTM (American Society for Testing and Materials) estandarizados, ver tabla 2. Las calderas quemaron el mismo tipo de combustible (petróleo crudo cubano, de alto contenido de azufre), debido a que el tanque de almacenamiento y la tubería de suministro son comunes para todas. Además, se midió la composición química de los gases producto de la combustión, para ello se emplearon los instrumentos que se exponen en la siguiente tabla.

Tabla 2. Valores promedios de la composición química del combustible y de los gases

Variantes analizadas	Combustible, petróleo crudo (%)						Gases de la combustión (%)		
	C ^t	H ^t	O ^t	S ^t	N ^t	W ^t	CO ₂	O ₂	CO
V-1	84.10	7.73	0.6	6.52	0.2	0.8	15.9	2.8	0.17
V-2	83.91	7.71	0.6	6.48	0.2	0.8	15.1	2.6	0.17
V-3	83.51	7.69	0.7	6.47	0.2	0.8	15.8	2.9	0.19
V-4	83.67	7.68	0.6	6.51	0.2	0.8	15.7	2.4	0.14
V-5	83.95	7.59	0.7	6.49	0.2	0.8	15.1	2.5	0.11
V-6	83.66	7.61	0.6	6.43	0.2	0.8	15.4	2.6	0.16

Métodos de ensayo aplicados para el análisis del combustible (parámetro determinado):

NC ASTM D-95 (Agua); ASTM D-129 (Azufre) y ASTM D-4698 ($Q_b = 9\ 200-9\ 300$ kcal/kg).

Instrumentos utilizados para la medición de la composición química de los gases:

Analizadores de gas continuos ULTRAMAT 23 (se usan dos y se toma el valor promedio), alimentación 230 V CA, salida 4-20 mA. Modelo 7MB2335-2CP10-3AA1-Z-A31 (Rangos: CO, 0-250 mg/m³; NO, 0-250 mg/m³; SO₂, 0-400 mg/m³; O₂, 0-25%; CO₂, 0-50%).

En el balance termoexergético de las calderas se usó el software Mathcad15 y la aplicación informática "SteamTable" para calcular las entalpías y entropías del agua y el vapor. Las entalpías de los gases de la combustión se obtuvieron según Pankratov, 1987.

3. Resultados y discusión

Los valores de los parámetros fundamentales de las calderas y el SGV, obtenidos en la evaluación termoexérgica, se exponen de forma resumida en la tabla 3 y la figura 2. Los rendimientos térmicos (89.717; 90.979 y 90.602%) y exérgicos (45.885; 45.926 y 46.076%) obtenidos para las calderas 2; 4 y 5 son semejantes, la oscilación fue de 1.262 y 0.586%. Estos, analizados integralmente, permiten corroborar que los generadores de vapor tienen adecuados rendimientos térmicos, a pesar de tener 34 años de explotación y en la actualidad trabajar solo en determinadas épocas del año. Su puesta en marcha depende de las exigencias del proceso productivo de la empresa y de la no disponibilidad del GV-7, el cual tienen características técnicas similares al GV-6.

En el caso de la caldera 6, los resultados evidencian un deterioro más pronunciado de sus parámetros de funcionamiento. La producción de vapor, su presión y temperatura fueron inferiores en 37.1 t/h; 0.386 MPa y 0.483 °C, respecto a los nominales (150 t/h; 3.92 MPa y 440 °C). Lo anterior, unido a la influencia de otras variables del proceso, limita la cantidad y calidad del vapor entregado a las turbinas e influye en los rendimientos, térmico y exérgico, de la CTE y la instalación productora de vapor, los cuales en esta última ascendieron a 89.125 y 45.099 %. Ambos son inferiores (en 2.809 y 2.531 %) a los calculados para esta caldera (91.934 y 47.630 %), en condiciones muy similares a las de diseño (149.8 t/h; 3.93 MPa y 440.3 °C). En estos resultados incidió el tiempo de servicio de la caldera, puestas en marcha desde el año 2007.

Los rendimientos exérgicos de las calderas son bajos, oscilan entre el 45.099 y el 46.076%. No obstante, se corresponden con los resultados esperados para estos tipos de generadores de vapor cuando se explotan a cargas parciales, sin calentamiento del aire de combustión y se obtiene vapor con una calidad (presión y temperatura) inferior a la nominal (Labañino, 2015). El valor de la exérgia del vapor, que corresponde a la exérgia recuperada (Ex_R) en las instalaciones, se contrajo desde los valores nominales de 24.87 MJ/s (para las calderas 2; 4 y 5) y 49.75 MJ/s (para el GV-6) hasta los referenciados en la Tabla 3.

Tabla 3. Rendimiento térmico, exérgico y grado de pérdida de exérgia.

Parámetros	GV-2	GV-4	GV-5	GV-6	Unidades
$(\eta_{tGVMD} + \eta_{tGVMI})/2$	89.717	90.979	90.602	89.125	%
$Ex_{vsc} \approx Ex_R$	17.55	16.95	13.62	37.04	MJ/s
Ex_g	7.925	5.778	4.385	23.218	MJ/s
Ex_g / Ex_E	20.541	15.641	14.834	28.269	%
Ex_E	38.58	36.94	29.56	82.13	MJ/s
$\eta_{Ex(GV)}$	45.490	45.885	46.076	45.099	%
$\gamma_{Ex(GV)}$	54.510	54.115	53.924	54.901	%

Como se aprecia en la figura 2, el combustible y el aire frío no aportan grandes cantidades de exérgia a las calderas, sus valores promedios para el SGV ascienden a 418 y 763 kJ/s. Sin embargo, es importante considerarlos en la determinación de la exérgia empleada porque eleva la precisión en el cálculo exérgico y el rigor en el análisis.

En la pérdida de exergía impactan significativamente los gases, debido a sus flujos y temperaturas a la salida de los generadores de vapor. Su exergía en las calderas 2; 4; 5 y 6 representan el 20.541; 15.641; 14.834 y 28.269 % de la exergía empleada promedio (de las seis variantes calculadas) en cada una de las instalaciones. Y en SGV constituye el 22.064 y 40.478 % de las exergías empleada y perdida, respectivamente. Las extracciones o purgas realizadas en el domo no tienen gran influencia en el parámetro considerado; su valor de exergía para el sistema apenas alcanza los 113.8 kJ/s, ver figura 2.

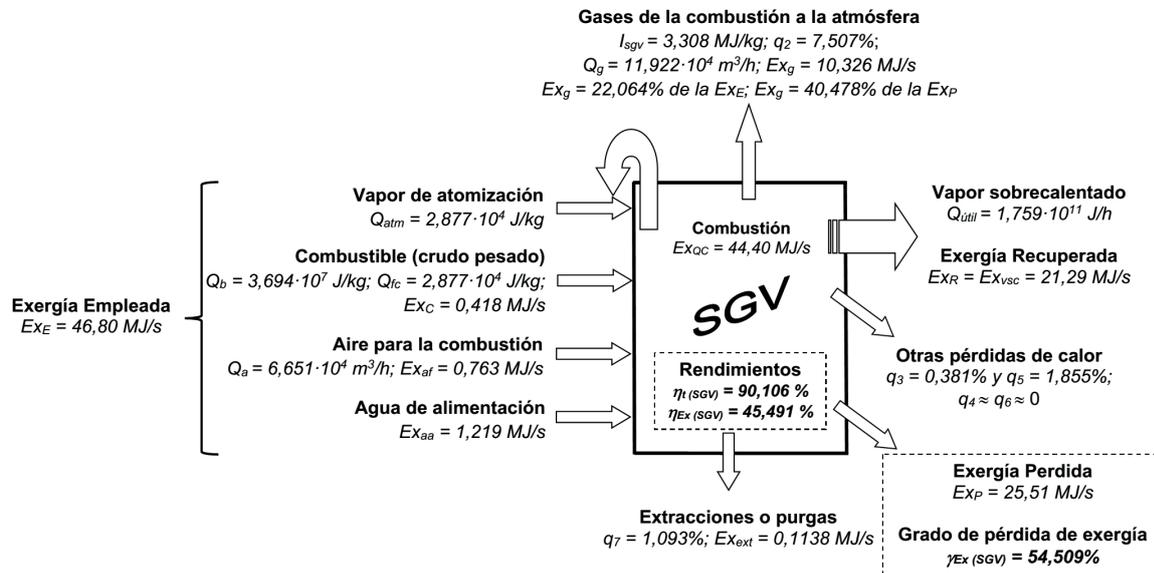
Al analizar de manera conjunta los resultados obtenidos, se infiere que las calderas 4 y 5 son las más eficientes desde el punto de vista térmico y exergético, por ese orden, mientras que el GV-6, a pesar de ser más moderno, tiene rendimientos térmicos y exergéticos más bajos. Esto puede estar asociado al cambio de combustible respecto al previsto en su diseño (sin la debida modificación de los quemadores) y a los problemas que ha presentado en la cámara de combustión y el horno (suciedad en las superficies de transferencia de calor, corrosión y deterioro de los tubos de agua en los economizadores, entre otros), que han limitado el aprovechamiento del calor en el hogar y otras zonas de intercambio térmico, provocando que la temperatura de los gases a la salida sea 102.63 y 115.63 °C más alta que los valores preestablecidos (188 y 175 °C) para las cargas nominal (150 t/h) y parcial de 120 t/h ($0.8 \cdot D_N$). Para la carga real actual de la caldera (112,9 t/h, el $0.75 \cdot D_N$) la temperatura de los gases debería ser inferior a 175 °C y superior a 162 °C (este último es el valor límite para $0.5 \cdot D_N$) y su valor promedio fue de 290.63 °C.

En general, en el SGV existe un alto grado de aprovechamiento de la energía térmica disponible. Los rendimientos térmicos brutos obtenidos por los métodos directo e indirecto alcanzan el 91.047 y 89.164 %, respectivamente. Y su valor promedio fue de 90.106 %. Sin embargo, su rendimiento exergético fue 45.491 %, considerado bajo para estas calderas.

En las instalaciones y en el SGV existen reservas energéticas que no han sido suficientemente aprovechadas, relacionadas con el trabajo de las máquinas térmicas en condiciones nominales o a cargas parciales superiores a las actuales; y con las pérdidas que se producen con los gases que salen por la chimenea (q_2) y por transferencia de calor al medio ambiente (q_5). Estas pérdidas fueron las que más afectaron el desempeño energético de los equipos. También incidió negativamente el insuficiente calentamiento que recibió el agua de alimentación en los economizadores; 3.837 °C menos que el valor de diseño (145 °C) y la contracción que experimentó el calor útil, respecto a los valores que debe tener en las calderas 2; 4 y 5 ($2.024 \cdot 10^{11}$ J/h) y en el GV-6 ($4.048 \cdot 10^{11}$ J/h), cuando estas operan con los parámetros nominales (75 o 150 t/h; 440 °C y 3.92 MPa).

El resumen de los resultados obtenidos para los parámetros termoenergéticos fundamentales del SGV se muestra en la figura 2. Este constituye la segunda contribución de la presente investigación.

Figura 2. Diagrama de flujo termoenergético para el sistema de generación de vapor



3.1. Acciones para aumentar las eficiencias térmicas y exergeticas de las calderas

Para mitigar y/o eliminar los problemas existentes en la CTE, perfeccionar la explotación de los equipos, aumentar la seguridad de su trabajo y optimizar su desempeño energético, se recomienda implementar integralmente las acciones siguientes:

- Diagnosticar a las calderas con rigor científico, desde el punto de vista térmico, exergetico y de mantenimiento, lo cual dotará a los decisores de la empresa de la información necesaria y precisa sobre el estado de los principales parámetros de funcionamiento de las instalaciones. Y posibilitará la planificación y desarrollo de un sistema de mantenimiento que eleve su disponibilidad y fiabilidad.
- Optimizar el sistema de gestión de la energía en los generadores de vapor mediante la aplicación de la norma ISO 50001 (2018), lo cual permitirá monitorear y evaluar el proceso de producción de vapor y sus oportunidades de mejora, con referencia a sus características claves y las políticas energéticas de la empresa y el país.
- Explotar las calderas a su productividad nominal (siempre que sea posible), para mitigar y/o eliminar las ineficiencias asociadas a la subutilización de su capacidad, reducir la probabilidad de ocurrencia de roturas de carácter grave y no comprometer excesivamente la seguridad durante su operación.
- Precalentar el aire y suministrar las cantidades necesarias, para optimizar la combustión e incrementar la exergía disponible. Esta acción, el ámbito de los combustibles fósiles, requiere de un riguroso análisis de la transferencia de calor en presencia de reacciones químicas para mejorar la eficiencia de la combustión en hornos y calderas (Centeno-González et al., 2017, Camaraza, 2020b).
- Operar correctamente los quemadores, manteniendo los parámetros establecidos para la explotación en cuanto a: flujo y presión de atomización; y temperatura de calentamiento, humedad y grado de preparación del combustible.

- Disminuir el exceso de aire tanto como se pueda y mantenerlo en el valor óptimo durante la operación a cargas parciales.
- Maximizar el aprovechamiento del calor sensible disponible en los gases de la combustión, para lograr que su temperatura a la salida de las chimeneas sea lo más baja posible, sin que esto implique la condensación de los vapores de agua que contienen y la corrosión en los sistemas de circulación de agua y evacuación de los gases, lo cual provocaría incrementos en los costos de mantenimiento, roturas prematuras y baja disponibilidad de las instalaciones.
- Mantener limpias las superficies de transferencias de calor (por el interior y el exterior) y en buen estado técnico el aislamiento de las calderas, lo cual impactará positivamente en las dos mayores pérdidas existentes en el SGV (q_2 y q_5).
- Hermetizar correctamente las paredes, registros y mirillas. No abrir estas últimas innecesariamente, para minimizar las infiltraciones de aire en las calderas de tiro balanceado (GV 2; 4 y 5) y las fugas de gases en la de horno presurizado (GV 6).
- Mantener la temperatura de la combustión en el valor adecuado, sin que disminuya o varíe significativamente, pues actúa como un catalizador positivo de la reacción y contribuye a maximizar la utilización de la exergía del calor de combustión (Ex_{qc}).
- Disminuir la diferencia de temperatura entre la sustancia de trabajo (el agua) y el agente de transformación (los gases producto de la combustión), para reducir al máximo el grado de irreversibilidad en los procesos de transferencia de calor y de transformación del agua en vapor. Aplicar varias etapas de calentamiento al agua de alimentación en los economizadores.
- Proyectar, mediante el análisis por técnicas numéricas, la simulación computacional y otras herramientas de probada eficacia (Andrade, Quitiaquez y Toapanta, 2020); la implementación de tecnologías basadas en el uso de fuentes renovables de energía para el calentamiento del agua de alimentación suministrada a las calderas (Quitiaquez et al., 2020), lo cual reduciría la cantidad de combustibles fósiles quemados y mitigaría los impactos negativos ocasionados al medio ambiente.

Las acciones antes mencionadas constituyen el tercer aporte del presente trabajo. Su implementación integral en la CTE y el SGV, reduce las pérdidas de calor y eleva los rendimientos térmicos y exergéticos de las calderas. Los impactos positivos que generan en estas instalaciones no han sido suficientemente estudiados. Estos, conjugados con la optimización energética y operacional de las calderas, serán objeto de análisis a futuro.

4. Conclusiones

Se elaboró un algoritmo que sistematiza la metodología establecida para el balance termoenergético de calderas de vapor. El mismo sintetiza los procedimientos establecidos en trabajos precedentes, establece la secuencia de pasos a seguir y define los parámetros que se requieren para la evaluación térmica, por los métodos directo e indirecto, y exergética de los generadores de vapor estudiados y otros de similares características.

Se realizó un análisis termoenergético integral del sistema de generación de vapor de una termoeléctrica de 49 MW. La instalación tiene un elevado grado de aprovechamiento de la energía térmica. Sin embargo, es baja su capacidad de utilización de la exergía disponible, debido al deterioro de algunos de sus parámetros de operación y a las irreversibilidades inherentes a los

procesos de combustión, transferencia de calor y de transformación del agua en vapor. Sus rendimientos, térmico y exergético, ascendieron a 90.106 y 45.491 %, respectivamente, y el grado de pérdida de exergía fue del 54.509 %.

Se evidenció que en el SGV se han deteriorado, respecto a los valores de diseño, los siguientes parámetros operacionales: producción, temperatura y presión del vapor sobrecalentado; temperatura del agua de alimentación y de los gases producto de la combustión; y la calidad del combustible. Las causas que originan esta afectación pueden ser mitigadas o eliminadas mediante la implementación de acciones científicas y técnico-organizativas, que contribuyan a incrementar los rendimientos térmicos y exergéticos de las calderas. Tales acciones impactan positivamente en indicadores energéticos, económicos y ambientales asociados al trabajo de las instalaciones. Este aspecto, integrado a la optimización energético-operacional de las calderas, será investigado con posterioridad.

Bibliografía

- Nugroho Agung P., Ria L., Danar Susilo W., Valiant Lukad P., Maedanu F., Muhammad I., Lip Huat S., Renanto H. (2017). Exergy Analysis of Boiler Process Powered by Biogas Fuel in Ethanol Production Plant: a Preliminary Analysis. *Energy Procedia*, 142: 216-223. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.035>.
- Andrade Cando, A. X.; Quitiaquez Sarzosa, W. y Toapanta, L. F. (2020). CFD Analysis of a Solar Flat Plate Collector with Different Cross Sections. *Enfoque UTE*, 11(2), pp. 95-108. doi: 10.29019/enfoque.v11n2.601
- Annaratone, D. (2019). *Steam Generator*. Berlin: Springer.
- Arshad, A.; Muhammad, H.; Habib, A. et al. (2019). Energy and Exergy Analysis of Fuel Cells: A Review. *Thermal Science and Engineering Progress* 9(-), p: 308-321. doi: 10.1016/j.tsep.2018.12.008
- Bluestein, M. (2020). *Thermodynamics and Heat Power*. Boca Raton: Taylor & Francis.
- Borroto, A., y Rubio, Á. (2010). *Combustión y generación de vapor*. La Habana, Cuba: Editorial Félix Varela.
- Buecker, B. (2012). *Basics of Boiler and Heat Recovery Steam Generator Design*. Oklahoma: Penn Well Corporation.
- Camaraza, Y. (2017). *Introducción a la termotransferencia*. La Habana, Cuba: Editorial Universitaria.
- Camaraza, Y. (2018). *Introducción a la termotransferencia* (2.º ed.). La Habana, Cuba: Editorial Universitaria.
- Camaraza, Y. (2020a). *Transferencia de calor por conducción*. La Habana, Cuba: Editorial Universitaria.
- Camaraza, Y. (2020b). *Transferencia de calor por convección* (2.º ed.). La Habana, Cuba: Editorial Universitaria.
- Çengel, Y. y Boles, M. (2014). *Thermodynamics: An Engineering Approach*, (8.º ed.). McGraw-Hill.
- Centeno-González, F. O.; Silva, E. E.; Villa, H. F. et al. (2017). CFD Modeling of Combustion of Sugarcane Bagasse in an Industrial Boiler. *Fuel*, 193, p. 31-38. doi: 10.1016/j.fuel.2016.11.105.
- Cortés, M.; Cornes, Y.; Alomá, I. y González, E. (2019). Evaluación del sistema energético en el central azucarero Quintín Bandera. *Centro Azúcar*, 46(3), 66-78.
- Edmonds, W. y Kennedy, T. (2017). *An Applied Guide to Research Designs: Quantitative, Qualitative, and Mixed Methods* (2.º ed.). Los Ángeles, USA: SAGE Publications.
- Flynn, D. (2013). *Thermal Power Plant Simulation and Control*. London: Springer.
- Ganapathy, V. (2013). *Industrial Boilers and Heat Recovery Steam Generators: Design, Applications and Calculations*. New York: Marcel Dekker, Inc.
- Harish, S., y Baldi, S. (2018). Monitoring Energy Efficiency of Condensing Boilers via Hybrid First Principle Modelling and Estimation. *Energy*, 142, 121-129.

- Hasnain, S.; Khurram, M.; Akhter, J.; Ahmed, B. y Abbas, N. (2020). Selection of an Industrial Boiler for a Soda-Ash Production Plant Using Analytical Hierarchy Process and Topsis Approaches. *Case Studies in Thermal Engineering*, 19(-) 100636, p:1-14 doi: 10.1016/j.csite.2020.100636
- ISO International Organization for Standardization. (2018). *ISO 50001 Energy Management Systems-Requirements with Guidance for Use*. Geneva, Switzerland.
- Javadi, M.; Hoseinzadeh, S.; Ghasemiasl, R.; Heyns, P. y Chamkha, A. (2019). Sensitivity Analysis of Combined Cycle Parameters on Exergy, Economic, and Environmental of a Power Plant. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 13(3), p:1-10. doi: 10.1007/s10973-019-08399-y
- Jiménez, J.; Jarquin, G.; Durán, M. y García, J. (2011). Análisis exergético del generador de vapor de 350 MW a cargas parciales. *MACI*, 3(-), 715-718.
- Jiménez, R.; Madrigal, J.; Lapido, M. y Vidal, D. (2016). Método para la evaluación de la eficiencia e impacto ambiental de un GV. *Ingeniería Energética*, 37(2), 135-144.
- Kitto, J. B. y Stultz, S. C. (2015). *Steam, its Generation and Use*. Ohio: The Babcock & Wilcox Company.
- Krasniqi-Alidema, D.; Filkoski, R. y Krasniqi, M. (2018). Exergy Efficiency Analysis of Lignite-Fired Steam Generator. *Thermal Science* 22(5), p. 2087-2101. doi: 10.2298/TSCI180131265
- Labañino, N. (2015). *Diagnóstico energético de calderas de vapor: estudio de casos*. Tesis de Ingeniería, Facultad de Metalurgia y Electromecánica, Universidad de Moa, Cuba.
- Martha de Souza, G. F. (2012). *Thermal Power Plant Performance Analysis*. London: Springer.
- Pankratov, G. (1987). *Problemas de Termotecnia*. Moscú, URSS: Editorial MIR.
- Patro, B. (2015). Efficiency Studies of Combinati on Tube Boilers. *Alexandria Engineering Journal*. p. 1-10. doi: 10.1016/j.aej.2015.12.007
- Peduzzi, E.; Boissonnet, G. y Maréchal, F. (2016). Biomass modelling: Estimating Thermodynamic Properties from the Elemental Composition. *Fuel*, 181, p. 207-217. doi: 10.1016/j.fuel.2016.04.111.
- Pérez, C.; Cordovés, A. y Terán, J. (2016). Design and Implementation of a Control System to Improve the Quality of the Combustion Gases in the Fire-tube Boiler of 5 BHP. *Enfoque UTE*, 7(2), 55-68. doi: 10.29019/enfoqueute.v7n2.95
- Pérez-Sánchez, A.; Fernández, F. y González, R. (2017). Evaluación de la generación de vapor de la fábrica de refrescos 23 de agosto, en Camagüey. *Mutis*, 7(1), 7-19, doi: 10.21789/22561498.1198.
- Quitiaquez, W.; Simbaña, I.; Isaza-Roldán, C. A. et al. (2020). Review of the State of Art of DX-SAHP Systems to Obtain Domestic Hot Water. *Enfoque UTE*, 11(2), 29-46. doi: 10.29019/enfoque.v11n2.565.
- Rastogi, P.; Sharma, N. y Gupta, B. (2018). Energy and Exergy Analysis of Boiler in Bagasse Based 20 MW Steam Power Plants. *Int. J. of Eng. and Tech.*, 4(2), 444-449.
- Rodríguez-Ramos, A. y Llanes-Santiago, O. (2014). Diagnóstico de fallos en un GV BKZ-340-140-29M utilizando herramientas de lógica difusa. *Ing. Mecánica*, 17(2), 147-156.
- Rubio, A. (2015). *Generadores de vapor. Funcionamiento y explotación*. Santa Clara, Cuba: Editorial Feijóo.
- Tozlu, A.; Büyükmurat, Y. y Özahi, E. (2020). Thermo-economic Analyses of an Actual Power Plant. *Turkish Journal of Electromechanics & Energy*, 5(1), 9-15.
- Valencia, G.; Piero, J. y Campos, J. (2019). Energy Optimization of Industrial Steam Boiler using Energy Performance Indicator. *Int. J. of Energy Eco. and Policy*, 9(6), 109-117.
- Valles, A.; Acosta, L. y Pérez, A. (2014). Evaluación energética de los GV F1-2 y BH-109 de una refinería cubana de petróleo. *Revista Especializada en Ingeniería*, 8(-), 1-10.
- Velázquez, A.; Corrales, J. y Pérez, L. (2019). Evaluación termoexergética del GV del campus Lenin de la Universidad de Las Tunas. *Opuntia Brava*, 12(1), 454-468.

Manufacture material characteristic analysis of original and alternative auto parts. Case Study: Brake Disc

(Análisis de las características del material de fabricación de autopartes originales y alternos. Caso de estudio: Disco de freno)

Jaime Antamba¹, Vladimir Azanza², Gorky Reyes³, Álvaro Remache⁴, Soraya Ruiz⁵

Abstract

All powered vehicles have a braking system adopted according to the type of vehicle and work for which they are designed. In Ecuador, there is a great variety of auto parts that are proposed as alternative replacement, varying in cost and quality. This research aims to quantitatively analyze the characteristics of the brake disc material between original and alternate auto parts. This research analyzes three brake disc samples (A, B, C) from different manufacturing sources, using the ASTM E415-08 spectrometry test and the metallography test under the ASTM A247-16A standard. The spectrometry detects 15 elements in each sample, the carbon equivalent of sample A is 18% and 20% higher in relation to sample B and C, which significantly influences the microstructure. The metallographic tests indicate a pearlitic matrix in each sample, however, there is a different distribution and size of the graphite flakes. According to the SAE J431 standard, each auto part meets the material conditions for the brake disc function.

Keywords

SAE J431; perlitic matrix; carbon equivalent; auto parts

Resumen

Todos los vehículos propulsados cuentan con un sistema de frenado adoptado según el tipo de vehículo y trabajo para el que están diseñados. En Ecuador existe una gran variedad de autopartes que se proponen como repuesto alternativo, que varían en costo y calidad. Este estudio tiene por objetivo analizar cuantitativamente las características del material de discos de freno entre autopartes originales y alternas. El estudio analiza tres muestras de disco de frenos (A, B, C), de diferente procedencia de fabricación, utilizando la prueba de espectrometría ASTM E415-08 y la prueba de metalografía, bajo la normativa ASTM A247-16A. La espectrometría detecta 15 elementos en cada muestra. El carbono equivalente de la muestra A es superior en un 18 % y 20 % en relación a la muestra B y C, lo cual influye significativamente en la microestructura. Los ensayos metalográficos, indican en cada muestra una matriz perlítica; sin embargo, existe una diferente distribución y tamaño de las hojuelas de grafito. Según la norma SAE J431, cada autoparte cumple con las condiciones de material para la función de disco de freno.

Palabras clave

SAE J431; matriz perlítica; carbono equivalente; autopartes

1. Introduction

Currently in the Ecuadorian market, a variety of auto parts are offered, both in brand and origin, at the same time, they go hand in hand with the quality and cost of the spare part. The cost factor can be influential when making a decision, because customers decide to buy, considering the cheapest option, without considering the best option in safety or performance.

1 Universidad Internacional del Ecuador, Quito - Ecuador (jaantambagu@uide.edu.ec)
2 Universidad Internacional del Ecuador, Quito - Ecuador (edazanzalu@uide.edu.ec)
3 Universidad Internacional del Ecuador, Quito - Ecuador (gureyesca@uide.edu.ec)
4 Universidad Internacional del Ecuador, Quito - Ecuador (alremachech@uide.edu.ec)
5 Universidad Internacional del Ecuador, Quito - Ecuador (soruizru@uide.edu.ec)

In the vehicle, two safety systems coexist: passive and active; the former are those that work at specific moments when their action is activated, for example, airbags and the anti-lock braking system (ABS) (Bosch, 2005). Meanwhile, active systems, such as the braking system, are always in operation, the main means of ensuring the safety of the occupants of the moving vehicle. The frictional heat generated on the surface of the brake disc can influence an excessive increase in temperature which, in turn, causes undesirable effects such as thermal elastic instability, premature wear, brake fluid vaporization and thermally excited vibrations (Belhocine, A. & Bouchetara, M., 2012). It is important to analyze the composition of the material, as well as the microstructure of the different brake discs in the national market to verify their performance capacity according to the design conditions.

The Metallurgical Engineering Department of the University of Santiago de Chile has carried out studies of premature wear and abnormal mechanical vibrations in brake discs based on their chemical composition, concluding that such failure is produced by residual stresses originated by the difference that exists in the material composition of the different areas of the disc. These stresses were relaxed during the friction process to which the disc was subjected during its service and were the cause of the deformation of its geometry. (Piña, 2008) (Tuckart, Molinari, Caso, & Prieto, 2014). This study indicates that in the process of casting the piece, there may be failures produced by differences in the composition of the material, that is, there is a possibility that pieces with these possible failures are marketed at a regional level (Rodrigues, 2004).

The materials of the brake discs are generally made of grey cast iron. The regulation that governs the different grades of grey iron for the automotive industry is the SAE J431 standard, which determines certain grades for the manufacture of brake discs and drums (Rodríguez, 2004). Within the methods to analyze the composition of a metallic alloy, by the type of material and part, a spark type spectrometry is considered (Piña, 2008).

This research, proposes a comparative analysis of brake disc material between original and alternate auto parts. Due to the large share of alternative parts offered by the market at considerably lower costs compared to the originals, a comparison of the different compositions and microstructures that could present these options was made and it was analyzed whether these factors could affect their operation.

2. Methodology

The research process is descriptive and experimental. This research analyzes three brake disc samples (A, B, C) from different manufacturing sources, using the ASTM E415-08 spectrometry test to establish the components of each sample and the metallography test under the ASTM A247-16A standard to establish the type of matrix and the graphical distribution.

2.1. Vehicle

In the case of Ecuador, the age of the vehicle fleet is led by 28.99 % of cars between 1-5 years and followed by 21.44 % of cars between 5-10 years (AEADE; 2018). The third brand in the market is Hyundai, surpassed by Chevrolet and Kia. For the study has been chosen Hyundai vehicle, model i10, year 2014, segment type A, considered an urban vehicle, low fuel consumption and high demand in the local market, in addition to being an imported model.

2.2. Brake disc

Table 1 describes the characteristics of the three brake disc samples identified as spare parts in the national environment.

Table 1. Characteristics of the samples

Sample	Manufacturing origin	Disc Type	Thickness(mm)	Cost ratio
Original (A)	Korea	Ventilation	18	1:1
Alternate 1 (B)	Brazil	Ventilation	18	5:1
Alternate 2 (C)	India	Solid	11.2	8:1

2.3. Spectrometry test

The spectrometry test was performed under the standards of ASTM E415-08, is called standard test method for analysis of atomic emission vacuum spectrometry of carbon and low alloy steel. The test consists of inducing a current to an electrode and produce a spark in the disc, the same that would leave a spectrum of light, through the spectrum can be determined the composition of the material. The procedure was carried out in a standardized national laboratory. With spectrometric results, the carbon equivalent (CE) of each sample is calculated, using equation 1, for quantitative comparison of the samples.

$$CE = \%C + 0.31\%Si + 0.33\%P - 0.027\%Mn + 0.40\%S \quad (1)$$

The carbon results of brake disc are compared with SAE J431 standard. In table 2, describes compositions for automotive gray iron according SAE J431 standard.

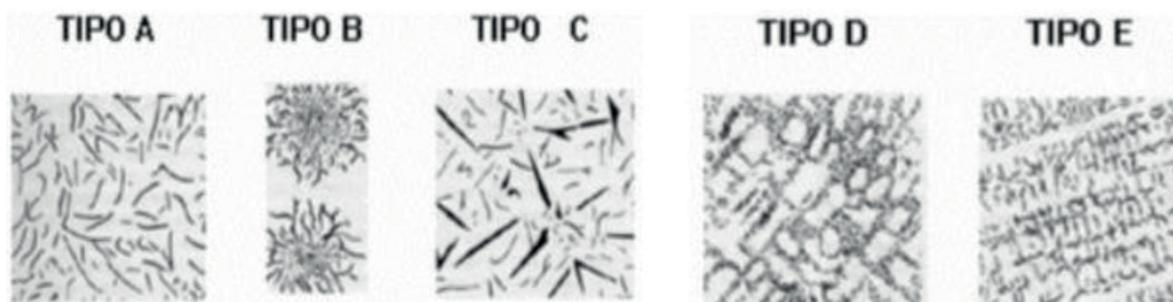
Table 2. Typical base compositions for automotive gray cast iron

Iron Grade	Previous Designation	Carbon	Silicon	Sulfur Max.	Phosphorus Max.	CE (Approx.)
G7	G1800h	3.50 - 3.70	2.30 - 2.80	0.14	0.25	4.35 - 4.55
G9	G2500	3.40 - 3.65	2.10 - 2.50	0.12	0.25	4.15 - 4.40
G10	G3000	3.35 - 3.60	1.90 - 2.30	0.12	0.20	4.05 - 4.30
G11	G3000	3.30 - 3.55	1.90 - 2.20	0.12	0.10	4.00 - 4.25
G12	G3500	3.25 - 3.50	1.90 - 2.20	0.12	0.10	3.95 - 4.20
G13	G4000	3.15 - 3.40	1.80 - 2.10	0.12	0.08	3.80 - 4.05

2.4. Metallographic test

The metallographic test was performed under the ASTM A247-16A standard, which is called the standard test method for evaluating the microstructure of graphite in iron foundries. The matrix was analyzed under the microscope, with a resolution of 500X, and a resolution of 100X was used for the morphology and size of the flakes. The test piece result is then compared with the standardized standards in ASTM A247. Both major and minor elements have a direct influence on the morphology of flake graphite. The typical graphite shapes for flake graphite are shown in Figure 1.

Figure 1. Types of graphical distributions, according to ASTM A247

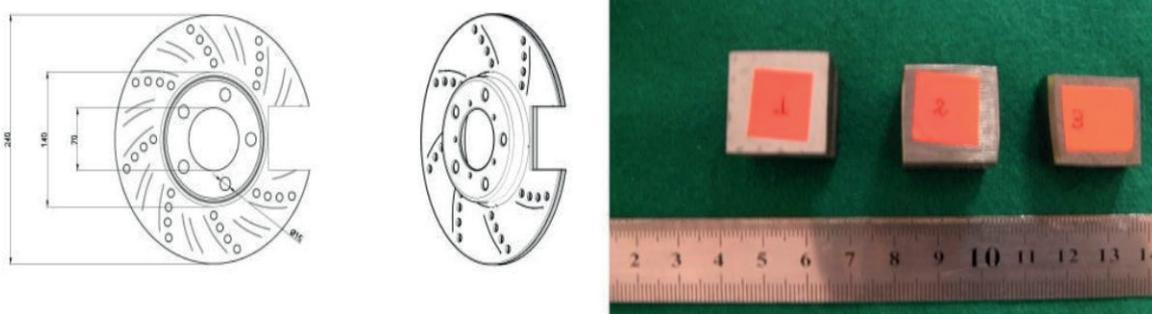


In figure 1, Type A graphite is found in inoculated irons cooled with moderate rates. In general, it is associated with the best mechanical properties, and cast irons with this type of graphite exhibit moderate undercooling during solidification. Type B graphite is found in irons of near-eutectic composition, solidifying on a limited number of nuclei. Large eutectic cell size and low undercoolings are common in cast irons exhibiting this type of graphite. Type C graphite occurs in hypereutectic irons as a result of solidification with minimum undercooling. Type D graphite is found in hypoeutectic or eutectic irons solidified at rather high cooling rates, while type E graphite is characteristic for strongly hypoeutectic irons. Types D and E are both associated with high undercoolings during solidification.

2.4.1. METALLOGRAPHIC SPECIMENS

For the metallographic test, standardized specimens produced in the wear and failure laboratory are used, designated with numbers 1, 2 and 3, according to ASTM E-3 standards for each brake disc, for convenience, specimens to be polished for metallographic examination are generally not more than about 12 to 25 mm square, as shown in figure 2. Specimens embedded in plastic to protect them from damage and to provide a uniform format for automatic preparation.

Figure 2. Brake disc test specimens and specimen removal area



For each test it was necessary to machine a 2x2 test tube. The test pieces were taken from the braking track, as shown in figure 2. The selection of test specimens for metallographic examination is extremely important because, if their interpretation is to be of value.

3. Results

3.1. Spectrometry of brake disc test pieces

The results of the metal element spectrometry for each specimen are shown in Table 3.

Table 3. Composition of metal elements of brake disc specimens

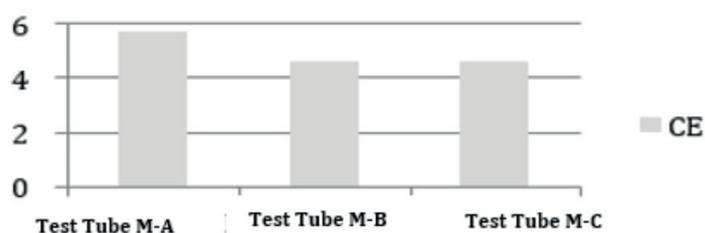
Metal	Specimen M-A	Specimen M-B	Specimen M-C
CE	5.642	4.596	4.537
Carbon (C)	5.082	3.898	3.859
Silicon (Si)	1.74	2.111	2.012
Manganese (Mn)	0.736	0.641	0.545
Phosphorus (P)	0.017	0.05	0.071
Sulphur (S)	0.088	0.111	0.115
Chrome (Cr)	0.449	0.08	0.108
Nickel (Ni)	0.008	0.008	0.028
Copper (Cu)	0.247	0.023	0.054
Aluminum (Al)	0.026	<0.001	<0.001
Cerium (Ce)	0.034	0.129	0.128
Antimony (Sb)	0.026	0.041	0.1
Titanium (Ti)	0.014	0.032	0.051
Vanadium (V)	0.002	0.006	0.027
Zinc (Zn)	0.035	<0.001	<0.001
Iron (Fe)	91.37	92.72	92.92

Source: Extractive Metallurgy Laboratory EPN.

The test detects 15 components in each sample, with variations in value for each one. For materials with applications for brake discs and drums, a minimum of 3.4 % carbon content and a pearlitic microstructure is required, according to the grades of grey iron proposed by the SAE J431 standard. For each sample analyzed, this requirement is met, however, sample A presents 23 % and 24% more carbon than samples B and C, respectively.

With regard to the influence of the composition on the microstructure of the material, the carbon equivalent (CE) plays a large role in the distribution and size of the graphite flakes, as well as in the matrix, which gives certain characteristics to the brake disc material. The results for carbon equivalent are shown in Figure 3.

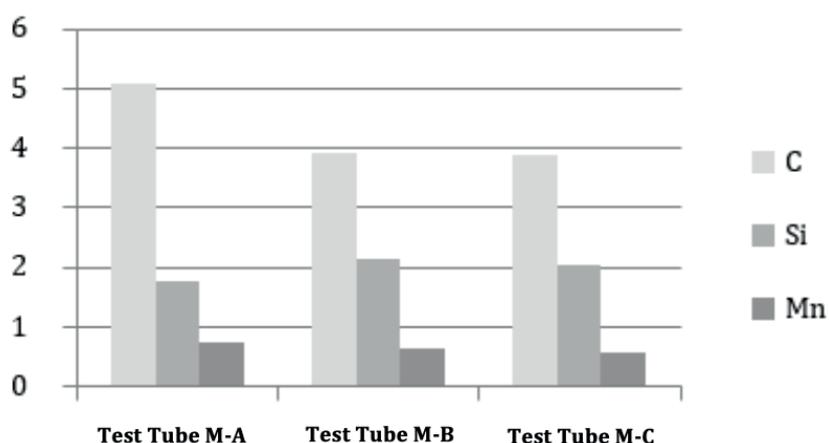
Figure 3. Carbon equivalent (CE) comparison of specimens



In terms of the composition of the material, between samples B and C, they offer no major difference, however, there is a clear difference with sample A. The carbon equivalent of sample A is 18 % and 20% higher than that of samples B and C, which has a significant influence on the microstructure, since a higher carbon content leads to greater growth of the graphite flakes.

Five elements are involved in the calculation of the EC: carbon (C), silicon (Si), manganese (Mn), phosphorus (P) and sulphur (S). According to the SAE J431 standard, minimum compositions are established for five elements, specimen's compositions are compared in the figure 4.

Figure 4. Comparison of carbon, silicon and manganese of brake disc test pieces

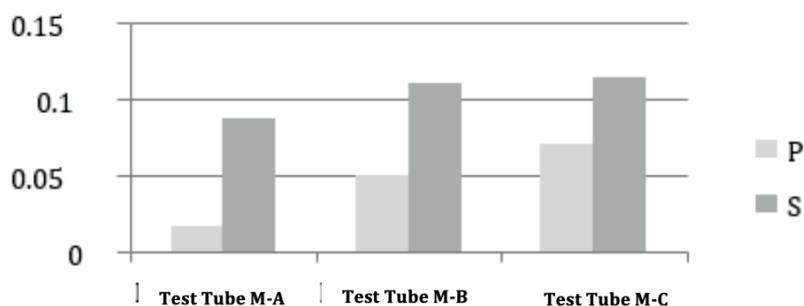


Carbon and silicon are the most influential elements in the formation of graphite, silicon acts as a graphitizer, inhibiting carbon so that it does not combine with another element to form graphite flakes, while manganese acts as a stabilizer of carbides (Askeland, 2017).

The specimen of sample A, having a higher carbon and 17 % less silicon in relation to samples B and C, allows the brake disc A, to generate a higher growth of graphite flakes.

Both sulphur and phosphorus are found in proportions of less than 1 %, as shown in figure 5, because both in high proportions give fragility to the material, the sulphur has a function opposite to silicon acts as an anti-graffiti and in high quantities over 1 % can cause cavitation.

Figure 5. Phosphorus(P) and Sulphur(S) comparison of the specimens

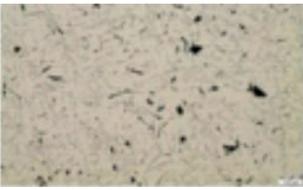
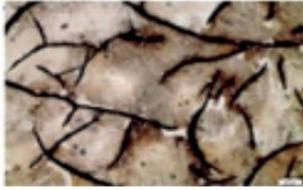


In the case of Sulphur, as it is an anti-graffiticide, the sample A specimen has 23 % less in comparison to specimen's B and C, giving the brake disc greater graffiti.

3.2. Metallography

Table 4 shows the results of the metallographic test specimens. Each specimen has a pearlitic matrix, however, there is a different distribution and size of the flakes, which contribute with characteristics such as hardness and internal lubrication.

Table 4. Metallographic tests for specimens

Sample	Description	Metallography
Test tube M-A	Grey cast iron, pearlitic matrix. Magnification:500X (a)	a) 
	Graphite distribution. Type A-C. Size between 3-5. Magnification:100X (b)	b) 
Test tube M-B	Grey cast iron, pearlitic matrix. Magnification:500X (a)	a) 
	Graphite distribution. Type A-E. Size between 4-6. Magnification:100X (b)	b) 
Test tube M-C	Grey cast iron, pearlitic matrix. Magnification: 500X (a)	a) 
	Distribution of graphite A-E. Size between 5-6. Magnification: 100X (b)	b) 

Source: Extractive Metallurgy Laboratory EPN.

Comparing the different brake discs, it is found that sample A has a higher carbon content, which encourages more growth of the graphite flakes. The chemical composition of the material is involved in the growth of graphite flakes, the lower the EC, the smaller the grain size.

3.3. Discussion

According to, Gutierrez, N. & Vinueza Lozada, A. (2018), the existence of zinc reduces the heat flow between brake pad and disc, in sample A, a higher percentage of zinc is observed in relation to samples B and C, therefore, these samples would increase the working temperature during the braking action.

According to Kharate, N. & Chaudhari, S (2018), their study indicates a higher natural frequency oscillation in steel disc with respect to cast iron under similar operating conditions, therefore the existence of higher carbon equivalent, indicates a trend of oscillation in lower operation, such would be the case of the disc in sample A.

According to the studies by Cañibano, E., Gonzalez, M. & del Amo, O. (2005) and Chérrez-Troya, M., Martínez-Gómez, J., Peralta-Zurita, D. & Llanes-Cedeño (2018), there are several factors to establish the appropriate conditions of a brake disc, but they are independent of the disc geometry, the blade geometry, the type of test, due to the robustness of the design methodology and the properties of the manufacturing material.

4. Conclusions and recommendations

The auto parts denoted as samples A, B and C, can be offered as brake disc replacement parts, sample A being the one with the best mechanical properties for the assigned function.

It was determined that the three samples of brake disc material, meet the specifications of SAE J431, which indicates the proposed carbon requirement for the manufacture of automotive brake discs and drums, must contain at least a 4.3 % carbon equivalent with pearlitic matrix.

Graphite flakes provide hardness and internal lubrication to the material, these two factors in a brake disc can increase the resistance to frictional wear, allowing a longer life in sample A.

Bibliography

- Askeland, D. R. y Wright, W. J. (2017). *Ciencia e ingeniería de materiales*. México: Cengage.
- Belhocine, A. y Bouchetara, M. (2012). *Thermal Behavior of Full and Ventilated Disc Brakes of Vehicles*. Journal of Mechanical Science and Technology 26(11): 3643–3652. <https://doi.org/10.1007/s12206-012-0840-6>
- Bosch. (2015). *Manual de la técnica del automóvil*. Alemania.
- Cañibano, E.; González, M. y del Amo, O. (2005). *Diseño de discos de freno desde un punto de vista multidisciplinar*. DYNA, 80(3), 27-32.
- Chérrez-Troya, M.; Martínez-Gómez, J.; Peralta-Zurita, D. y Antonio Llanes-Cedeño, E. (2018). Métodos multicriterio aplicados en la selección de un material para discos de freno. *Ingenius*. Revista de Ciencia y Tecnología, (20), 83-95.
- Hwang, P. & Wu, X. (2010). Investigation of Temperature and Thermal Stress in Ventilated Disc Brake Based on 3d Thermo-Mechanical Coupling Model. *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 24, No. 1, 81–84. doi: 10.1007/s12206-009-1116-7.
- Rodríguez García, N. J. y Nieto Sánchez, I. C. (2017). Consideraciones para el diseño de un sistema diagnóstico de frenos de disco en un vehículo particular. *Avances: Investigación en Ingeniería*, 14(1), 76-94.

- Gutierrez, N., & Vinuesa Lozada, A. (2018). Analysis by the finite element method of the behavior of the ABS brake pads with materials based on steel and zinc discretizing the continuous element using CAE software. *Enfoque UTE*, 9(1), pp. 188 - 203. <https://doi.org/https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v9n1.259>
- Kharate, N. & Chaudhari, S (2018). *Effect of material properties on disc brake squeal and performance using FEM and EMA approach*. *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, no. 2, 4986–4994. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.076>.
- Lascano Piedra, D. A. (2017). Análisis de los discos de freno de un Chevrolet Aveo cuando está sometido a diversas temperaturas para determinar el cambio de propiedades del mismo (Bachelor's thesis). Ingeniería Automotriz
- Maleque, M. Dyuti, S. & Rahman, M. M. (2010). *Material selection method in design of automotive brake disc*. *Proceedings of the World Congress on Engineering 2010 Vol III*, 06.
- Paredes Salinas, J., Pérez Salinas, C., & Castro Miniguano, C. (2017). Analysis of the mechanical properties of the composite of polyester matrix reinforced with glass fiber 375 and cabuya applied to the automotive industry. *Enfoque UTE*, 8(3), pp. 1 - 15. <https://doi.org/https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v8n3.163>.
- Piña, M. (2008). *Estudio de la influencia de la morfología grafitica sobre las propiedades mecánicas de los discos de freno automotrices de hierro gris hipereutecticos*. Mexico D.F.: Instituto Politecnico Nacional.
- Rodrigues, J. (2004). *Diseño y fabricación de hierros grises hipereutéticos de baja aleación para discos de freno*. México D.F.: instituto Politécnico Nacional.
- SAE Internacional (2018). SAE J431: Automotive Gray Iron Castings.USA.
- SENAE. Servicio Nacional de Aduana del Ecuador. [Online]. Available: <https://goo.gl/X4Jk9k>
- Tuckart, W., Molinari, E., Caso, L., & Prieto, G. (2014). *Estudio de falla prematura de disco de freno*. Universidad Santiago de Chile.

Análisis comparativo de la eficiencia estabilizadora de asfaltenos del aceite de cáscara de *Anacardium occidentale* y productos comerciales

(Comparative analysis of the asphaltene stabilizing efficiency of *Anacardium occidentale* peel oil and commercial products)

Dany Day Josefina Arriojas Tocuyo¹, Tomás Darío Marín Velásquez²

Resumen

La investigación tuvo como objetivo comparar la eficiencia inhibidora y estabilizante de asfaltenos, en mezclas de aceite de cáscaras de *Anacardium occidentale* (CNSL) en diésel y productos dispersantes comerciales, para evaluar el aceite como alternativa de tratamiento químico anti-asfalténico del petróleo crudo. Se determinó el umbral de floculación por precipitación con n-heptano y el punto de dispersión por adición de xileno, ambos mediante la observación directa de la formación de flóculos de asfaltenos en un microscopio óptico. El diseño experimental utilizado fue factorial, con cuatro variables respuestas (umbral de floculación, actividad inhibidora, índice de inestabilidad y eficiencia de estabilización) y dos factores experimentales (producto y dosis). Se evaluaron cinco productos con CNSL y tres productos comerciales, todos en dosis 2, 4, 6 y 8 μl en 10 ml de una muestra de petróleo crudo mediano. El análisis estadístico se basó en Anova multifactorial y test de diferencia mínima significativa de Fisher (LSD) con $\alpha = 0.05$. Se obtuvo que los dos factores experimentales influyeron significativamente en las variables respuestas de forma individual y también sus interacciones. Los productos con CNSL fueron más eficientes como inhibidores y los comerciales más eficientes como estabilizadores.

Palabras clave

Anacardium occidentale; petróleo crudo; asfaltenos; inhibidor; floculación.

Abstract

The research objective was to compare the inhibiting and stabilizing efficiency of asphaltenes from *Anacardium occidentale* (CNSL) husk oil mixtures in diesel and commercial dispersant products, to evaluate the oil as an alternative anti-asphaltene chemical treatment of crude oil. The precipitation flocculation onset with n-heptane and the dispersion point by addition of xylene were determined, both by direct observation of asphaltene floc formation under an optical microscope. The experimental design used was factorial, with four response variables (flocculation onset, inhibitory activity, instability index and stabilization efficiency) and two experimental factors (product and dose). Five products with CNSL and three commercial products, all in doses 2, 4, 6 and 8 μl in 10 ml of a medium crude oil sample, were evaluated. The statistical analysis was based on multifactorial ANOVA and Fisher's minimal significant difference test (LSD) with $\alpha = 0.05$. It was obtained that the two experimental factors significantly influenced the individual response variables and also their interactions. The products with CNSL were more efficient as inhibitors and the commercial ones more efficient as stabilizers.

Keywords

Anacardium occidentale; crude oil; asphaltene; inhibitor; flocculation.

1. Introducción

Los asfaltenos son compuestos constituyentes del petróleo crudo, que están definidos químicamente como macromoléculas y contienen núcleos aromáticos y nafténicos, cadenas alifáticas y heteroátomos como el oxígeno, el nitrógeno o el azufre (Silva, Guimarães, Seidl, García,

1 Petróleos de Venezuela, Punta de Mata – Venezuela (arriojasd@gmail.com).

2 Universidad de Oriente, Maturín – Venezuela (tmarin@udo.edu.ve).

2013). También son definidos como estructuras o moléculas poliaromáticas altamente condensadas, compuestas principalmente de carbono, hidrógeno y una proporción menor de hetero elementos como: azufre, nitrógeno y oxígeno (Alrashidi y Nasr-El-Din, 2017). Los asfaltenos por lo general, han sido definidos por su solubilidad, como la fracción insoluble en hidrocarburos parafínicos lineales de bajo peso molecular, tales como n-heptano, pero soluble en compuestos aromáticos, como el tolueno (Guzmán, Ancheyta, Trejo y Rodríguez, 2017).

Los asfaltenos son considerados como compuestos polares, lo que es causado por los electrones de átomos como el azufre, el oxígeno y el nitrógeno (Hasanvand et al., 2018). Se ha determinado que, incluso en bajas concentraciones, la molécula de asfaltenos presenta tendencia a agregarse y precipitarse, lo que causa grandes daños en las diferentes etapas del procesamiento del petróleo, como consecuencia de obstrucciones ocasionadas por los depósitos orgánicos que producen (Guzmán et al., 2017; Hasanvand et al., 2018). La formación de depósitos de asfaltenos es un problema de importancia en la producción de petróleo, porque el depósito de asfaltenos perjudica la recuperación y la producción, al producir reducción de la permeabilidad de la roca del yacimiento y disminución del diámetro efectivo de los punzonados en la tubería de producción, lo que restringe el flujo de petróleo (Martins, Martins y Santos, 2018).

La estabilidad de los asfaltenos dentro del petróleo crudo, está definida como la capacidad de los mismos de mantenerse en suspensión coloidal, estabilizados por una capa de resina, en un sistema polidisperso denominado micela (Ashoori, Sharifi, Masoumi y Salehi, 2017; Li et al., 2020). Por lo tanto, para evitar la precipitación de asfaltenos y las subsecuentes consecuencias derivadas de este fenómeno, se utilizan, en las operaciones de tratamiento del petróleo crudo, productos químicos, denominados inhibidores o dispersantes de asfaltenos, cuya función es mantener a los asfaltenos estables, evitando la formación de agregados (Delgado, 2015).

El uso de dispersantes de asfaltenos, genera costos importantes a la industria petrolera, no solo de dinero, sino ambientales, debido a que los mismos están compuestos por compuestos activos y solventes como el tolueno o xileno, que son tóxicos y potenciales contaminantes de suelos y aguas (Alrashidi y Nasr-El-Din, 2017). Debido a lo anterior, se ha investigado el uso de compuestos químicos alternativos, como alcoholes de cadena corta (Martins et al., 2018), metil esterres, terpenos y etil lactato (Elochukwu, Saaid y Pilus, 2014). De igual forma, se han estudiado productos naturales, en particular, aceites vegetales y derivados de ellos como dispersantes de asfaltenos, entre los que se pueden citar, ácidos grasos como el láurico, palmítico y oleico (Alrashidi, Afra y Nasr-El-Din, 2019), los aceites de coco y de andiroba (Alrashidi y Nasr-El-Din, 2017; Marín, 2019), los aceites de nabo, almendra amarga, sésamo, manzanilla, jengibre, avellana, oliva y romero (Mardani, Mokhtari y Soltani, 2018), aceite de *Jatropha curcas* (Marín, Marcano y Febres, 2016).

El *Anacardium occidentales*, conocido como marañón, merey, nuez de la india, cajú o anacardo, es un árbol originario de la América tropical, que se distribuye desde el sur de la Florida en Estados Unidos, hasta Brasil (Taiwo, 2015). El aceite de la cáscara de la semilla de *A. occidentale*, también conocido como *Cashew Nut Shell Liquid* (CNSL) se extrae mediante disolventes y su composición principal aproximada es entre 71-82% de ácido anacárdico, 1.6 a 9.2% de Cardanol y 13.8 a 20.3% de Cardol (Nunes et al., 2019) y ha sido utilizado en diferentes investigaciones y en campos diferentes, como antibacterial (Kanehashi et al., 2015) y como antioxidante aplicado a biocombustible (Sánchez, Chávez, Ríos y Cardona, 2015).

Debido a que otros aceites vegetales han demostrado ser potenciales alternativas para el tratamiento de asfaltenos, y tomando en cuenta que el *A. occidentale* es una planta abundante en buena parte de América y que en algunos casos como en Brasil o Venezuela, crece de manera sil-

vestre, se planteó la evaluación del CNSL (como estabilizador de asfaltenos), en comparación con productos comerciales utilizados como dispersantes, a través de un proceso experimental a nivel de laboratorio, y con la finalidad de estudiar si el mismo es una potencial alternativa a dichos productos.

2. Metodología

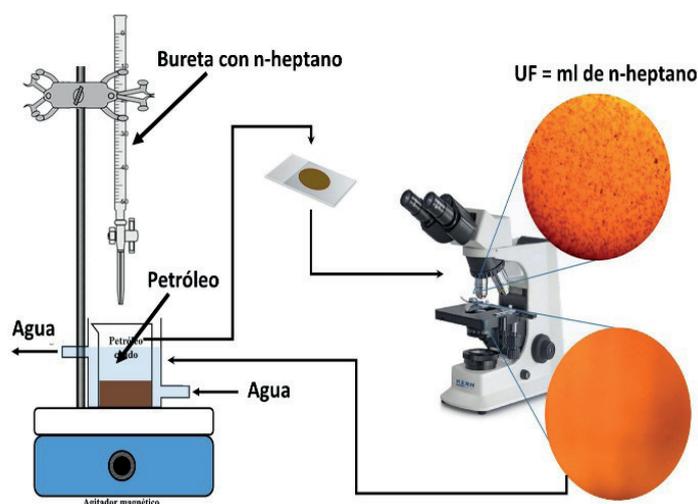
2.1. Caracterización de la muestra de petróleo crudo

La muestra de petróleo crudo utilizada se obtuvo de un pozo productor del Campo El Furrial, ubicado en la población del mismo nombre en el Estado Monagas, Venezuela. La misma fue caracterizada para obtener ciertas propiedades básicas como gravedad API, mediante la norma estándar ASTM D287 (2012); viscosidad dinámica por la norma ASTM D2196 (2018), porcentaje de agua y sedimentos (% AyS), a través de la norma ASTM D4007 (2016), y su composición SARA aplicando el procedimiento descrito en la norma ASTM D2007 (2011), a partir de la cual se determinó el índice de estabilidad coloidal mediante la ecuación 1 (Guzmán et al., 2017).

$$CII = \frac{(\%Saturados + \%Asfaltenos)}{(\%Aromáticos + \%Resinas)} \quad (1)$$

También se determinó su umbral de floculación de asfaltenos (UF) mediante el principio de titulación con n-heptano (*Oliensis Spot Test Number*) modificado mediante microscopía óptica (Abrahamsen, 2012; Kraiwattanawong et al., 2009; Marín, 2019). En el procedimiento para determinar el UF se aplicó n-heptano en proporciones sucesivas de 0.5 ml a una muestra de 10 ml de petróleo crudo sometido a agitación magnética y a temperatura constante de 25 °C. Luego de agitar por 5 min, por cada aplicación se extrajo una alícuota del petróleo crudo y se observó en un microscopio óptico con ocular 10X para constatar la formación de los flóculos de asfaltenos. Al observar la formación de los flóculos, se anotó el volumen total de n-heptano (ml) aplicado, como el UF de los asfaltenos, en caso de no observarse flóculos, se repite el proceso desde la adición de 0.5 ml más de n-heptano, hasta obtener el UF. El esquema se muestra en la figura 1.

Figura 1. Esquema el ensayo para determinar el UF



Fuente: elaboración propia.

También se determinó el punto de dispersión de los asfaltenos (PD) mediante aplicación de xileno a la muestra de petróleo, luego de obtener el UF, en aplicaciones sucesivas de 0.1 ml, hasta dejar de observar los agregados de asfaltenos en el microscopio (Marín, 2019).

Con los valores de UF y PD se determinó el índice de inestabilidad de asfaltenos (INE), como la relación entre ambos parámetros, tal como se muestra en la ecuación 2.

$$INE = \frac{PD}{UF} \quad (2)$$

El INE indica que mientras menor sea la relación entre PD y UF, mayor será la estabilidad de los asfaltenos en el petróleo crudo, pues se necesita menor cantidad de solvente (xileno) para dispersar las partículas de asfaltenos agregadas mediante n-heptano (Marín et al., 2016).

2.2. Obtención del aceite de cáscaras de semillas de *A. occidentale* (CNSL)

Las cáscaras de *A. occidentale* fueron obtenidas de frutos recolectados en la población de El Furrial y poblaciones vecinas (Musipán y Punta de Mata), directamente de árboles sembrados como soportes en cercos de fincas ganaderas. Se escogieron cáscaras de pseudofrutos maduros y se separaron manualmente de la nuez, se trituraron igualmente de forma manual y se secaron en estufa de laboratorio a una temperatura de 80 °C para eliminar el exceso de humedad.

Para la extracción del aceite se utilizó un equipo Soxhlet de 500 ml de capacidad y como solvente n-hexano grado analítico. La extracción se realizó con una proporción de 300 ml de solvente por 30 g de cáscara triturada y seca. El proceso se realizó durante cuatro horas (Kusrini et al., 2018; Riss et al., 2015). El extracto se concentró en un rotoevaporador y se almacenó a condiciones de laboratorio (25 °C).

2.3. Preparación de productos a evaluar

Se prepararon tres productos con tres concentraciones de CNSL como componente activo y combustible diésel como solvente (40, 60 y 80% CNSL), para evaluar el efecto de la concentración del aceite sobre el UF de asfaltenos. Las mezclas y los tres productos comerciales fueron aplicadas al petróleo crudo en cuatro dosis (2, 4, 6 y 8 µl por 10 ml de petróleo). Adicionalmente se aplicó diésel puro y CNSL puro en las mismas dosis. Luego de aplicar el producto al petróleo crudo, se procedió a determinar el UF de los asfaltenos y se comparó con el UF original, con lo cual se obtuvo la actividad inhibidora relativa porcentual (ARP), mediante la ecuación 3.

$$ARP = \frac{UF_{dosificado} - UF_{Original}}{UF_{Original}} \times 100 \quad (3)$$

Además, para cada muestra de petróleo crudo dosificada con los productos evaluados se determinó el PD y se calculó el INE mediante la ecuación 2, y se determinó la eficiencia de estabilización (EF) mediante la aplicación de la ecuación 4.

$$EF = \frac{INE_{Original} - INE_{Dosificado}}{INE_{Original}} \times 100 \quad (4)$$

2.4. Diseño experimental

Se estableció un diseño experimental factorial con cuatro variables respuesta (UF, ARP, INE, EF) y 2 factores experimentales (producto y dosis). El diseño seleccionado tiene 96 ejecuciones, con una muestra para tomada en cada ejecución. El modelo por defecto es de interacciones, de 2 factores con 34 coeficientes. Los factores experimentales se describen en la *Tabla 1*.

Tabla 1. Descripción de los factores experimentales

Factor	Nomenclatura	Descripción
Producto	P0	100 % Diésel
	P1	40 % CNSL
	P2	60 % CNSL
	P3	80 % CNSL
	P4	100 % CNSL
	PC1	Producto comercial 1
	PC2	Producto comercial 2
	PC3	Producto comercial 3
Dosis	D2	2 μ l de producto
	D4	4 μ l de producto
	D6	6 μ l de producto
	D8	8 μ l de producto

Fuente: elaboración propia

2.5. Tratamiento estadístico de los datos

Para elaborar el diseño estadístico planteado se utilizó el paquete estadístico Statgraphics Centurion XVII. Se aplicó Anova multifactorial y test de rangos múltiples, basado en la diferencia mínima significativa de Fisher (Lowest Significant Difference - LSD) con un nivel de confianza de 95 % ($\alpha = 0.05$).

3. Resultados y discusión

3.1. Características de la muestra de petróleo

Las características medidas mediante los ensayos de laboratorio, de la muestra de petróleo crudo utilizada, se muestran en la tabla 2.

El valor de la gravedad API del petróleo lo clasifica como mediano o medio (API entre 22 y 32). El porcentaje de agua y sedimentos de 0.1, indica que el petróleo contiene poca agua, es decir es un petróleo seco o limpio. El valor de API determinado coincide con el rango reportado de 20.6 a 29.4 para petróleos de diferentes pozos del Campo el Furrial (Guevara et al., 2018). El % AyS al igual que la API, varía de un pozo a otro y es función del método de producción aplicado; sin embargo el valor obtenido de 0.1 %, es consistente con los reportados para 6 pozos del Campo El Furrial, de donde proviene la muestra (Rodríguez, 2011). En cuanto a la composición SARA, se observa una mayor cantidad de compuestos saturados y aromáticos (71.7%). La composición SARA de mezclas de petróleos del campo El Furrial para el año 2015 fue reportada por Guevara et al. (2018) en 63 % de saturados

y aromáticos, el cual es un valor menor al obtenido en la presente investigación. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que la composición del petróleo varía incluso entre pozos del mismo campo y también lo hace con el tiempo, por lo que no se puede establecer una comparación y lo obtenido es representativo de la muestra utilizada. Igualmente se observó una diferencia importante entre los porcentajes de resinas y asfaltenos obtenidos, respecto a los reportados por Guevara et al. (2018), los cuales fueron de 25 y 7 % respectivamente, lo que por supuesto se debe a la complejidad composicional del petróleo, que fue mencionada anteriormente.

Tabla 2. Propiedades de la muestra de petróleo crudo

Propiedad	Valor	Unidad
Gravedad API	27.4	°API
Viscosidad a 25°C	17.7	cP
% AyS	0.1	%
% Saturados	50.5	%
% Aromáticos	21.2	%
% Resinas	5.1	%
% Asfaltenos	3.1	%
% Volátiles	20.1	%
UF	7.8±0.3	mlC7
PD	4.0±0.2	mlXileno
INE	0.51	mlXileno/mlC7

Fuente: elaboración propia.

El valor de CII calculado a través de la ecuación 1 dio como resultado 2.03, lo que caracteriza a la muestra como un petróleo crudo inestable ($CII \geq 0.9$), es decir, tiene tendencia a producir precipitación de asfaltenos (Guzmán et al., 2017). Lo anterior es consistente con lo obtenido por Guevara et al. (2018) para tres muestras de petróleo crudo pertenecientes también al campo el Furrial, las cuales mostraron valores de CII entre 3.6 y 4.1, por lo que en todos los casos se observan petróleos inestables. El UF indica que se necesitan 7.8 ± 0.3 ml de n-heptano por cada 10 ml del petróleo crudo, para iniciar la formación de agregados de asfaltenos. El valor de PD de 4.0 ± 0.2 indica que se necesitaron 4 ml de xileno para dispersar los agregados formados en el UF. El INE de 0.51 ml de xileno por ml de n-heptano, y fue menor al valor de 1.4 reportado por Marín (2019) para una muestra de 30.8 API del mismo campo petrolero. El valor de INE no puede ser comparado de manera estricta, debido a que es propio de cada petróleo crudo, por lo que aun cuando se tengan muestras del mismo campo, sus composiciones pueden ser diferentes y por ende sus INE pueden ser diferentes.

3.2. Resultados de las variables medidas

Los valores obtenidos para cada una de las variables medidas (UF, ARP, INE, EF), se muestran en la tabla 3. Se observa que el producto P0 el cual es 100 % diésel no ejerció un efecto importante, ya que sus UF fueron similares a los originales, por lo que se comprueba que el mismo no produce ningún cambio en la estabilidad de los asfaltenos, lo que se observa también en los valores de ARP e INE de 0.43 y 3.92% respectivamente. Los productos que contienen CNSL, arrojaron

valores de UF en general mayores al UF original, así mismo los INE fueron menores al original, lo que indicó que ejercen actividad inhibidora y estabilizante de los asfaltenos (Zeng et al., 2019). La mayor actividad inhibidora para los productos con CNSL, se obtuvo con el producto P3 a la dosis de 4 μl con 43.16 % y la mayor eficiencia estabilizadora se calculó para el producto P4 a la dosis de 8 μl de 75.16 %. Los productos comerciales, también mostraron actividad inhibidora en una ARP mayor para PC3 a la dosis de 4 μl con 45.30 % y eficiencia de estabilización máxima de 93.46 % para PC1 a la dosis de 8 μl . El comportamiento de cada producto depende de su composición (Lim et al., 2020), en el caso específico los productos con CNSL, difieren respecto a la concentración, lo que influye en su ARP y EF, de igual forma, los productos comerciales, aunque su composición no es aportada por las casas comerciales que las venden, también tiene diferentes composiciones, lo que se comprueba con los resultados diferentes observados.

Tabla 3. Resultados obtenidos para las variables en estudio

Producto	Dosis	UF	ARP	INE	EF
P0	2	7.8	0.43	0.49	3.92
	4	7.8	0.43	0.49	3.92
	6	7.5	0.00	0.49	3.27
	8	7.8	0.43	0.48	6.54
P1	2	8.3	6.84	0.18	64.05
	4	8.7	11.11	0.18	65.36
	6	8.3	6.84	0.17	66.67
	8	8.0	2.56	0.16	68.63
P2	2	7.3	0.00	0.20	60.13
	4	8.5	8.97	0.18	65.36
	6	9.8	26.07	0.15	70.59
	8	9.7	23.93	0.14	72.55
P3	2	9.7	23.93	0.16	68.63
	4	11.2	43.16	0.14	72.55
	6	9.5	21.79	0.16	69.28
	8	8.7	11.11	0.17	67.32
P4	2	9.2	17.52	0.16	69.28
	4	9.7	23.93	0.15	70.59
	6	10.3	32.48	0.13	73.86
	8	10.5	34.62	0.13	75.16
PC1	2	8.3	6.84	0.09	83.01
	4	8.7	11.11	0.07	86.93
	6	7.5	0.00	0.05	90.85
	8	7.0	0.00	0.03	93.46
PC2	2	7.5	0.00	0.10	81.05
	4	8.3	6.84	0.05	90.85
	6	10.0	28.21	0.07	86.27
	8	9.3	19.66	0.07	86.27
PC3	2	9.7	23.93	0.07	86.93
	4	11.3	45.30	0.04	92.81
	6	9.3	19.66	0.05	90.20
	8	8.3	6.84	0.04	91.50

Fuente: elaboración propia

La eficiencia de inhibición obtenida es consistente con la reportada por Meléndez-Álvarez et al. (2016) para una muestra de petróleo crudo de Oriente Medio, que fue en promedio entre 40.4 y 54.1 %, aunque fue una muestra de diferente composición comparada con la utilizada. Igualmente muestras de petróleo crudo provenientes de Houston, TX, tratadas con inhibidores de asfaltenos mostraron porcentajes de eficiencia entre 42.0 y 67.0 % (Kuang et al., 2019), lo que demuestra que a pesar de las diferencias de composición de las muestras, los resultados máximos obtenidos en la presente investigación están dentro de este rango. El aceite de coco reportó valores de eficiencia estabilizadora máxima de 78.60 % en una muestra de petróleo del campo Carito, Monagas, Venezuela, que es similar al máximo obtenido para el CNSL que fue de 75.55 % (Marín, 2019), la diferencia, como ya se ha mencionado, se debe a las diferencias en composición del petróleo y de los aceites vegetales utilizados. Bello, Manzano y Marín (2015) reportaron eficiencias para productos químicos dispersantes comerciales en muestras de petróleo crudo del campo El Furrial con rangos máximos entre 46.66 y 69.44 %, los cuales fueron menores a los rangos obtenidos con los productos utilizados, donde los productos formulados con CNSL tuvieron un rango entre 60.13 y 75.16 % y para los productos comerciales entre 83.01 y 93.46 %.

3.3. Resultados del análisis estadístico

El análisis Anova multifactorial aplicado al diseño experimental planteado, arrojó los resultados que se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Resultados del Anova multifactorial aplicado a las cuatro variables respuesta

Factores	Valor-p			
	UF	ARP	INE	EF
Efectos				
Bloque	0.1133	0.1133	0.6267	0.6267
A: Producto	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
B: Dosis	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Interacciones				
AB	0.0534	0.0534	0.5553	0.5553
AC	0.3335	0.3335	0.8638	0.8638
BC	0.0000	0.0000	0.0012	0.0012

Fuente: elaboración propia a partir de resultados del Statgraphics Centurion XVII.

En la tabla 4 se observa que en el caso de los bloques experimentales (repeticiones) no se obtuvo diferencia significativa (Valor-p > 0.05), lo que indica que los valores medios de las variables obtenidos entre las repeticiones fueron estadísticamente iguales, lo que da consistencia a los ensayos realizados. Los factores experimentales producto y dosis ejercieron influencia significativa sobre cada una de las variables (Valor-p < 0.05). En cuanto a las interacciones entre los factores, se observó que, interbloques (AB y AC) no fueron significativas, por lo que se puede decir que al comparar los resultados de las variables por cada repetición, estas fueron estadísticamente iguales. La interacción entre los factores (BC) sí fue significativa, por lo que no solo los factores influyen de manera individual sobre las variables, sino que también es influyente la interacción entre ellos (producto x dosis). Al comparar con el resultado reportado por Marín et al. (2016) para el aceite de *J. curcas*, se observa un resultado que no coincide con el obtenido en la presente investigación, ya que para la *J. curcas*, el porcentaje de aceite en la mezcla (Produc-

to) no influyó significativamente, solo se reportó influencia de la dosis. Lo anterior demuestra que los resultados pueden estar influidos por el tipo de aceite utilizado, además, como ya se ha mencionado, del tipo de petróleo crudo utilizado.

Para establecer el comportamiento individual del factor producto sobre las variables ARP y EF, se realizó el test LSD de Fisher, cuyos resultados se muestran en las tablas 5 y 6. En la tabla 5 se observa que en cuanto a la eficiencia inhibidora, el PC1 no mostró diferencias significativas respecto al P0, lo que indica que este producto comercial se comporta de forma similar al diésel puro. El producto P1 mostró una eficiencia mayor a los anteriores, pero baja y diferente comparado con los otros productos. Los productos P2 y PC2 no mostraron diferencias significativas, lo que indica que su efecto sobre ARP fue estadísticamente igual, a pesar de que P2 tuvo una ARP promedio mayor.

Tabla 5. Prueba LSD de Fisher para la variable ARP

Producto	Casos	Media	Sigma	Grupos
P0	12	-0.64	1.56	A
PC1	12	0.96	1.56	A
P1	12	6.84	1.56	B
PC2	12	12.71	1.56	C
P2	12	13.25	1.56	C
PC3	12	23.93	1.56	D
P3	12	25.00	1.56	D
P4	12	27.14	1.56	D

Letras diferentes representan diferencias significativas con Valor- $p < 0.05$

Fuente: elaboración propia.

Los productos con mayor ARP fueron los P3, P4 y PC3, que además no arrojaron diferencias significativas entre ellos y se observa cómo los productos con CNSL fueron los más eficientes. Se demostró, sobre la base de la eficiencia inhibidora, que los productos elaborados mezclando CNSL y diésel son posibles sustitutos de los productos químicos comerciales, sobre todo los que presentan mayores porcentajes del aceite, e incluso el aceite puro. En la evaluación de eficiencia dispersora de asfaltenos de diferentes productos aplicados a una muestra de 21 °API del campo El Furrial, Pereira et al. (2011) reportaron ARP entre 2.0 y 73.5 %, por lo que se puede decir que los resultados obtenidos en la investigación coinciden con este rango y se destaca que las mayores eficiencias obtenidas son similares e incluso mayores al producto Dodecanol, que reportó 23.7 %.

Tabla 6. Prueba LSD de Fisher para la variable EF

Producto	Casos	Media	Sigma	Grupos Homogéneos
P0	12	4.41	0.75	A
P1	12	66.18	0.75	B
P2	12	67.16	0.75	B
P3	12	69.44	0.75	C
P4	12	72.22	0.75	D
PC1	12	86.11	0.75	E
PC2	12	88.56	0.75	F
PC3	12	90.36	0.75	F

Letras diferentes representan diferencias significativas con Valor- $p < 0.05$

Fuente: elaboración propia.

El comportamiento de los productos en función a EF fue diferente a lo observado con la ARP; los productos con CNSL presentaron eficiencias menores a los productos comerciales. El diésel puro (PO) tuvo eficiencia baja y con diferencia significativa comparado con los demás productos. Las eficiencias de los productos P1 y P2 no mostraron diferencias significativas, pero fueron diferentes respecto a los demás, el resto de los productos con CNSL tuvieron EF con diferencias entre ellos, lo que indica que al aumentar el CNSL en la mezcla de 80 a 100 % la diferencia de EF fue significativa. De los productos comerciales, solo el PC1 tuvo diferencia significativa respecto a los otros dos, los cuales no presentaron diferencias, aun cuando PC3 fue el de mayor valor de EF con 90.36 %.

Al comparar la eficiencia de los productos evaluados con la eficiencia máxima reportada para un producto comercial, aplicado a un petróleo crudo ligero (36.8 °API) de Kuwait (Ghloum et al., 2019), se observó que la misma fue de 58.0 % máxima, valor inferior a lo obtenido, incluso para el producto de menos eficiencia que fue el P1 (66.18 %). Las diferencias se deben a que el petróleo de Kuwait tiene características diferentes al utilizado en la investigación, sin embargo es un hecho el que los productos elaborados con base en CNSL mostraron eficiencias que pueden superar a la de productos comerciales. Así mismo, los productos con CNSL igualaron la eficiencia máxima reportada por Kuang et al. (2019) para productos aplicados a muestras de petróleos crudos mexicanos, lo cual fue de 67.0 %. Al comparar la eficiencia de los productos elaborados con CNSL con otros aceites vegetales, se observa que están dentro de los rangos reportados por Mardani et al. (2018) para los aceites de manzanilla (64 %) y aceite de almendras dulces (82 %). Así mismo, el aceite de J. curcas reportó una eficiencia máxima de 88.33% (Marín et al., 2016) superando el máximo obtenido en esta investigación. De igual manera, el aceite de CNSL evaluado fue superado por el aceite de coco, que reportó eficiencias que llegaron hasta 93.75 % (Bello et al., 2015). La comparación entre los productos formulados con CNSL y los productos químicos mostró que en relación a la eficiencia inhibidora (ARP), los productos con CNSL fueron superiores a los comerciales, no así al comprar las eficiencias estabilizadores (EF) donde los valores mayores fueron los de los productos comerciales.

La comparación de los resultados con investigaciones precedentes es consistente con la observación de la importancia de la composición del petróleo crudo, sobre la eficiencia de los productos inhibidores/dispersantes de asfaltenos (Bello et al., 2015). Se ha investigado y establecido que el efecto de la composición está en función de la relación porcentual de los componentes SARA del petróleo y en especial la relación entre resinas y asfaltenos y entre saturados y asfaltenos (Gabrienko, Martyanov y Kazarian, 2015). Así mismo, la influencia de la composición del petróleo crudo sobre los inhibidores/dispersantes de asfaltenos se explicó, además, por la composición de los mismos asfaltenos y por el tipo de solvente utilizado para obtener el UF, es decir, los asfaltenos floculados por parafinas de menor peso molecular, son más estables que las fracciones floculadas por parafinas de mayor peso molecular (Pereira et al., 2011). En cuanto a la comparación de los costos del producto con CNSL y diésel con el de un dispersante comercial, según el portal Quiminet (2020), un litro de dispersante de asfaltenos tiene un costo promedio entre 2.3 y 3.0 US\$ por litro y en el portal Alibaba (2020) se menciona que el precio del CNSL es de aproximadamente 0.3 US\$ por litro, si se considera utilizarlo puro es evidente un ahorro entre 2.0 y 2.7 US\$ por litro de dispersante aplicado.

4. Conclusiones y recomendaciones

Los productos elaborados al mezclar CNSL y diésel, presentan tanto actividad inhibidora como eficiencia de estabilización de asfaltenos, lo que indica que el aceite es potencial alternativa para el tratamiento de los asfaltenos en el petróleo crudo.

Al comparar la eficiencia inhibidora de los asfaltenos (ARP) de los productos evaluados, se concluye que las mezclas con 80 % CNSL en diésel y el CNSL puro tienen un mejor comportamiento que los productos comerciales, al ser aplicados a la muestra de petróleo crudo estudiado y bajo las condiciones del diseño experimental aplicado.

A partir de la comparación de los productos elaborados con CNSL y los productos comerciales, basada en la eficiencia de estabilización (EF), se concluyó que los productos comerciales superan en eficiencia a los formulados con CNSL y Diésel; sin embargo, estos últimos arrojaron valores de EF que superan a las de otros productos evaluados en investigaciones precedentes, por lo que se puede considerar que los mismos presentan eficiencias estabilizantes aceptables al ser aplicadas a la muestra de crudo utilizada en la investigación.

Se recomienda continuar investigando sobre el uso del aceite de *A. occidentale* como alternativa para el tratamiento de los asfaltenos en el petróleo crudo a nivel de laboratorio, para establecer cómo influyen otras variables sobre su desempeño, tales como la temperatura, la presión y el tipo de petróleo crudo.

Bibliografía

- Abrahamsen, E. L. (2012). *Organic Flow Assurance: Asphaltene Dispersant/Inhibitor Formulation Development through Experimental Design*. Stavanger: Schlumberger Limited.
- Alibaba. (2020). Cashew Nut Shell Oil Price. Disponible en: <http://bit.do/cashewoilprice>
- Alrashidi, H., y Nasr-El-Din, H. A. (2017). Evaluation of Eco Friendly Bio-Oil Dispersants on the Inhibition of Asphaltene Precipitation in a Kuwaiti Crude Oil. In *the Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, SPE-188232-MS*. Abu Dhabi. doi: 10.2118/188232-ms
- Alrashidi, H.; Afra, S. y Nasr-El-Din, H. A. (2019). Application of Natural Fatty Acids as Asphaltenes Solvents with Inhibition and Dispersion Effects: A Mechanistic Study. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 172, 724-730. doi: 10.1016/j.petrol.2018.08.066
- Ashoori, S.; Sharifi, M.; Masoumi, M. y Salehi, M. M. (2017). The Relationship between SARA Fractions and Crude Oil Stability. *Egyptian Journal of Petroleum*, 26, 209–213. doi: 10.1016/j.ejpe.2016.04.002
- ASTM D287. (2012). *Standard Test Method for API Gravity of Crude Petroleum and Petroleum Products (Hydrometer Method)*. USA: American Society of Testing Materials.
- ASTM D2007. (2011). *Standard Test Method for Characteristic Groups in Rubber Extender and Processing Oils and Other Petroleum-Derived Oils by the Clay-Gel Absorption Chromatographic Method*. USA: American Society of Testing Materials.
- ASTM D2196. (2018). *Standard Test Methods for Rheological Properties of Non-Newtonian Materials by Rotational Viscometer*. USA: American Society of Testing Materials.
- ASTM D4007. (2016). *Standard Test Method for Water and Sediment in Crude Oil by the Centrifuge Method (Laboratory Procedure)*. USA: American Society of Testing Materials.
- Bello, Y. B.; Manzano, J. R. y Marín, T. D. (2015). Análisis comparativo de la eficiencia dispersora de asfaltenos de productos a base de aceite de coco (*Cocos nucifera*) como componente activo y dispersantes comerciales aplicados a muestras de petróleo del Campo el Furrial. *Revista Tecnológica Espol – RTE*, 28(2), 51-61. Estado Monagas, Venezuela.
- Delgado, J.G. (2015). *Precipitación de asfaltenos*. Mérida, Venezuela: Universidad de los Andes.

- Elochukwu, O. H.; Saaid, I. M. y Pilus, R. M. (2014). Organic Deposit Remediation Using Environmentally Benign Solvents: A Review. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 9(10), 1930-1935.
- Gabrienko, A. A.; Martyanov, O. N. y Kazarian, S. G. (2015). Effect of Temperature and Composition on the Stability of Crude Oil Blends Studied with Chemical Imaging In Situ. *Energy & Fuel*, 29(11), 7114-7123. doi: 10.1021/acs.energyfuels.5b01880
- Ghloum, E. F.; Rashed, A. M.; Safa, M. A.; Sablit, R. C. y Al-Jouhar, S. M. (2019). Mitigation of Asphaltene Precipitation Phenomenon Via Chemical Inhibitors. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 175, 495–507. doi: 10.1016/j.petrol.2018.12.071
- Guevara, S.; Parra, M.; Malavé, V.; Castillo, L. y Márquez, I. (2018). Efecto de la implementación del método de levantamiento artificial por gas sobre la composición del crudo del campo El Furrial. *Revista Tecnológica Espol – RTE*, 31(1), 1-12,
- Guzmán, R.; Ancheyta, J.; Trejo, F. y Rodríguez, S. (2017). Methods for Determining Asphaltene Stability in Crude Oils. *Fuel*, 188, 530–543. doi: 10.1016/j.fuel.2016.10.012
- Hasanvand, M. Z.; Montazeri, M.; Salehzadeh, M.; Amiri, M. y Fathinasab, M. (2018). A Literature Review of Asphaltene Entity, Precipitation, and Deposition: Introducing Recent Models of Deposition in the Well Column. *Journal of Oil, Gas and Petrochemical Sciences*, 1(3), 83-89. doi: org/10.30881/jogps.00016
- Kanehashi, S.; Masuda, R.; Yokoyama et al. (2015). Development of a Cashew Nut Shell Liquid (CNSL)-based Polymer for Antibacterial Activity. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(45), 42725-42734. doi: 10.1002/APP.42725
- Kraiwattanawong, K.; Fogler, H. S.; Gharfeh, S. G. et al. (2009). Effect of Asphaltene Dispersants on Aggregate Size Distribution and Growth. *Energy & Fuels*, 23, 1575–1582. doi: 10.1021/ef800706c
- Kuang, J.; Meléndez-Álvarez, A. A.; Yarbrough, J. et al. (2019). Assessment of the Performance of Asphaltene Inhibitors Using a Multi-Section Packed Bed Column. *Fuel*, 241, 247–254. doi: 10.1016/j.fuel.2018.11.059
- Kusrini, E.; Mawarni, D. P.; Mamat, M.; Prasetyanto, E. A.; Usman, A. (2018). Comparison of Antibacterial Activity in Ethanol Extract and Essential Oil of *Citrus sinensis* (L.) Peels Obtained by Soxhlet and Distillation Methods. In *The International Fundamentum Sciences Symposium, Terengganu, Malaysia*. doi: 10.1088/1757-899X/440/1/012028
- Li, H.; Zhang, J.; Xu, Q. et al. (2020). Influence of Asphaltene on Wax Deposition: Deposition Inhibition and Sloughing. *Fuel*, 266, 117047-117055. doi: 10.1016/j.fuel.2020.117047
- Lim, S. H.; Go, K. S.; Kwon, E. H.; Nho, N. S., y Lee, J. G. (2020). Investigation of Asphaltene Dispersion Stability in Slurry-Phase Hydrocracking Reaction. *Fuel*, 271, 117509-117517. doi: 10.1016/j.fuel.2020.117509
- Mardani, E.; Mokhtari, B. y Soltani, B. (2018). Comparison of the Inhibitory Capacity of Vegetable Oils, and their Nonionic Surfactants on Iran Crude Oil Asphaltene Precipitation Using Quartz Crystal Microbalance. *Petroleum Science and Technology*, 36(11), 744-749. doi: 10.1080/10916466.2018.1445103
- Marín, T., Marcano, S. y Febres, M. (2016). Evaluación del aceite de *Jatropha curcas* como aditivo dispersante de asfaltenos en un crudo del campo el Furrial, Venezuela. *Ingeniería-Revista Académica de la Facultad de Ingeniería*, 20(2), 98-107.
- Marín, T. (2019). El aceite de coco (*Cocos nucifera*) como estabilizante de asfaltenos en un crudo del Estado Monagas, Venezuela: Efecto de la temperatura. *Ingeniería y Desarrollo*, 37(2), 290-305.
- Martins, R. G.; Martins, L. S. y Santos, R. G. (2018). Effects of Short-Chain n-Alcohols on the Properties of Asphaltenes at Toluene/Air and Toluene/Water Interfaces. *Colloids Interfaces*, 2(13), 1-9. doi: 10.3390/colloids2020013
- Meléndez-Álvarez, A. A.; Garcia-Bermudes, M.; Tavakkoli, M. et al. (2016). On the Evaluation of the Performance of Asphaltene Dispersants. *Fuel*, 179, 210–220. doi: 10.1016/j.fuel.2016.03.056
- Nunes, M.; Yuan, L. L.; Weingart, D. et al. (2019). The Use of Cashew Nut Shell Liquid (CNSL) in PP/HIPS Blends: Morphological, Thermal, Mechanical and Rheological Properties. *Materials*, 12, 1904-1928. doi: 10.3390/ma12121904

- Pereira, J. C.; Delgado-Linares, J.; Briones, A. et al. (2011). The Effect of Solvent Nature and Dispersant Performance on Asphaltene Precipitation from Diluted Solutions of Instable Crude Oil. *Petroleum Science and Technology*, 29(23), 2432-2440. doi: 10.1080/10916461003735061
- Quiminet (2020). Precios de dispersantes de asfaltenos. Disponible en: <http://bit.do/asphaltenesprice>
- Riss, H.; Carniel, T. K.; Farina, C. F. et al. (2015). Extração de óleo de chia (*Salvia hispanica* L.) via Soxhlet. In *XI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica*. Campinas, Brasil.
- Rodríguez, O.J. (2011). *Evaluación de la productividad en el campo el Furrial posterior a las estimulaciones matriciales no reactivas* (Tesis de pregrado). Caracas, Venezuela: Universidad Central.
- Sánchez, L., Chávez, J., Ríos, L. A., y Cardona, S. M. (2015). Evaluación de un Antioxidante Natural extraído del Marañón (*Anacardium occidentale* L.) para mejorar la Estabilidad Oxidativa del Biodiesel de *Jatropha*. *Información Tecnológica*, 26(6), 19-30. doi: 10.4067/S0718-07642015000600004
- Silva, F. B.; Guimarães, M.; Seidl, P. R., y García, M. (2013). Extraction and Characterization (compositional and thermal) of Asphaltenes from Brazilian Vacuum Residues. *Brazilian Journal of Petroleum and Gas*, 7(3), 107-118. doi: 10.5419/bjpg2013-0009
- Taiwo, E. A. (2015). Cashew Nut Shell Oil — A Renewable and Reliable Petrochemical Feedstock. In *Advances in Petrochemicals*. doi: 10.5772/61096
- Zeng, C.; Brunner, M.; Li, H.; Zhang, D. y Atkin, R. (2019). Dissolution and Suspension of Asphaltenes with Ionic Liquids. *Fuel*, 238, 129–138. doi: 10.1016/j.fuel.2018.10.070

