

CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN:

Biotecnología, Seguridad Alimentaria,
Tecnología e Innovación

I Congreso Internacional en Ciencia,
Tecnología e Innovación
Avances académicos, científicos y tecnológicos
para el desarrollo sustentable de la sociedad

ISBN: 978-958-9009-77-2

UNIVERSIDAD
INCCA
DE COLOMBIA



UNIVERSIDAD
INCCA[®]
DE COLOMBIA

UNIVERSIDAD INCCA DE COLOMBIA
CIENCIA TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN: Biotecnología, Seguridad Alimentaria y
Tecnología e Innovación
www.unincca.edu.co
Bogotá D.C., - Colombia
2022

REPRESENTANTE LEGAL

Dr. Álvaro Ávila Quintero

RECTORA

Dra. Susan Andrea Rodríguez Rodríguez

VICERRECTORA ACADÉMICA

Dra. Diana María Rojas Orduz

EDITORA

M.Sc. María Alexandra Fajardo Perdomo – Coordinadora de Investigación

COMITÉ CIENTÍFICO/ACADÉMICO

M.Sc. Diego Francisco Becerra Cruz
Ph.D. Edison Chavarro Mesa
Ph.D. Jhoan Eduard Pérez Velásquez
Ing. Jhony Alexander Pérez Velásquez
Ph.D. Jorge Alberto Díaz Martínez
M.Sc. José Daniel Duarte Flórez
M.Sc. Luis Fernando Díaz Barrios
M.Sc. María Alexandra Fajardo Perdomo
Ph.D. Oscar Javier Mahecha Jiménez
M.Sc. Rodolfo Elías Arce Lozano
Esp. Sergio Yesid Aroca Pedroza
M.Sc. Wesles Sedano Aguilar

Corrección de estilo

Ana María Albaracín Quintero
Diego Alejandro Sacristán Ocampo

Diseñadores

María Camila Rodríguez Rincón
Clara Inés Escobar Garzón

ISBN: 978-958-9009-77-2

CIENCIA TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN: Biotecnología, Seguridad Alimentaria y Tecnología e Innovación

AUTORES

Alejandro Arango Correa
Alexander Pasquel Cajas
Alfonso Eugenio Capacho
Alixdey Andrea Gutiérrez Cárdenas
Amancio Rojas Cotrina
Amanda Margarita Hernández Segovia
Ana Francisca Gonzalez Pedraza
Ana Graciela Lancheros Díaz
Andrés Felipe Vargas Ramírez
Angie I. Escobar Vargas
Carlos Alberto Peláez Jaramillo
Cindy Johanna Martínez Saavedra
Cristina Úsuga Monroy
Dagoberto Lozano Rivera
Daisy A. Gómez Ruiz
Danna Lizbeth Contreras Meza
Fabián Armando Barbosa Páez
Gabriel Peña Rodríguez
Gladis Estela Morales Mira
Gloria Y. Sánchez Zapata
Gustavo A. Mendoza Fandiño
Héctor Camilo Alvernia Verjel
Jefferson Parra Capera
Jenniffer Paola Aguilera Rocha
Jessica Katherine Lamus Sanguino
Jorge Enrique Fonseca
Juan Gabriel Bustos Aldana
Juan Pablo Flórez Torres
Judith Elena Camacho Kurmen
Laura Andrea Trejos Gómez

Leonardo Fabio Ramírez Campo
Leónides Castellanos González
Luis Alfredo Varela Reyes
Luis Armando Quevedo Cárdenas
Luis Francisco Becerra Galindo
Luz Karina Corzo Pacheco
Madelene Daniela Quevedo Guerrero
Marco Villavicencio Cabrera
Marlon Alexis Quenoran Chara
Marta Liliana Acevedo Betancourth
Martin Elías Rodríguez
Miguel Ángel Ferreira
Natalia Rodríguez Rodríguez
Nelson Geovani Serrano Ibarra
Nicolás Zapata Ramirez
Nixon Oscar Rodríguez Parra
Nora Eugenia Restrepo Sánchez
Pedro Luis Muñoz Ochoa
Roberth Eder Valera Restrepo
Rodolfo Elías Arce Lozano
Rubén Alarcón Pabón
Sergio Mauticio Betancur Hincapié
Valeria Aroca Paz
Vivian Daniela Pineda Amaya
Wilmer Santiago Lasso Cussi
Yasser Alfonso Penagos Obando
Yerson Adrian Insuasty Rosero
Yina Paola Ortega Santiago
Yojan Roy Alarcon Cajas

Primera edición, Bogotá, noviembre de 2022

Editorial Universidad Incca

Vicerrectoría Académica

Dirección de Investigación

Carrera 13 # 24-15

Bogotá D.C., Colombia

investigacion@unincca.edu.co – publique@unincca.edu.co

<https://eventos.unincca.edu.co/publicaciones>

ISBN: 978-958-9009-77-2

Prólogo

La era moderna transformó las dinámicas sociales de manera vertiginosa. En ésta, el avance en la comprensión de la realidad a través de la razón, cimentó las bases que en la actualidad sostienen el desarrollo de la ciencia de forma mucho más estructurada, promoviendo la construcción del conocimiento a partir de una investigación más introspectiva y de impacto, lo que ha permitido atender de forma directa las necesidades y dificultades que surgen en medio de la realidad.

En ese sentido, es menester entender la ciencia no sólo como un posibilitador para la comprensión de los diferentes fenómenos sociales, artificiales y naturales, sino también, como un espacio para la reflexión continua que origine la búsqueda de soluciones aplicables a diferentes problemáticas, generando un marco para que la tecnología se instaure y se desarrolle como un vehículo de transformación. Esta dinámica ha posibilitado que la innovación emerja como un modo de cualificar y perfeccionar dicho marco y, por lo tanto, la construcción, combinación y aplicación de la tecnología.

Es así como la ciencia, la tecnología y la innovación convergen con el fin de establecer una ruta para que la sociedad, a través de la praxis, implante transformaciones tangibles y provechosas para potenciar la calidad de vida de cada uno de sus integrantes. Por lo anterior, es de gran relevancia compilar estudios y experiencias que pretenden aportar al desarrollo no solo intelectual y teórico de estos temas, sino también, a la construcción individual de los sujetos para que en su conjunto, transformen de manera positiva la comprensión y el desarrollo de la sociedad.

En definitiva, una propuesta de esta envergadura, recopilada a través de investigaciones de un grupo de autores que asumen una posición directa frente a la importancia que la academia mantiene en la construcción del tejido social, aporta resultados que promueven el desarrollo del pensamiento crítico sobre temas fundamentales en torno a la ciencia, la tecnología y la innovación.

SUSAN RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ

Rectora

Universidad INCCA de Colombia

Contenido	
Prólogo	5
Introducción	11
PRIMERA PARTE	
BIOTECNOLOGÍA Y MANEJO DE RECURSOS NATURALES	15
CAPÍTULO I Aplicación de software DMFit usando el modelo matemático de Baranyi y Roberts al crecimiento celular de <i>H. pluvialis</i>	19
Natalia Rodríguez Rodríguez	
Judith Elena Camacho Kurmen	
CAPÍTULO II Aprovechamiento de Saponinas procedentes de fibra de Fique, como estrategia de producción limpia, del RIK	47
Luz Karina Corzo Pacheco	
Roberth Eder Valera Restrepo	
Martin Elías Rodríguez	
Leonardo Fabio Ramírez Campo	
CAPÍTULO III Caracterización de pretratamientos fisicoquímicos en PP-PET para su posible biodegradación por medio de bacterias	69
Nicolás Zapata Ramírez	
Andrés Felipe Vargas Ramírez	
Alejandro Arango Correa	
CAPÍTULO IV Caracterización del agua para riego en 15 fincas agrícolas del municipio Ocaña, Norte de Santander	99
Ana Francisca González-Pedraza	
Leónides Castellanos González	
Alfonso Eugenio Capacho	
CAPÍTULO V Desarrollo de Pastas Cementantes Fosforescentes usando Geopolímeros y Aluminatos de Estroncio para aplicaciones medioambientales	115
Jessica Katherine Lamus Sanguino	
Danna Lizbeth Contreras Meza	
Gabriel Peña Rodríguez	

CAPÍTULO VI Determinación de condiciones de crecimiento y producción de astaxantina aplicando modelo primario en *Haematococcus pluvialis* 131

Vivian Daniela Pineda Amaya
 Madelene Daniela Quevedo Guerrero
 Ana Graciela Lancheros Díaz

CAPÍTULO VII Efecto del Campo Magnético en la Electro-descontaminación de suelos arcillosos contaminados con Plomo 171

Miguel Ángel Ferreira
 Nelson Geovani Serrano Ibarra
 Gabriel Peña Rodríguez

CAPÍTULO VIII Evaluación de tres variedades de arroz irradiado en Colombia sometido a estrés abiótico 191

Rodolfo Elías Arce Lozano
 Cindy Johanna Martínez Saavedra
 Luis Francisco Becerra Galindo
 Jenniffer Paola Aguilera Rocha
 Nixon Oscar Rodríguez Parra
 Luis Armando Quevedo Cárdenas

CAPÍTULO IX Identificación de variantes genéticas en exón 27 del gen *BRCA2* en caninos con neoplasias de glándula mamaria 215

Amanda Margarita Hernández Segovia
 Angie I. Escobar Vargas
 Daisy A. Gómez Ruiz
 Cristina Úsuga Monroy
 Gustavo A. Mendoza Fandiño
 Gloria Y. Sánchez Zapata

SEGUNDA PARTE

SEGURIDAD ALIMENTARIA 235

CAPÍTULO X Modelo “Cradle to Cradle” para grasas saturadas: un gran paso hacia la bioeconomía circular 239

Yina Paola Ortega Santiago
 Dagoberto Lozano Rivera
 Fabián Armando Barbosa Páez
 Héctor Camilo Alvernia Verjel

CAPÍTULO XI Solubilización de la Roca Fosfórica con Ácido Oxálico, Modelo de Fertilización para una Agricultura Sostenible..... 263

Laura Andrea Trejos Gómez
 Gladis Estela Morales Mira
 Martha Liliana Acevedo Betancourth
 Sergio Mauricio Betancur Hincapié
 Carlos Alberto Peláez Jaramillo
 Nora Eugenia Restrepo Sánchez

TERCERA PARTE

TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN 291

CAPÍTULO XII Simulador desactivación y neutralización de artefactos explosivos para entrenamiento en la Escuela de Ingenieros Militares..... 293

Luis Alfredo Varela Reyes
 Yasser Alfonso Penagos Obando
 Jorge Enrique Fonseca Becerra
 Juan Gabriel Bustos Aldana
 Rubén Alarcón Pabón
 Juan Pablo Flórez Torres

CAPÍTULO XIII Diseño de un sistema de recarga solar para sistemas de movilidad eléctrica unipersonal 323

Pedro Luis Muñoz Ochoa
 Alixdey Andrea Gutiérrez Cárdenas
 Jefferson Parra Capera

CAPÍTULO XIV Una mirada a las Telecomunicaciones y las TIC. Su expresión en el proceso pedagógico universitario..... 341

Alexander Frank Pasquel Cajas

Marco Villavicencio Cabrera

Amancio Ricardo Rojas Cotrina

Yojan Roy Alarcon Cajas

CAPÍTULO XV Buscopoli Motor de Búsqueda basado en tecnologías semánticas para el SIUMAR..... 359

Marlon Alexis Quenoran Chara

Valeria Aroca Paz

Yerson Adrian Insuasty Rosero

Wilmer Santiago Lasso Cussi

Introducción

Desarticular por completo los conceptos de Ciencia, Tecnología e Innovación es un despropósito. Éstos convergen en una sinergia tal, que directamente se sustentan para construirse en medio de un mundo globalizado que exige: la construcción del conocimiento como fuente del desarrollo social y del capital, la tecnificación de ese conocimiento y el desarrollo de modelos y estructuras innovadoras que lo enmarquen. Asimismo, es relevante precisar que, si bien los anteriores conceptos se han estructurado de forma rigurosa en los últimos siglos, en tanto se relacionan con la evolución de la humanidad, no se identifica una mayor conciencia sobre su aplicación.

En ese marco, la ciencia es entendida como ese cúmulo de conocimientos construidos sistemáticamente a través de la historia, para responder a las realidades que han suscitado diferentes momentos, sociedades y sus culturas. Ésta se constituye como la base y la plataforma que nutre e impulsa constantemente el espíritu investigativo y, por lo tanto, al conjunto de nociones y conocimientos que se condensan frente al adelantamiento de la tecnología y la innovación.

Por su parte, la idea de la tecnología se percibe como reciente debido a que es un concepto que se ha desarrollado con fuerza desde el último siglo, pero que, en retrospectiva, siempre ha hecho parte de la evolución del ser humano en su construcción como sujeto, de su sociedad y de su visión de mundo. Así, la tecnología se establece como ese conjunto de conocimientos técnicos y organizados que en general buscan atender a problemáticas o necesidades de la humanidad. Este hecho liga intrínsecamente a la tecnología con la ciencia y allí, cada una se alimenta a partir del progreso de la otra haciéndolas crecer a la par.

Es esencial entender que las dinámicas generadas en torno a la ciencia y a la tecnología, así como su estructuración y constante actualización, se deben a un fundamento rector: la innovación. Ésta es la que provee el espíritu inventivo y transformador, erigiéndose como facilitadora para responder y brindar resolución a una problemática o necesidad, siempre fundada en la creatividad, el mejoramiento y la optimización.

Dicho esto, la ciencia, la tecnología y la innovación son responsables en gran medida de la construcción del tejido social y, por consiguiente, están vinculadas inherentemente a la academia. Por lo tanto, la Universidad INCCA de Colombia reconoce que el

desarrollo de estas categorías es un ejercicio fundamental en los procesos de formación de sujetos íntegros que a través de su práctica profesional, impacten positivamente en su entorno. En tal sentido, por medio de espacios académicos como el congreso de Ciencia, Tecnología e innovación, se propende por sustentar a través de ponencias y mesas de trabajo, la discusión y reflexión sobre dichos temas.

De ahí que, a través de una colección de estudios, reflexiones e intercambio de experiencias orientadas a responder a una serie de interrogantes suscitados en contextos y ambientes próximos, se condense este texto de gran relevancia para continuar desarrollando nociones de los temas planteados y reconocer su influencia en la vida diaria. Este texto fue esbozado con claridad y enfoque técnico para garantizar el acceso de diferentes públicos, a quienes presenta tres partes denominadas: (i) Biotecnología y manejo de recursos naturales; (ii) Seguridad alimentaria; y, (iii) Tecnología e innovación.

La primera parte, Biotecnología y manejo de recursos naturales, se presenta como la más extensa. Condensa una gran cantidad de capítulos alrededor de la biotecnología como área de investigación, desarrollándola como un vehículo que puede contrarrestar las diferentes problemáticas propias de la contaminación ambiental y la seguridad alimentaria. En este respecto, reúne una serie de estudios que pretenden brindar una perspectiva diferencial frente a cómo comprender y atender estos flagelos que en suma, afectan directamente la calidad de vida de las sociedades. Igualmente, propende por proveer de herramientas para sustentar estos temas desde de la academia para así, a través de ésta, alimentar el sector empresarial e industrial a fin de que se integren a la dinámica que exige la globalización, pero con base en fundamentos de responsabilidad social.

La segunda parte, Seguridad alimentaria, desarrolla en principio, una búsqueda sobre la concienciación de la alimentación no solo como una necesidad biológica, sino como un proceso fundamental para el desarrollo óptimo de cada sujeto y cómo esa noción incide directamente en la construcción de las sociedades. En ese orden de ideas, los capítulos que desarrolla este apartado propenden por generar un marco que establezca criterios, modelos y rutas para la transformación y el desarrollo de las industrias alimentarias y sus conexos, con base en la producción sostenible. Además, resalta la importancia de la

seguridad alimentaria a partir de la accesibilidad permanente a los alimentos, su calidad, transformación y su manejo de manera segura y confiable.

La tercera parte, Tecnología e innovación, contiene una serie de capítulos orientados a renovar diferentes contextos a través de propuestas investigativas que se sustentan en la tecnificación de sistemas y la inventiva. Lo anterior deja en evidencia cómo la tecnología facilita la resolución de problemáticas y necesidades que surgen en la cotidianidad. Asimismo, se asume la construcción, el desarrollo y la aplicabilidad de ésta bajo una responsabilidad social que respete las libertades, el medio ambiente y la salud. Para esto, la innovación ha permitido valorar la injerencia de la tecnología en la vida de los individuos y replantear a partir de la creatividad, formas que permitan el diálogo entre el ser y las tecnologías.

En suma, el libro Ciencia tecnología e innovación: Biotecnología, Seguridad Alimentaria y Tecnología e Innovación presenta una serie de investigaciones que se enmarcan en las exigencias actuales de la sociedad, las cuales apuntan hacia la conservación y correcto manejo de los recursos naturales, la producción, distribución y consumo sostenible de los alimentos y el desarrollo de la tecnología para la transformación de problemáticas, pero que a su vez, conserve la esencia del ser humano.

Editorial Universidad INCCA

PRIMERA PARTE

BIOTECNOLOGÍA Y MANEJO DE RECURSOS NATURALES

Durante el I Congreso Internacional en Ciencia, Tecnología e Innovación, auspiciado, por la Universidad INCCA de Colombia se presentaron múltiples trabajos de investigación en las áreas de biotecnología, manejo de recursos naturales, seguridad alimentaria, tecnología e innovación. Mencionados trabajos, resultan tan variados desde sus aplicaciones y resultados, como también, los participantes, provenientes de distintas partes de Colombia.

Es importante resaltar que en la actualidad el desarrollo económico e industrial se presenta como un reto, debido, a las afectaciones y el deterioro de nuestro medio ambiente con relación a algunas actividades antrópicas. Es así como, la biotecnología ambiental puede entenderse como un área de investigación que se ocupa del uso y aplicación de diferentes técnicas biológicas para la prevención y/o resolución de problemas derivados de la contaminación ambiental. Diferentes problemas ambientales asociados a la biotecnología ambiental se convierten en elementos a considerar en las estrategias de gestión ambiental. En el caso de las empresas, pueden representar nuevas oportunidades y ventajas competitivas para aquellas que adopten o incluyan sistemas productivos verdes hacia un desarrollo sostenible. Las mayores diferencias en torno al tema del desarrollo sostenible residen en saber qué se debe sostener y qué se debe desarrollar.

Entretanto, otro aspecto a tratar durante el congreso son las aplicaciones biotecnológicas vistas en la agricultura, en relación, con seguridad alimentaria. Alrededor de este tema cabe hacer una reflexión sobre cómo asegurar la disponibilidad alimenticia para las generaciones futuras de seres humanos. La evolución de la agricultura, a lo largo de los años, ha incrementado el uso de agroquímicos y monocultivos, provocando riesgos para la biodiversidad y la salud humana. Sin embargo, con los avances en el campo de la biotecnología verde, se ha obtenido notables mejoras en cuanto al desarrollo de las plantas, un aumento de la productividad y, en consecuencia, de la rentabilidad de los productores, una importante reducción de costos, genotipos de mejor calidad y mayor valor nutricional, un aumento en la variabilidad genética, desarrollo acelerado de la agroindustria, entre otras ventajas derivadas del mejoramiento genético en la agricultura. Las modernas técnicas utilizadas para remediar la situación actual de explotación agrícola aún requieren estudios más profundos sobre sus impactos, especialmente en lo que respecta al medio ambiente, la

sociedad y la salud humana, pero sin descuidar los beneficios visibles que se derivan de ellos. Intentamos demostrar el proceso de modernización de la agricultura, el uso de la biotecnología y sus consecuencias, comprendiendo los impactos negativos y los reflejos positivos¹.

Es así como, la ciencia, tecnología e innovación (CTeI) ha cobrado relevancia en estos últimos tiempos. La necesidad de crecer y ser competitivos en el escenario mundial es y seguirá siendo prioritario dentro de las agendas de trabajo para las instituciones de Educación Superior IES, entidades gubernamentales e industria privada. De esta manera, se presenta adelantos de investigaciones relacionadas con el uso de herramientas tecnológicas para dar solución a problemas ambientales, de salud e industria, evidenciándose la aplicabilidad de estos recursos en la actualidad.

Finalmente, este puede ser un valioso material bibliográfico de consulta para sus investigaciones en curso y futuras, entendiendo, la importancia de cada uno de los manuscritos aquí consignados, asimismo, las interacciones interpersonales que se pudieron dar durante el congreso.

EDISSON CHAVARRO MESA¹

Docente Biología

Universidad INCCA de Colombia

¹ Biólogo, MSc. en Ciencias Agrarias, línea de profundización-Fitopatología y PhD. en Ciencias Agrarias, línea de profundización-Genética y Mejoramiento de Plantas. Docente tiempo completo, Facultad de Ciencias Básicas de la Universidad Tecnológica de Bolívar. Experiencia en el estudio del hongo fitopatógeno *Rhizoctonia solani*, asimismo, origen y emergencia de otros agentes fitopatógenos y su impacto en los agroecosistemas. Interés en el uso de la bioinformática para el análisis de datos biológicos. Así como, las aplicaciones de inteligencia artificial para la identificación de los fitopatógenos y predicción de enfermedades en los cultivos. echavarro@utb.edu.co

Referencias bibliográficas

Carvalho J. K. & Panattab S. A. (2021). Revolução Biotecnológica e os Reflexos da Modernização Agrícola. *Ensaio e Ciência*, 25(5), pp. 682-687. DOI: <https://doi.org/10.17921/1415-6938.2021v25n5-espp682-687>

Aplicación de software DMFit usando el modelo matemático de Baranyi y Roberts al crecimiento celular de *H. pluvialis*

Application of DMFit software using the mathematical model of Baranyi and Roberts to cell growth of H. pluvialis

Natalia Rodríguez Rodríguez²
Judith Elena Camacho Kurmen³

Resumen

La astaxantina es un carotenoide producido por la microalga *Haematococcus pluvialis*, acumulando hasta un 3 % de este en peso seco, lo cual se realiza bajo condiciones de estrés, como el aumento de luz y la limitación de nutrientes. En el estudio, se evaluó y empleó el modelo Baranyi-Roberts para describir la cinética de crecimiento de *Haematococcus pluvialis* bajo diferentes condiciones de estrés. *H. pluvialis* se cultivó en medio RM, BBM, RM con deficiencia de nitrógeno, RM con deficiencia de fosfatos, y medio OHM combinado con diferentes intensidades de luz. Cada experimento se realizó por triplicado. El crecimiento celular se determinó utilizando el conteo con cámara de Neubauer. Los resultados revelaron que el modelo de Baranyi-Roberts se ajustaba mejor ($R^2: 0,984$) a los datos experimentales del crecimiento de *H. pluvialis* en el estudio cuyas condiciones de cultivo fueron: Medio OHM, fotoperiodo 18:6 luz/oscuridad, luz blanca por medio de lámparas fluorescentes con irradiancia de 65 luxes, pH 6,8, agitación 100 rpm, aire filtrado a una velocidad de 0,1 vvm y temperatura $20\text{ }^\circ\text{C} \pm 2$ por un periodo de 21 días de cultivo en el biorreactor Tecferm de 5 L, obteniéndose una mayor velocidad de crecimiento (0,77 cel/día). Los hallazgos de este estudio de modelado podrían utilizarse en el escalamiento de la producción de *H. pluvialis* y la obtención de sus bioproductos.

Palabras clave: microalga, carotenoide, DMFit, modelo matemático de Baranyi y Roberts.

² Bacterióloga y Laboratorista Clínico. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca. Bogotá, Colombia. <https://orcid.org/0000-0003-2353-3371>. nataliarr.21@gmail.co

³ Química Farmacéutica. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca. Bogotá, Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-8880-1501>. jelenacamacho@unicolmyor.edu.co.



Abstract

Astaxanthin is a carotenoid produced by the microalgae *Haematococcus pluvialis*, accumulating up to 3% of it in dry weight, which occurs under stress conditions, such as increased light and nutrient limitation. In the study, the Baranyi-Roberts model was evaluated and used to describe the growth kinetics of *Haematococcus pluvialis* under different stress conditions. *H. pluvialis* was cultured in RM, BBM, RM with nitrogen deficiency, RM with phosphate deficiency, OHM medium combined with different light intensities. Each experiment was performed in triplicate. Cell growth was determined using Neubauer chamber counting. The results revealed that the Baranyi-Roberts model fitted better ($R^2: 0.984$), to the experimental data of the growth of *H. pluvialis* in the study whose culture conditions were: OHM medium, photoperiod 18:6 light/darkness, light white by means of fluorescent lamps with irradiance of 65 luxes, pH 6.8, agitation 100 rpm, filtered air at a speed of 0.1 vvm and temperature $20\text{ }^\circ\text{C} \pm 2$ for a period of 21 days of culture in the Tecferm bioreactor of 5 L, obtaining a higher growth rate (0.77 cells/day). Findings from this modeling study could be used in scaling up *H. pluvialis* production and obtaining its bioproducts.

Keywords: microalgae, carotenoid, DMFit, mathematical model of Baranyi and Roberts.



Introducción

Entre las microalgas comercialmente importantes, *H. pluvialis* es la fuente más rica de astaxantina natural que se considera como "súper antioxidante". La astaxantina natural producida por *H. pluvialis* tiene una capacidad antioxidante significativamente mayor que la sintética. La astaxantina tiene importantes aplicaciones en las industrias de nutraceuticos, cosméticos, alimentos y acuicultura (Shah et al., 2016).

El crecimiento de las microalgas y su composición bioquímica se ven fuertemente afectados por condiciones ambientales como la disponibilidad de nutrientes, fuentes de carbono inorgánico, intensidad de luz, fotoperiodos, color de luz, distribución de la luz, pH y temperatura. Por lo tanto, el uso de los modelos matemáticos que tienen la capacidad de determinar parámetros cinéticos importantes para valorar el comportamiento de los cultivos de la microalga en diferentes condiciones de crecimiento ayudarán a: optimizar el rendimiento de los procesos, las condiciones de funcionamiento y los sistemas de cultivo, para así seleccionar las condiciones adecuadas de cultivo de la microalga *H. pluvialis* y de producción de astaxantina de manera eficiente.

Las curvas de crecimiento generadas en el cultivo de la microalga a condiciones estándar y bajo factores de estrés permitirán estimar los parámetros cinéticos de crecimiento, usando modelos matemáticos como el de Baranyi y Roberts. Los cuales proporcionan valores cuantitativos para comprender diferentes aspectos de la fisiología y del crecimiento de las microalgas, como las diferentes fases y su duración, la máxima velocidad específica de crecimiento ($\mu_{\text{máx}}$), la máxima biomasa de microalga en conteo celular (células/mL) o peso seco (gr), el tiempo de duplicación (Td), determinación de la concentración de proteína, determinación de clorofila ($\mu\text{mg/mL}$), medida de carbón orgánico total y los productos obtenidos ($\mu\text{g/mL}$ de astaxantina), para establecer las condiciones adecuadas de crecimiento para esta microalga y de producción de astaxantina, paso fundamental para su explotación industrial.

Ortiz-Moreno et al. (2020), desarrollaron un estudio con microalgas, en el que se evaluaron cuatro modelos (Baranyi-Roberts, Gompertz Modificado, Logístico Modificado y Richards) y se emplearon para describir la cinética de crecimiento de *Nostoc ellipsosporum* con diferentes longitudes de onda de luz. *N. ellipsosporum* creció en medio líquido BG-11 por 9 días, usando un fotoperiodo de 12 horas y los siguientes tratamientos: luz blanca (400-800 nm), luz roja (650-800 nm), luz amarilla (550-580 nm) y luz azul (460-480 nm). Los



resultados revelaron que el modelo Baranyi-Roberts se ajustó mejor a los datos experimentales de crecimiento de *N. elliposporum* en los cuatro tratamientos. Los hallazgos de este estudio de modelación se pueden usar en diversas aplicaciones biotecnológicas que requieran la producción de *N. elliposporum* y sus bioproductos.

Halmi et al. (2014), estudiaron la cinética de crecimiento de la microalga *Dunaliella tertiolecta* utilizando varios modelos de crecimiento logístico modificado, tales como: Gompertz Modificado, Richards Modificado, Schnute Modificado, Baranyi-Roberts, Von Bertalanffy, Huang y Buchanan. El modelo Baranyi-Roberts fue elegido por ajustarse al perfil de crecimiento de la microalga bajo diferentes intensidades de luz en función de la posición inclinada del bioreactor. Los resultados obtenidos mostraron que la μ_{\max} aumentó constantemente de 0,317 a 1,069 por día, mientras que el tiempo de duplicación fue negativo en valores a intensidades de luz de 10 y 20 lux y aumentó constantemente a 1,189 días a una intensidad de luz de 60 lux.

En el estudio de Gómez et al., publicado en el 2019, se utilizó el modelo logístico y el modelo Baranyi-Roberts para un cultivos de *H. pluvialis* en medio RM. La tasa de crecimiento que se obtuvo en el control fue de $4,83 \times 10^6$ cel/mL, para el tratamiento con concentraciones con nitrógeno al 4 % fue de $2,10 \times 10^6$ cel/mL; mientras que para el tratamiento con concentraciones de nitrógeno al 5 % fue de $1,38 \times 10^6$ cel/mL. En el control se observó una tasa de crecimiento mayor debido a que el medio de cultivo no presenta deficiencia de ningún nutriente. La velocidad de crecimiento en esta investigación se realizó teniendo en cuenta los días de crecimiento desde el día 3 hasta el día 36 de crecimiento. En donde se presenta para el control una velocidad de crecimiento del 0,0030 cel/día, para el nitrógeno al 4 % una velocidad de 0,0029 cel/día y el nitrógeno al 5 % del 0,0028 cel/día presentándose una velocidad de crecimiento mayor en el control que en los tratamientos con concentraciones de nitrógeno al 4 % y al 5 %.

Mohamed et al. (2014) estudiaron la producción de biomasa y lípidos de la microalga, *Tetraselmis* sp. FTC 209, aislada de las aguas costeras locales, se evaluó para el metabolismo fotoautotrófico, mixotrófico y heterotrófico. Se evaluaron cuatro modelos de crecimiento no lineal (logístico, logístico modificado, Gompertz modificado, Baranyi-Roberts) para la predicción del rendimiento del cultivo. Utilizando criterios estadísticos, se eligió el modelo Baranyi-Roberts para estimar los valores de cinética de crecimiento. Los resultados indican que el nuevo medio (W-30) logró alcanzar una concentración celular máxima (μ_{\max}) de



1,505 g / L y un contenido máximo de lípidos (Pmax) de 376 mg / L (~25 % del peso de las células secas), que representa 1,8 y mejoras de 3,7 veces, respectivamente. Los cultivos con suplementos de glucosa revelaron que *Tetraselmis* sp. FTC 209 favorece el metabolismo mixotrófico sobre el heterotrófico en términos de crecimiento celular y producción de lípidos. En comparación con el fotoautotrófico. El cultivo con la adición de 30 g / L de glucosa produjo una $\mu_{\text{máx}}$ más alta con 8,08 g de peso de células secas / L. Esto proporciona una productividad significativa de biomasa de algas y lípidos de 404 mg de peso de células secas / L por día y 90,9 mg de lípidos / L por día, respectivamente.

En el estudio de Vásquez-Villalobos et al. (2013), se evaluaron los modelos matemáticos de Gompertz y logístico en la cinética de crecimiento de *Spirulina* sp., los cuales fueron comparados con un modelamiento por Redes Neuronales Artificiales Backpropagation (RNA-BP). La *Spirulina* fue cultivada en un fotobiorreactor de laboratorio aireado (3 L/min) de 500 mL, con iluminación fluorescente de 40 W y en Estado Sólido (LED-Light Emitting Diode) de 1 W; obteniendo con ambos sistemas 11,0 klx. La iluminación LED, permitió obtener un valor elevado de biomasa (α) de 0,90 , en comparación con la obtenida con iluminación fluorescente de 0,82; así como una mayor velocidad de crecimiento $\mu_{\text{máx}}$ de 0,63 h⁻¹, precedida de un menor tiempo de latencia $\lambda=0,34$ h. La RNA-BP mostró buena precisión con respecto al modelo corregido de Gompertz I, tanto para el caso del cultivo de *Spirulina* sp con iluminación fluorescente y con LED, mostrando coeficientes de correlación (R^2) del orden de 0,993 y 0,994, respectivamente. Resulta ventajoso el modelamiento a través del modelo corregido de Gompertz I, porque además de valores de R^2 de 0,987 y 0,990 en los cultivos de *Spirulina* sp con iluminación fluorescente y con LED, respectivamente, permite obtener los parámetros de la cinética de crecimiento de manera directa.

Gao et al. (2017), investigaron el modelo Tipo II basado en la distribución de luz, para determinar la necesidad de ésta condición en el cultivo de *H. pluvialis* bajo la irradiancia con led rojos. Los parámetros k_1 y k_2 de la curva hiperbólica de la ley de Lambert Beer del modelo fueron $118,8 \pm 5,2 \text{ m}^{-1}$ y $0,25 \pm 0,04 \text{ g L}^{-1}$, con un 95 % confianza (111,6, 129,8) y (0,20, 0,33), respectivamente. El modelo parametrizado fue validado con resultados experimentales, con error alto y error relativo de 0,08 $\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ y 10,5 %, respectivamente. Los resultados de la validación demostraron que el modelo puede predecir la intensidad de la luz para cultivos de *H.pluvialis* en estado verde.



En este caso, se representa la tasa de crecimiento específico máximo de *H. pluvialis*, como μ_{\max} , S es la concentración del sustrato limitante de crecimiento, y K_s se llama “constante de velocidad de media”. En el modelo de tipo II, el sustrato limitante es la intensidad de la luz, por lo que el modelo de Monod puede transformarse como sigue, $\mu = \mu_{\max} I / K_I + I$.

En el estudio de Do et al. (2019), la densidad de biomasa inicial óptima de *H. pluvialis* sometido a intensidades de luz entre 400-600 $\mu\text{mol fotones} \cdot 2 \text{ s}^{-1}$ fue de 5-7,5 g^{-2} . Las algas almacenadas durante 24 horas después del cultivo para la inmovilización en el fotobiorreactores-TL arrojaron los períodos de almacenamiento más largos y disminuyeron la productividad. La eficiencia de uso de luz por fotones fue entre 300-500 $\mu\text{mol fotones} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. El contenido de astaxantina en la biomasa seca varió entre 2-3 % (p/p). El eficiente suministro de CO_2 en un medio de cultivo sigue siendo importante para mejorar la productividad en los fotobiorreactores-TL en ángulo. Se obtuvo una productividad de biomasa y astaxantina de 8,7 $\text{g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ y 170 $\text{mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, respectivamente.

Como se pudo observar en las investigaciones relacionadas el crecimiento de las microalga es afectado por la luz (los cultivos de microalgas están limitados por la luz ya que es fácilmente absorbida y dispersada por las células de microalgas), el oxígeno disuelto, el contenido de dióxido de carbono, el pH, la temperatura, los nutrientes (N y P), elementos traza y el carbono. Los modelos matemáticos más utilizados, para evaluar los parámetros cinéticos de crecimiento fueron el logístico, Baranyi-Roberts, Gompertz y monod, determinando la velocidad de crecimiento, productividad de biomasa, de astaxantina y el tiempo de duplicación.

No obstante, la utilización y comportamiento de los cultivos están fuertemente influenciados por varios parámetros, tales como: la concentración de células, la trayectoria de la luz, la velocidad de la mezcla y la geometría del recipiente de cultivo. Estas características requieren un cultivo en sistemas cerrados que ofrecen un número de ventajas, entre ellas, mejor control del ambiente de cultivo, protección de la contaminación del medio ambiente y la producción de alta densidad celular. Los sistemas de cultivo por lote (batch) se aplican extensamente debido a su simplicidad y flexibilidad, permitiendo cambiar de especie y rápidamente corregir defectos en el sistema.

El crecimiento de las microalgas y su composición bioquímica se ven fuertemente afectados por condiciones ambientales como la disponibilidad de nutrientes, fuentes de



carbono inorgánico, intensidad de luz, fotoperiodos, color de luz, distribución de la luz, pH y temperatura. Por lo tanto, el uso de los modelos matemáticos que tienen la capacidad de determinar parámetros cinéticos importantes para valorar el comportamiento de los cultivos de la microalga en diferentes condiciones de crecimiento ayudarán a optimizar el rendimiento de los procesos, las condiciones de funcionamiento y los sistemas de cultivo, para seleccionar las condiciones adecuadas de cultivo de la microalga *H. pluvialis* y de producción de astaxantina de manera eficiente.

Las curvas de crecimiento generadas en el cultivo de la microalga en condiciones estándar y bajo factores de estrés permitirán estimar los parámetros cinéticos de crecimiento, usando modelos matemáticos como el logístico, Baranyi-Roberts y Gompertz, el cual proporciona valores cuantitativos para comprender diferentes aspectos de la fisiología y del crecimiento de las microalgas, como las diferentes fases y su duración, la máxima velocidad específica de crecimiento ($\mu_{\text{máx}}$), la máxima biomasa de microalga en conteo celular (células/mL) o peso seco (gr), el tiempo de duplicación (T_d), para seleccionar el que asegure los mejores resultados y así establecer las condiciones adecuadas de crecimiento para esta microalga y de producción de astaxantina, paso fundamental para su explotación industrial. Es por esto que el uso de un modelo cinético es importante para poder optimizar las condiciones de cultivo de la microalga y la producción de astaxantina, lo cual es interés de este estudio.

Modelos matemáticos

El modelado matemático es una herramienta empleada para describir la respuesta celular de las células de microalgas a los cambios en los insumos de nutrientes y otros factores ambientales. Actualmente, no existe un modelo preciso que incorpore simultáneamente entradas multiparamétricas como carbono, nitrógeno, fósforo e intensidad lumínica como parámetros definitorios para la vida útil de las microalgas (Tijani et al., 2018).

Modelar el crecimiento de microorganismos es importante para entender el comportamiento de los organismos bajo diferentes condiciones ambientales tales como temperatura, intensidad de luz, pH y nutrientes. Los modelos permiten la predicción de desarrollo microbiano, optimización de las condiciones de crecimiento y también predecir la seguridad microbiana y la calidad en diferentes condiciones ambientales (Celekli et al., 2008).



Existen varios modelos predictivos, los cuales se pueden clasificar según su complejidad en primarios, secundarios o terciarios (Garre Pérez et al., 2016).

Modelos primarios

Estudian las respuestas de los microorganismos en función del tiempo. En este tipo de modelo se pueden cuantificar las células/ml, unidades formadoras de colonia (UFC), formación de toxinas o niveles de substrato denominadas como medidas directas a la respuesta, así mismo se estudian medidas indirectas como la turbidez generada en el medio de cultivo, absorbancia, o conductancia. Dentro de estos modelos se encuentran el modelo de logístico, Gompertz y Baranyi.y Roberts (1994) (Garre Pérez et al., 2016).

La edición web del DMFit es una aplicación on-line aplicada para ajustar curvas bacterianas donde la fase lineal (fase exponencial) está precedida de una fase de adaptación y una posterior estacionaria. La edición web del DMFit ha sido elaborada con financiamiento del UK Food Standards Agency (Agencia de Normas Alimentarias del Reino Unido) (Herrera, 2013). Esta edición del DMFit permite al usuario:

- Ver una representación gráfica de los datos de crecimiento/supervivencia microbiana.
- Ajustar los datos un modelo de crecimiento/supervivencia para obtener estimaciones de parámetros cinéticos como: Velocidad Máxima de crecimiento/muerte, fase de latencia, número inicial de células, número final de células, estimación de errores típicos o estándar de estos parámetros (Herrera, 2013).

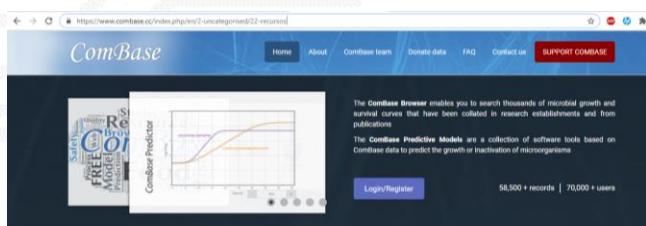
¿Cómo acceder a DMFit online?

A través de la página web <https://www.combase.cc/> (ver figura 1a) se puede acceder al software DMFit. El navegador ComBase tiene diferentes herramientas que permite buscar miles de curvas de supervivencia y crecimiento microbiano que se han recopilado en centros de investigación y de publicaciones. Los modelos predictivos de ComBase son una colección de herramientas de software basadas en datos de ComBase para predecir el crecimiento o inactivación de microorganismos.

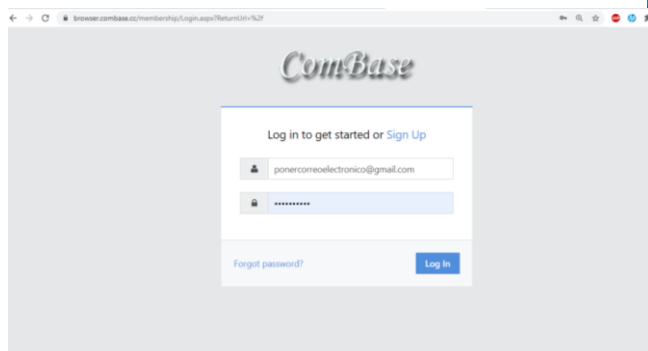


Figura 1

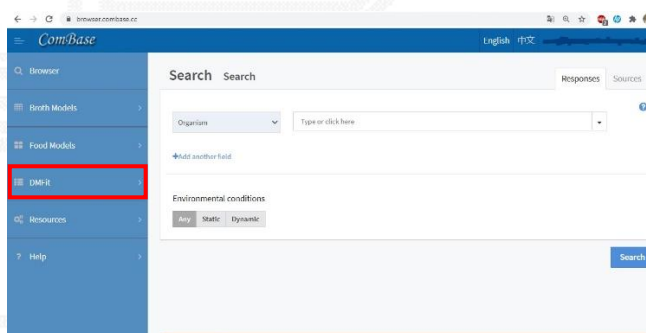
Pasos para acceder a DMFit online



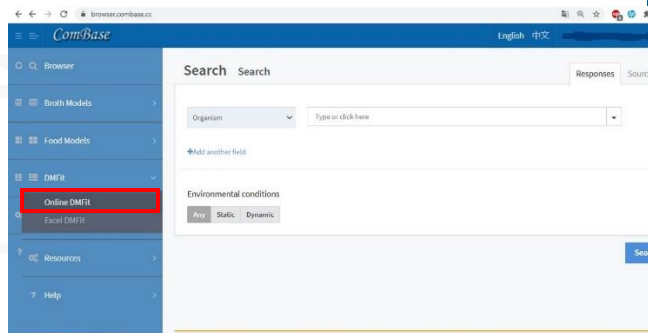
a.



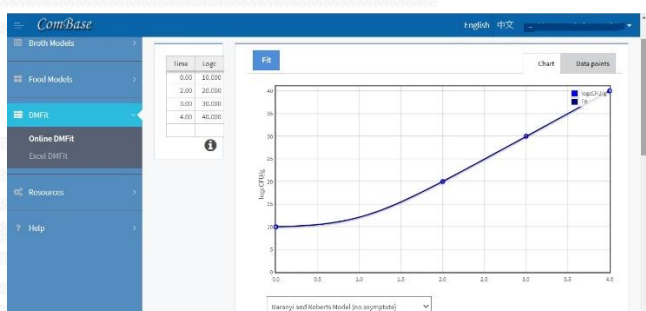
b.



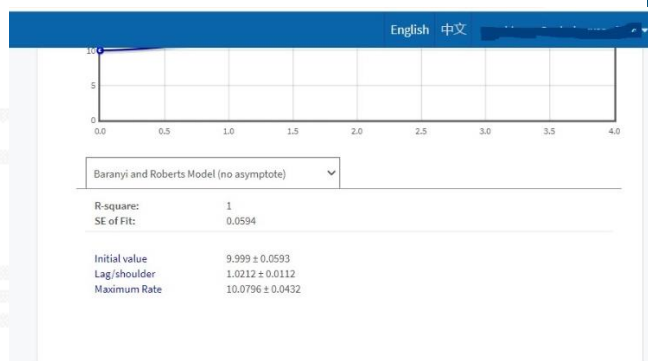
c.



d.



e.



f.

Una vez se ingresa a la página web, se procede a realizar la inscripción de la misma. Una vez hecho esto, se registra los datos para ingresar al software, Figura 1b.

Una vez se inicia sesión, va a aparecer la pantalla de la Figura 1c. En esta se da clic en la opción DMFit en la parte izquierda de la misma.

Se va a desplegar un menú, como se ve en la Figura 1d. por lo que se da clic a la opción Online DMFit.



A partir de aquí, se pueden empezar a poner los datos en la tabla: tiempo vs. Log del crecimiento; se debe incluir siempre un tiempo 0, y se debe poner el logaritmo en base 10 del crecimiento celular correspondiente (ver figura 1e).

En la parte inferior de la pantalla, se podrá modificar el tipo de curva deseada (de acuerdo a los modelos matemáticos), a su vez se podrán obtener datos como valor inicial, tasa de crecimiento máxima y el coeficiente de determinación o R^2 (ver figura 1f).

De acuerdo a lo anterior, se evaluaron siete estudios, a los cuales se le ajustó el crecimiento celular al modelo matemático de Baranyi y Roberts (1994). Este modelo fue realizado en 1994, es uno de los más extendidos para el modelado del crecimiento microbiano en la actualidad. Este modelo describe el crecimiento como una cinética de primer orden de ratio $\mu(t)$ que varía en función de las condiciones ambientales y según la fase en que se encuentre la población. Durante la fase exponencial este coeficiente es igual a μ_{max} mientras que durante las fases de adaptación y estacionaria se reduce por medio de los coeficientes $\alpha(t)$ y $\lambda(t)$ ambos comprendidos entre cero y uno.

La tasa de crecimiento es el incremento en el número de células o aumento de la masa microbiana. Este aumento ocurre por medio de división celular en el cual la población se va duplicando cada cierto periodo de tiempo, este se ve reflejado en las diferentes fases del ciclo del crecimiento microbiano en donde la fase de latencia es un periodo en el cual el crecimiento ocurre después de cierto tiempo. La fase exponencial ocurre cuando cada célula se divide en dos sucesivamente, esta fase es influenciada por condiciones como la temperatura y la composición del medio entre otros; la fase estacionaria se da cuando un nutriente del medio se agota o un producto de desecho se acumula e inhibe el crecimiento exponencial y la fase de muerte (Mohamed et al. 2014).

La ecuación de Baranyi está representada en la siguiente fórmula:

$$y(t) = y_{m\acute{a}x} + \ln \left[\frac{-1 + e^{(\mu_{m\acute{a}x} \cdot \lambda)} + e^{(\mu_{m\acute{a}x} \cdot t)}}{-1 + e^{(\mu_{m\acute{a}x} \cdot t)} + e^{(\mu_{m\acute{a}x} \cdot \lambda + y_{m\acute{a}x} - y_0)}} \right] \quad (1)$$

Donde:

$y(t) = \ln N(t)$, siendo $N(t)$ la densidad bacteriana (ufc.g⁻¹) al tiempo t .

$y_0 = \ln N_0$, siendo N_0 el valor asintótico inferior y aproximadamente igual a la densidad bacteriana inicial (ufc.g⁻¹).



$y_{max} = \ln N_{max}$, siendo N_{max} el valor asintótico superior y aproximadamente igual a la máxima densidad bacteriana ($ufc.g^{-1}$).

μ_{max} = máxima velocidad específica de crecimiento ($tiempo^{-1}$).

t = tiempo de latencia (tiempo).

Este modelo describe el crecimiento como una cinética de primer orden de ratio μt , que varía en función de las condiciones ambientales y según la fase en que se encuentre la población. Durante la fase exponencial este coeficiente es igual a $\mu_{máx}$, mientras que durante las fases de adaptación y estacionaria se reduce por medio de los coeficientes $\alpha(t)$ y $\gamma(t)$, ambos comprendidos entre cero y uno. (Garre Pérez et al., 2016)

Baranyi y Roberts (1994) señalaron, que el promedio de los tiempos de generación de las células individuales es generalmente 30-40 % mayor que el tiempo necesario para duplicar la población, debido a la asimétrica distribución de los tiempos de generación. No es sencillo obtener información sobre la distribución de los tiempos de retraso individuales del estimado de la distribución de la fase lag o de adaptación. (Garre Pérez et al., 2016)

Métodos

Tipo de Investigación mixta (cualitativa y cuantitativa) de alcance experimental que buscó fundamentalmente establecer las condiciones adecuadas para el crecimiento de la microalga *H. pluvialis* empleando el modelo matemático Baranyi-Roberts.

Microorganismo

Haematococcus pluvialis UTEX 2505, cepa de referencia (colección de cultivos de algas, Universidad de Texas, Austin TX, USA). La cepa se mantiene en medio sólido y líquido Volvox-MES (sugerido por la UTEX), a baja irradiancia y temperatura ambiente (15-20 °C).

Preparación del Inóculo

Para preparar el inóculo se tomó una muestra de 20 mL de la solución stock de la cepa de referencia de la UTEX2505 y se transferirá asepticamente a un Erlenmeyer de 500 mL con 200 mL de medio Volvox-MES fresco y estéril, el cual consistía de $Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$ 11,8 g/100 mL, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 4 g /100 mL, Na_2 glicerofosfato. $5H_2O$ 0,05 g/ L, KCl 0,05g/L, MES



1,95 g/L, solución de metales PIV 6 mL/L, NH_4Cl 0,026 g/L, Vitamina B12 1mL/L y biotina 1 mL/L, ajustado a pH 6,7, bajo continua iluminación, CO_2 5 % en aire, agitación continua a 25°C por 4 días. Para todos los experimentos un cultivo de 4 días es usado como el inóculo (en la fase exponencial de crecimiento). Se utiliza el medio Volvox-Mes porque es el recomendado por la UTEX para uso general para cepas de agua dulce, especialmente aquellas que requieren amonio. Apto para cultivos xénicos y axénicos, por los componentes que tiene como glicerofosfato de sodio, Biotina y buffer HEPES usados para cultivos celulares.

Sistema de cultivo

Realización de cultivo de *H. pluvialis* en reactores pequeños en sistema batch, por triplicado para cada medio a ensayar y usando biorreactores de 5 Litros bajo condiciones estándar de crecimiento y condiciones de estrés.

Condiciones de cultivo

1. Condiciones estándar:

- Cada medio estéril, RM, OHM y BBM, con el pH ajustado a 6,8 se adiciona en Erlenmeyers de 500 mL hasta un volumen de 400 mL. Se sellan para garantizar esterilidad. También se utilizó un biorreactor BIOSTAT A PLUS de 5 litros y TEC-FERM de 5 litros hasta un volumen de 2 litros.
- Se procede a adicionar el inóculo de la microalga (1×10^4 Células/mL).
- Se realiza el montaje de cada medio por triplicado en forma aleatoria, bajo las siguientes condiciones: pH 6,7, ciclo luz/oscuridad 18h:6 h, temperatura 20 – 25 °C, agitación continua 100 rpm, aire filtrado a una velocidad de 1,7 L/min, iluminación con lámparas fluorescentes blancas (Tlt 20w/54RS marca Philips), irradiancia de 65 a 75 luxes.
- Toma de muestra cada dos días en forma aséptica.
- Conservación de las muestras en solución formosalina (1:9), en una proporción 1:1, se toman 500 μl a 10 ml y se realiza control del cultivo (conteo celular y morfología) y el resto de muestra se utiliza para medición de pH.
- Se lleva control de Temperatura, pH, agitación, velocidad del aire, ciclo luz/oscuridad, medios.

2. Condiciones de estrés:

Deficiencia de nitrógeno 5 % de la concentración presente en el medio original, deficiencia de fosfatos 10 %, salinidad con acetato de sodio (0,299 mg/L), LEDs,



colores de luz (blanca, azul y roja), ciclo luz/oscuridad 20h:4h, y alta irradiancia 180 a 280 luxes.

Generación de las curvas de crecimiento

Se construyeron curvas de crecimiento a partir de al menos tres ensayos independientes. Se tomó una muestra diaria para la determinación del número de células por mL utilizando cámara de Neubauer y un microscopio de luz marca OLYMPUS CX31, también se determina el color, tamaño, viabilidad y morfología de las células, realizando registro fotográfico a 10x y 40x. La cantidad de células en la cámara de Neubauer por mililitro se calcula con la fórmula $C = N * 10^4 * Dil$, donde C corresponde a la densidad celular en cel./mL, N promedio de células presentes en 1 mm^2 ($0.1 \mu\text{L}$), Dil factor de dilución y 10⁴ factor de conversión de $0.1 \mu\text{L}$ a 1 mL (Vega y Voltolina, 2007).

Diseño experimental y análisis de datos

Se utilizó DMFit online a través de la página web <https://www.combase.cc/>. Se evaluó el crecimiento celular de diferentes estudios, con diferentes condiciones de cultivo los cuales se evidencian a continuación:

1. Medio BBM pH 6,8; T°: $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$; fotoperiodo 18 h luz:6 h oscuridad, luz blanca, azul y roja con leds; irradiancia 180 hasta 210 lux; aire filtrado a una velocidad de 1,7 L/min y agitación 100 rpm, Biorreactor Biotat A plus 5 L (Manrique y Marín, 2019).
2. Medio RM con nitrógeno al 5 %, fotoperiodo de 20 h. luz:4 h. oscuridad, pH de 5,7 a 6,3, T°: $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$,aire filtrado a una velocidad de 1,7 L/min y agitación 100 rpm, Biorreactor Biotat A plus 5 L (Perez y Ayala, 2019).
3. Medio RM con fosfatos al 10 %, nitratos al 5 %, pH 6,8, T°: $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, agitación 100 rpm; velocidad de aire 1,7 L/min; aire filtrado estéril; luz blanca, fotoperiodo 20h luz y 4h de oscuridad, e irradiancia de 280 luxes con el uso de led de colores azul, rojo y blanco combinadas con lámparas fluorescentes, Biorreactor Biotat A plus 5 L (Barreto y Ortiz, 2020).
4. Medio RM con 0,299 mg/L de acetato de sodio, pH de 6,7, fotoperiodos 20 h luz: 4 h oscuridad, luz blanca, temperatura $25 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, irradiancia 65 lux, aire filtrado y agitación a 100 rpm en un biorreactor TEC-FERM de 5 litros (García, 2018).



5. Medio RM, temperatura $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, fotoperiodo de 18:6 luz:oscuridad, agitación a 180 rpm, irradiancia 75 lux, aire filtrado y pH de 6,8- 7,1, en un biorreactor TEC-FERM de 5 litros por un periodo de 21 días (Leiton, 2018).
6. Medio OHM, fotoperiodo 18:6 luz/oscuridad, luz blanca por medio de lámparas fluorescentes (Phillips master TL5 HO de 54W/827) con irradiancia de 65 lux, pH 6,8, agitación 100 rpm, aire filtrado a una velocidad de 0,1 vvm y temperatura $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$, en un biorreactor TEC-FERM de 5 litros por un periodo de 21 días de cultivo (Hernández, 2019).
7. Medio RM con fosfatos de 30 mg/L, pH de 6.8, T°: $20 + 2^{\circ}\text{C}$, fotoperiodo de 20 h. luz: 4 h. oscuridad, irradiancia de 75 luxes en fase de estrés, luz blanca, lámparas fluorescentes (Phillips master TL5 HO de 54W/827) (Rodríguez, 2020).

Resultados

En el presente estudio, el modelo de Baranyi y Roberts (1994) fue ajustado a los datos de las cinéticas de crecimiento de *H. pluvialis* bajo diferentes condiciones de estrés. En la Figura 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 se aprecian las curvas de crecimiento de *H. pluvialis*, ajustadas al modelo matemático en donde se puede apreciar una concentración celular inicial de *H. pluvialis* baja para las condiciones de Medio RM con 0,299 mg/L de acetato de sodio, pH de 6,7, fotoperiodos 20:4, luz blanca, temperatura $25 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, aire filtrado y agitación a 100 rpm en un biorreactor TEC-FERM de 5 litros (García, 2018) y alta para las condiciones de cultivo donde se usa medio de cultivo RM con fosfatos al 10 %, nitratos al 5 %, pH 6,8, temperatura $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, agitación 100 rpm; velocidad de aire 1,7 L/min; aire filtrado estéril; luz blanca, fotoperiodo 20h luz y 4h de oscuridad, e irradiancia de 280 luxes con el uso de LED de colores azul, rojo y blanco combinadas con lámparas fluorescentes (Barreto y Ortiz, 2020); así como un incremento variado en la población de *H. pluvialis*. Estos resultados muestran que el crecimiento de la microalga, es afectado por las diferentes condiciones a las que fue sometida en los distintos tratamientos, observándose en forma definida en las curvas de crecimiento obtenidas fases exponenciales de crecimiento, fases de desaceleración y fases estacionarias en las figuras 2, 4, 7 y 8.

Es importante destacar que la utilización de los modelos primarios como el de Baranyi y Roberts permite calcular parámetros de crecimiento del microorganismo: conteo inicial de células (Y_0), velocidad de crecimiento (μ_{max}) y concentración final de células (Y_{max}) (*ver*



tabla 1), las cuales son empleadas para desarrollar modelos secundarios. Se estableció que el modelo Baranyi y Roberts se ajusta mejor con un R^2 de 0,984 a la curva de crecimiento obtenida cuando la microalga se sometió a las condiciones uso del medio OHM, fotoperiodo 18:6 luz/oscuridad, luz blanca por medio de lámparas fluorescentes (Phillips master TL5 HO de 54W/827) con irradiancia de 65 lux, pH 6,8, agitación 100 rpm, aire filtrado a una velocidad de 0,1 vvm y temperatura $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$ por un periodo de 21 días de cultivo (Hernández, 2019). El *H. pluvialis* presenta diferentes curvas de crecimiento celular bajo diferentes condiciones de estrés y de cultivo.



Figura 2

Curva de crecimiento de H. pluvialis usando el Modelo Baranyi-Roberts Medio BBM

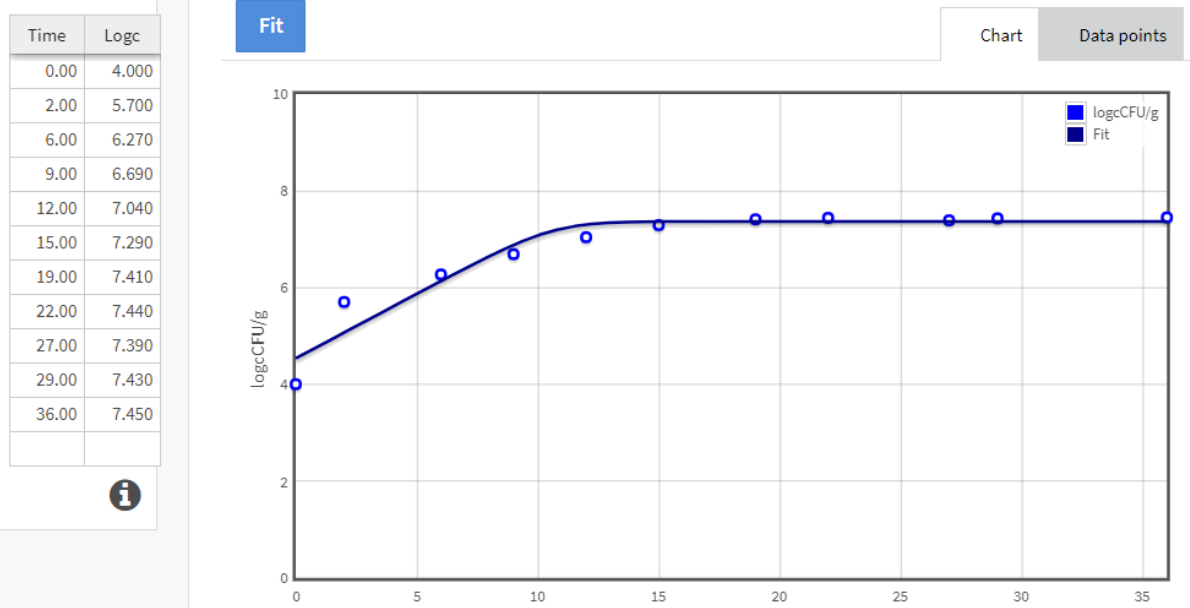


Figura 3

Curva de crecimiento de H. pluvialis usando el Modelo Baranyi-Roberts en Medio RM con nitrógeno al 5 %

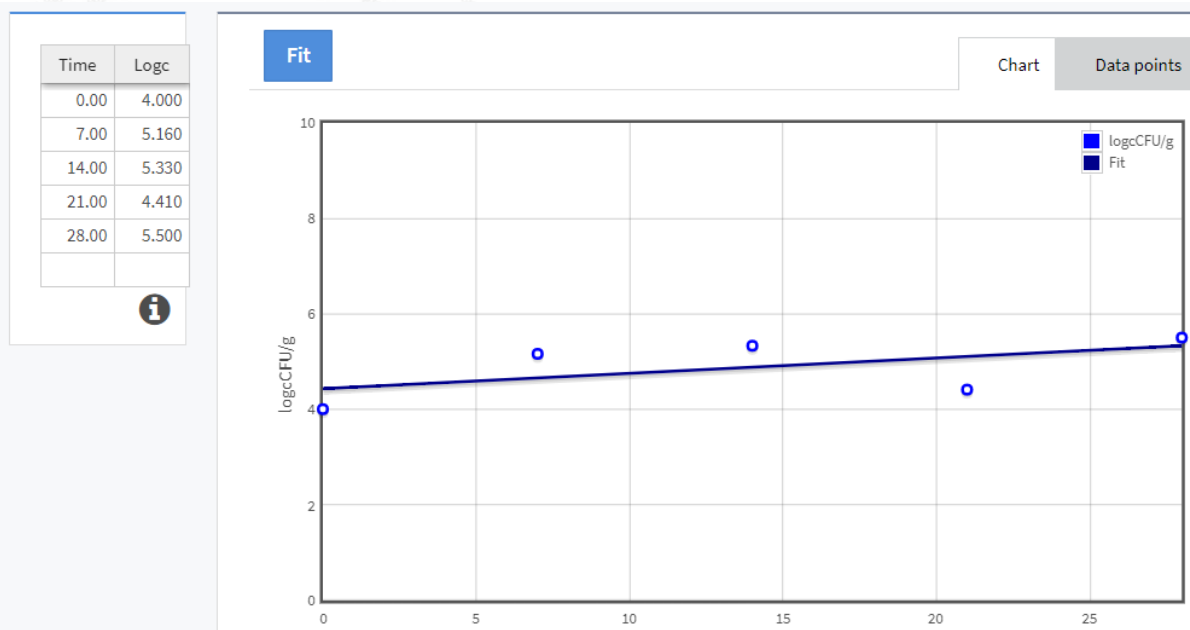


Figura 4

Curva de crecimiento de *H. pluvialis* usando el Modelo Baranyi-Roberts Medio RM, con fosfatos al 10 %, nitratos al 5 %

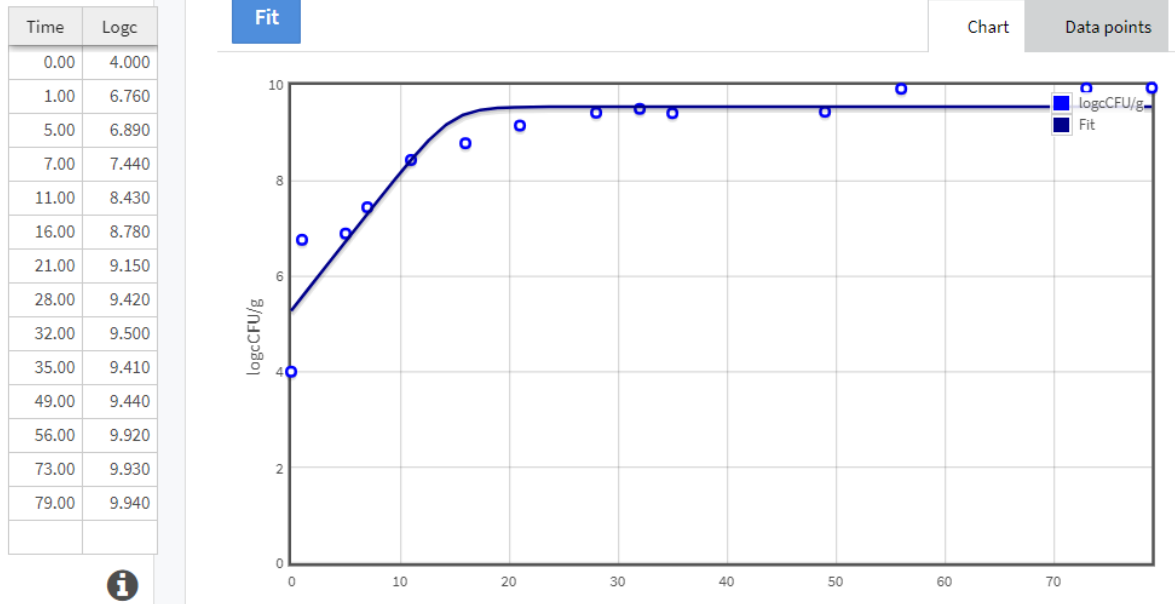


Figura 5

Curva de crecimiento de *H. pluvialis* usando el Modelo Baranyi-Roberts Medio RM con 0,299 mg/L de acetato de sodio

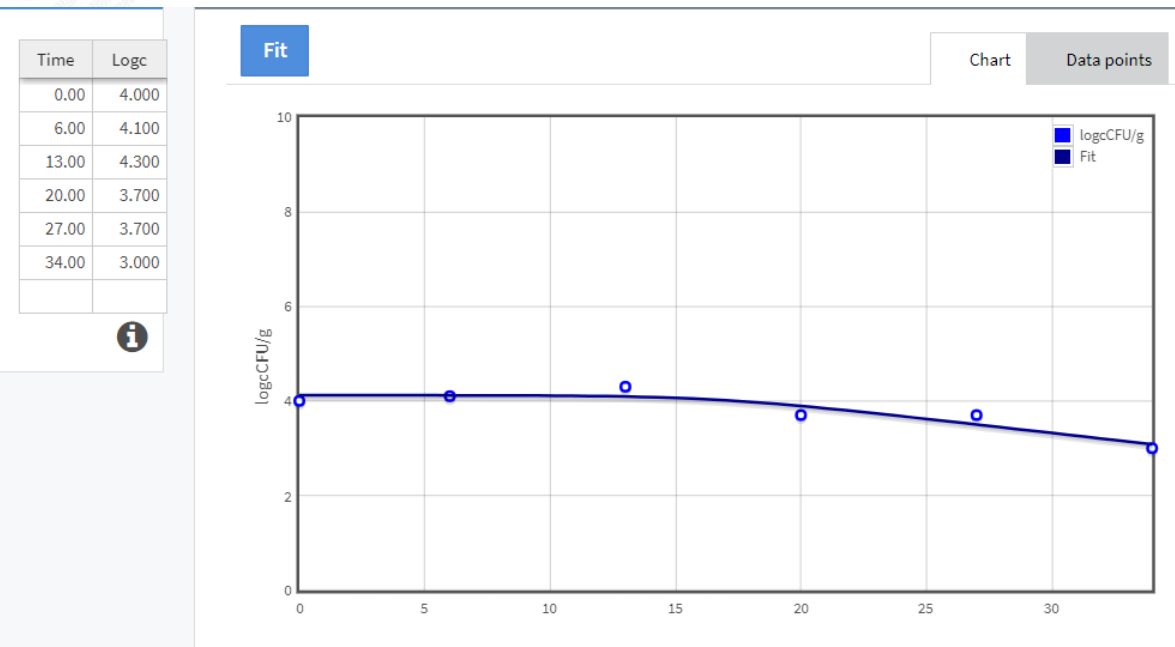


Figura 6

Curva de crecimiento para H. pluvialis usando modelo Baranyi. Roberts en medio RM

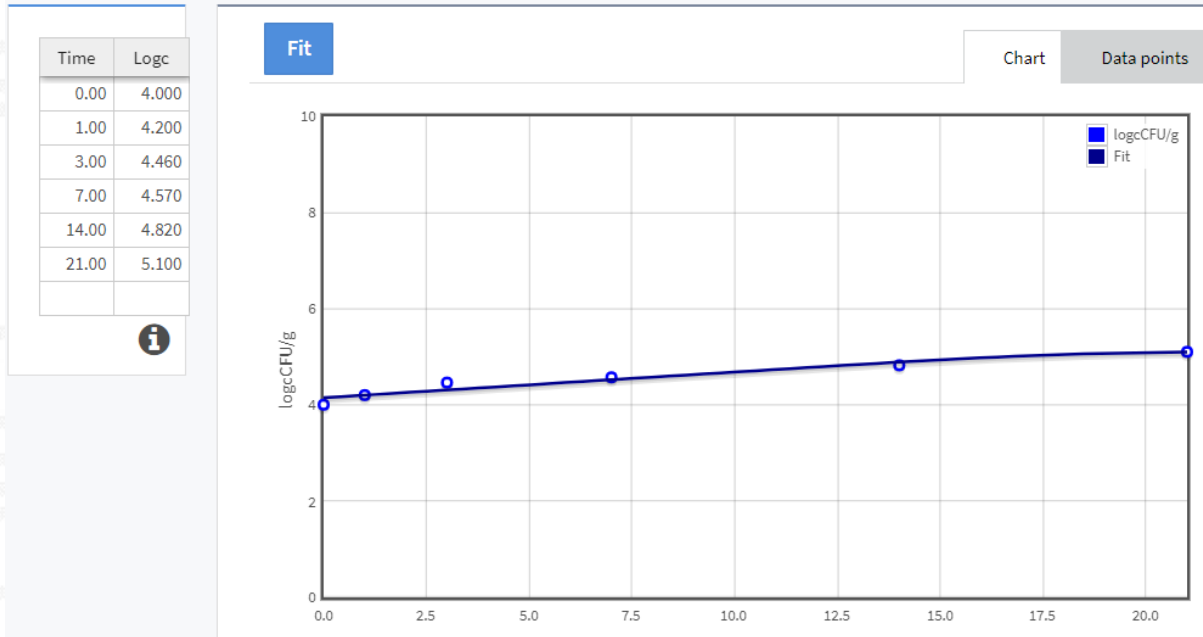


Figura 7

Curva de crecimiento de H. pluvialis usando modelo Baranyi-Roberts en medio OHM usando biorreactor Tecferm 5 L

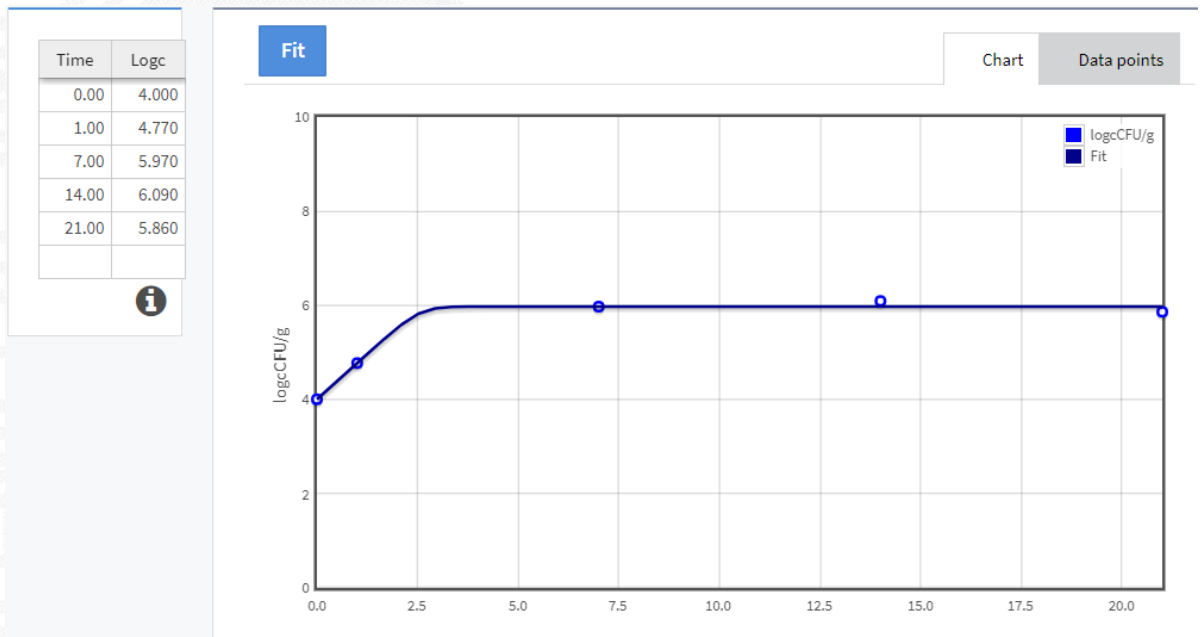


Figura 8

Curva de crecimiento de *H. pluvialis* usando modelo Baranyi- Roberts en medio RM con 30 mg/L de fosfatos

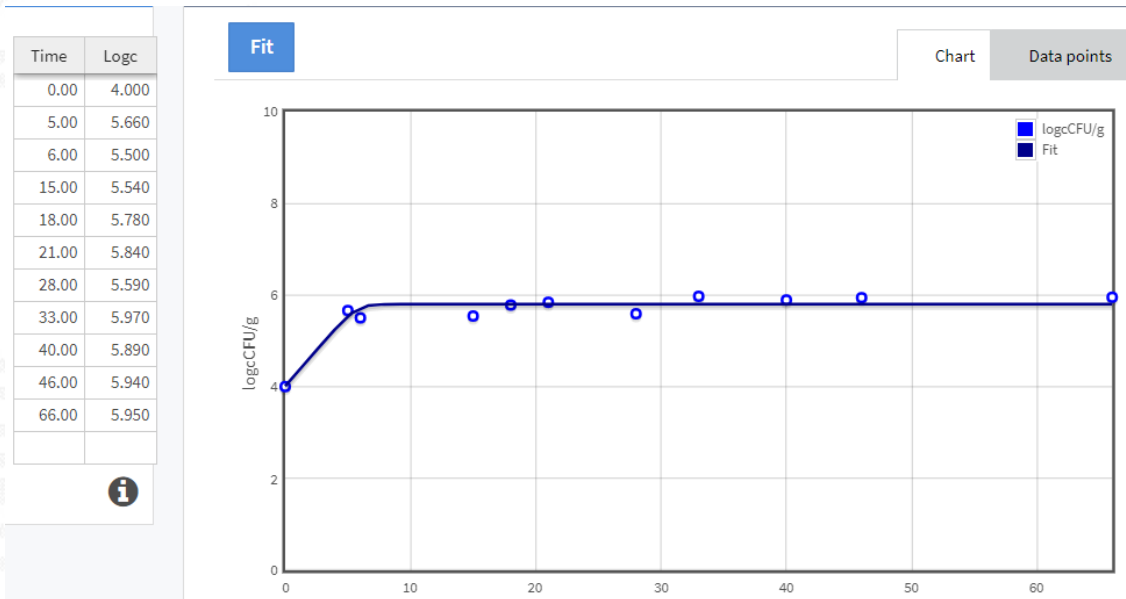


Tabla 1

Parámetros cinéticos ajustados al modelo Baranyi- Roberts para H. pluvialis

Condiciones del cultivo: medio de cultivo y condiciones	Nº Datos	Dato mínimo	Dato máximo	Velocidad de crecimiento	Coefficiente de determinación (R ²)
Medio RM con 0,299 mg/L de acetato de sodio, pH de 6,7, fotoperiodos 20:4, luz blanca, temperatura 25 ± 2 °C, aire filtrado y agitación a 100 rpm en un biorreactor TEC-FERM de 5 litros (García, 2018).	6	4,0	4,3	-0,0602	0,775
Medio BBM pH 6,8; T°: 20 +2 °C; fotoperiodo 18:6, luz blanca, azul y roja con LEDS; irradiancia 180 hasta 210 lux; aire filtrado a una velocidad de 1,7 L/min y agitación 100 rpm. Biorreactor Biostat A Plus 5 L (Marín y Manrique, 2019).	11	4,0	7,45	0,267	0,91
Medio RM con nitrógeno al 5 %, fotoperiodo de 20:4, pH de 5,7 a 6,3 y agitación constante en un biorreactor Biostat A plus (Pérez y Ayala, 2019).	5	4,0	5,5	0,0321	0,07
Medio RM con fosfatos al 10 %, nitratos al 5 %, pH 6,8, temperatura 20 °C, agitación 100 rpm; velocidad de aire 1,7 L/min; aire filtrado estéril; luz blanca, fotoperiodo 20 h luz y 4 h de oscuridad, e irradiancia de 280 luxes con el uso de LED de colores azul, rojo y blanco combinadas con lámparas fluorescentes (Barreto y Ortiz, 2020).	14	4,0	9,94	0,29	0,869
Medio OHM, fotoperiodo 18:6 luz/oscuridad, luz blanca por medio de lámparas fluorescentes (Phillips master TL5 HO de 54W/827) con irradiancia de 65 lux, pH 6,8, agitación 100 rpm, aire filtrado a una velocidad de 0,1 vvm y temperatura 20 °C ± 2 por un periodo de 21 días de cultivo (Hernández, 2019).	5	4,0	6,09	0,77	0,984
Medio RM, temperatura 20 °C ± 1 °C, fotoperiodo de 18:6 luz:oscuridad, agitación a 180 rpm, aire filtrado y pH de 6,8- 7,1 por un periodo de 21 días (Leiton , 2018).	6	4,0	5,1	0,0536	0,89
Medio RM con fosfatos de 30 mg/L, pH de 6,8, fotoperiodo de 10:4 irradiancia de 75 luxes en fase de estrés, luz blanca (Rodríguez, 2020).	11	4,0	5,97	0,315	0,898

El modelo Baranyi y Roberts (1994) es muy útil en el presente estudio porque sus parámetros tienen una interpretación biológica aplicada a las condiciones ambientales dinámicas (Ortiz et al., 2020) y como se observa se ajusta a los datos experimentales como en el estudio de Hernández, 2019 con un R² de 0,984.



Discusión

Se analizó el crecimiento celular a través del programa DMFit de diversos estudios con diferentes condiciones de estrés, este crecimiento analizado se determinó en las muestras que obtuvieron una mayor producción de astaxantina en los medios de cultivo de *H. pluvialis*, para cada uno de los trabajos.

Se evidenció que el estudio que obtuvo una mayor velocidad de crecimiento (0,77 cel./día) fue el Hernández (2019), en el cual se utilizaron las siguientes condiciones de cultivo: Medio OHM, fotoperiodo 18:6 luz/oscuridad, luz blanca por medio de lámparas fluorescentes (Phillips master TL5 HO de 54W/827) con irradiancia de 65 lux, pH 6,8, agitación 100 rpm, aire filtrado a una velocidad de 0,1 vvm y temperatura $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$ por un periodo de 21 días de cultivo.

Comparado con los demás estudios, este fue el único en donde se utilizó el medio de cultivo OHM; de acuerdo a bibliografía, el Medio Óptimo de Haematococcus (OHM) puede ayudar a incrementar la biomasa del cultivo inclusive 3 veces más que el medio BBM, ya que no solo posee los nutrientes requeridos para el crecimiento y metabolismo de la microalga, sino que además contiene vitaminas como biotina, tiamina y vitamina B12 (Niño et al., 2017).

Este medio no tiene algunos elementos como vanadio, yodo, boro y zinc, puesto que se ha demostrado que no son esenciales para el desarrollo de *H. pluvialis*; sin embargo, medios como el RM y BBM si contienen macronutrientes como el zinc. De igual forma cabe recalcar que el medio OHM contiene mayor cantidad de nitrógeno en forma de KNO_3 , con una concentración de 410 mg/l, superando la contenida en los demás medios (Richmond y Hu, 2013).

Como se sabe, el nitrógeno es esencial en todas las proteínas funcionales y estructurales de las microalgas, además de que representa entre el 7 – 10 % del peso seco celular en las mismas. Por lo tanto, si existe una limitación de la concentración de nitrógeno en el medio, *H. pluvialis* va a generar la degradación de los ficobilisomas (compuestos ubicados en la membrana tilacoidal que sirven para la captación de luz), lo que causa que la fotosíntesis continúe, pero a una velocidad reducida (Fabregas, 2000; Richmond y Hu, 2013) Es por esta razón, por la que probablemente este estudio obtuvo una mayor velocidad de crecimiento del cultivo.



Cabe resaltar que el segundo estudio que obtiene mayor velocidad de crecimiento es el de Rodríguez (2020), con 0,315 cel/día. En este, se utilizó medio RM con fosfatos de 30 mg/L, pH de 6,8, fotoperiodo de 10:4 irradiancia de 75 luxes en fase de estrés, luz blanca. A su vez, si se compara con el estudio de Hernández (2019), es decir, el estudio con mayor velocidad de crecimiento, se obtiene una similitud en cuanto a que los medios de cultivo no tienen una deficiencia de nitrógeno como algunos otros estudios evaluados. Por lo que la concentración de nitrógeno en el cultivo puede modificar la cantidad de biomasa en el medio, ya que como se mencionó anteriormente, es un macronutriente esencial para el crecimiento de *H. pluvialis*.

De igual forma, el estudio de Hernández (2019), es quien obtiene el coeficiente de determinación más cercano a uno con 0,984, seguido de Rodríguez (2020), con 0,898 (8) y seguido de Leiton (2018), con 0,89. Es importante saber que el resultado del coeficiente de determinación oscila entre 0 y 1, cuanto más cerca de 1 se sitúe su valor, mayor será el ajuste del modelo a la variable que estamos intentando explicar.

De forma inversa, cuanto más cerca de cero, menos ajustado estará el modelo y, por tanto, menos fiable será el estudio (López, 2015). De la misma manera, cabe recordar que el modelo matemático que se utilizó en el programa DMFit, (Herrera, 2013) es el de Baranyi y Roberts (1994).

Este modelo es uno de los más extendidos para el modelado del crecimiento microbiano en la actualidad, ya que describe el crecimiento como una cinética de primer orden de ratio $\mu(t)$ que varía en función de las condiciones ambientales y según la fase en que se encuentre la población. Durante la fase exponencial este coeficiente es igual a μ_{max} mientras que durante las fases de adaptación y estacionaria se reduce por medio de los coeficientes $\alpha(t)$ y $\lambda(t)$ ambos comprendidos entre cero y uno (Ramírez, 2011; González et al., 2017; González et al., 2022). El modelo de Baranyi-Roberts (1994) se derivó por primera vez como un predictor dinámico del crecimiento de patógenos alimentarios, pero cada vez más su capacidad predictiva encontrada se aplica en un ámbito mucho más amplio y recientemente fue que los estudios ficológicos hicieron uso del modelo de algas para la estimación del crecimiento (Mohamed et al., 2014) como en los estudios de Halmi et al. (2014) y Ortiz-Moreno et al. (2020), estableciendo que este modelo es muy útil en el presente estudio, porque sus parámetros tienen una interpretación biológica directa, se puede aplicar a



condiciones ambientales dinámicas como las de cultivo y estrés utilizadas y se puede ajustar a los datos experimentales.

Conclusión

Se encontró que el modelo de Baranyi-Roberts aplicado se ajustó mejor a los datos experimentales de crecimiento de *H. pluvialis* en seis de los siete tratamientos estudiados, utilizando como parámetros cinéticos el valor inicial de crecimiento, el valor final y la velocidad específica de crecimiento ($\mu_{\text{máx}}$) y se establecieron los efectos de las diferentes condiciones de cultivo y de estrés sobre el crecimiento de la microalga *H. pluvialis*. De acuerdo al crecimiento celular de los estudios analizados, se obtiene una mayor velocidad de crecimiento de 0,77 cel/día, en las siguientes condiciones de cultivo: Medio OHM, fotoperiodo 18:6 luz/oscuridad, luz blanca por medio de lámparas fluorescentes (Phillips master TL5 HO de 54W/827) con irradiancia de 65 lux, pH 6,8, agitación 100 rpm, aire filtrado a una velocidad de 0,1 vvm y temperatura $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2$ por un periodo de 21 días de cultivo. Así mismo se evidencia que bajo estas condiciones el crecimiento de la microalga fue el que se más se ajustó al modelo Baranyi-Roberts con un coeficiente de determinación de 0,984, valor más cercano a 1.



Referencias bibliográficas

- Barrera, G. R. (2011). Desarrollo y validación de modelos predictivos dinámicos del crecimiento de *Staphylococcus aureus* en productos cárnicos previo al proceso de cocción.
- Barreto P. A., y Ortiz T. (2020). *Producción de astaxantina en Haematococcus pluvialis bajo los factores de estrés deficiencia de fosfatos, deficiencia de nitratos y alta irradiancia utilizando el biorreactor Biostat A plus de 5 Litros* [Trabajo de grado]. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca.
- Çelekli, A., Balcı, M., y Bozkurt, H. (2008). Modelling of *Scenedesmus obliquus*; function of nutrients with modified Gompertz model. *Bioresource technology*, 99(18), pp. 8742-8747. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.04.028>
- Do, T. T., Ong, B. N., Nguyen Tran, M. L., Nguyen, D., Melkonian, M., y Tran, H. D. (2019). Biomass and astaxanthin productivities of *Haematococcus pluvialis* in an angled twin-layer porous substrate photobioreactor: effect of inoculum density and storage time. *Biology*, 8(3). <https://doi.org/10.3390/biology8030068>
- Fábregas, J., Domínguez, A., Regueiro, M., Maseda, A., y Otero, A. (2000). Optimization of culture medium for the continuous cultivation of the microalga *Haematococcus pluvialis*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 53(5), pp. 530-535. <https://doi.org/10.1007/s002530051652>
- Gao, X., Wang, X., Li, H., Roje, S., Sablani, S. S., y Chen, S. (2017). Parameterization of a light distribution model for green cell growth of microalgae: *Haematococcus pluvialis* cultured under red LED lights. *Algal research*, 23, pp. 20-27. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.12.018>
- García, L. (2018). *Producción biotecnológica de astaxantina a partir Haematococcus pluvialis en biorreactor TEC-FERM de 5 litros* [Trabajo de grado]. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca.
- Garre, A., Egea, J. A., y Fernández, P. S. (2016). Modelos matemáticos para la descripción del crecimiento de microorganismos patógenos en alimentos.
- Gómez, L., Orozco, M. I., Quiroga, C., Díaz, J. C., Huérfano, J., Díaz, L. E., y Camacho, J. E. (2019). Producción de Astaxantina y expresión de genes en *Haematococcus pluvialis*



(Chlorophyceae, Volvocales) bajo condiciones de estrés por deficiencia de nitrógeno y alta irradiancia. *Revista Mutis*, 7(2), pp. 7-24. <https://orcid.org/0000-0002-8880-1501>

González Cuello, R., Pérez Mendoza, J., y Gelvez Ordóñez, V. (2017). Post-harvest shelf-life increase of avocados (persea americana) using gellan gum based coating. *Revista UDCA Actualidad y Divulgación Científica*, 20(1), pp. 101-110. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S012342262017000100012&script=sci_abstr&tlng=en

González, R. E., Tarón Dunoyer, A., y Pérez Mendoza, J. (2022). Modelo de crecimiento microbiano para predecir el comportamiento de *Salmonella* spp en queso costeño colombiano. *Información tecnológica*, 33(1), pp. 225-234. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642022000100225>

Halmi, M. I. E., Shukor, M. S., Johari, W. L. W., y Shukor, M. Y. (2014). Evaluation of several mathematical models for fitting the growth of the algae *Dunaliella tertiolecta*. *Asian Journal of Plant Biology*, 2(1), pp. 1-6. <https://doi.org/10.54987/ajpb.v2i1.81>

Hernández A. (2019). *Realización del cultivo de H. pluvialis en biorreactor Tecferm de 5 L* [Trabajo de grado] Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca.

Herrera, E. A. C. (2013). *Aplicación de la Microbiología Predictiva para la determinación de la vida útil de los alimentos*. Colombia: sn. DMFit web edition. Universidad de Pamplona.

Leiton Y. (2018). *Producción de Haematococcus pluvialis en un biorreactor TECFERM de 5 L en medios de cultivo RM y BBM* [Trabajo de grado]. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca.

Manrique M.A., y Marín D.L. (2019). *Evaluación del efecto de la deficiencia de nitrógeno y alta irradiancia como factor de estrés para la producción de astaxantina en Haematococcus pluvialis por medio de cultivos realizados en el biorreactor biostat® a plus* [Trabajo de grado]. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca.

Mohamed, M. S., Tan, J. S., Kadkhodaei, S., Mohamad, R., Mokhtar, M. N., y Ariff, A. B. (2014). Kinetics and modeling of microalga *Tetraselmis* sp. FTC 209 growth with



respect to its adaptation toward different trophic conditions. *Biochemical engineering journal*, 88, pp. 30-41. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2014.04.002>

Niño-Castillo, C. M., Rodríguez-Rivera, F. C., Díaz, L. E., y Lancheros-Díaz, A. G. (2017). Evaluation of Cell Growth Conditions for the Astaxanthin Production as of *Haematococcus pluvialis* Microalgae. *Nova*, 15(28), pp. 19-31. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S179424702017000200019&script=sci_abstract&tlng=en

Ortiz-Moreno, M. L., Cárdenas-Poblador, J., Agredo, J., y Solarte-Murillo, L. V. (2020). Modeling the effects of light wavelength on the growth of *Nostoc ellipsosporum*. *Universitas Scientiarum*, 25(1), 113-148. doi: 10.11144/Javeriana.SC25-1.mteo

Pérez E.T., y Ayala Y. (2019). *Producción de clorofila y astaxantina a partir de la microalga Haematococcus Pluvialis bajo estrés inducido por deficiencia de nitrógeno en el biorreactor BIOSTAT Aplus de 5 litros* [Trabajo de grado]. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca.

Richmond, A., y Hu, Q. (Eds.). (2013). *Handbook of microalgal culture*. John Wiley y Sons, Limited.

Rodríguez, N. (2020). *Producción de astaxantina en Haematococcus pluvialis bajo el efecto de la deficiencia de fosfatos y alta intensidad de luz* [Trabajo de grado] Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca.

Tijani, H., Yuzir, A., Dagang, W. R. Z. W., Zamyadi, A., y Abdullah, N. (2018). Multi-parametric modelling and kinetic sensitivity of microalgal cells. *Algal research*, 32, pp. 259-269. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2018.04.009>

Villalobos, V. V., Gutiérrez, P. A., Acevedo, K. C., y Torres, A. E. (2013). Modelamiento matemático y por redes neuronales artificiales del crecimiento de *Spirulina* sp. en fotobiorreactor con fuente de luz fluorescente e iluminación en estado sólido. *Scientia Agropecuaria*, 4(3), pp. 199-209. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4657862>

Vega, B. O. A., y Voltolina, D. (2007). Concentración, recuento celular y tasa de crecimiento. *Métodos y herramientas analíticas en la evaluación de la biomasa microalgal*, 1, pp. 17-25. <https://www.researchgate.net/profile/Domenico->



voltolina/publication/253237563_concentracion_recuento_celular_y_tasa_de_crecimiento/links/00b4953c92711ed8fb000000/concentracion-recuento-celular-y-tasa-de-crecimiento.pdf

Baranyi, J., y Roberts, T. (1994). A dynamic approach to predicting bacterial growth in food. *International J. Food Microbiol*, 23(3-4), pp. 277-294.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168160594901570>

López, J. F. (2015). Coeficiente de determinación (R^2) (4 de mayo 2021).

<https://economipedia.com/definiciones/r-cuadrado-coeficiente-determinacion.html>



CAPÍTULO II

Aprovechamiento de Saponinas procedentes de fibra de Fique, como estrategia de producción limpia, del RIK

Use of saponins from Fique fiber, as a clean production strategy, from RIK

Luz Karina Corzo Pacheco⁴
Roberth Eder Valera Restrepo⁵
Martin Elías Rodríguez⁶
Leonardo Fabio Ramírez Campo⁷

Resumen

El presente estudio consideró el análisis de saponinas procedentes del proceso de extracción de fibra a partir de fique, implementando dos métodos: la cromatografía de masa GC-MS y por método infrarrojo, en las que se pudo identificar mediante la caracterización de los residuos en la especie “Ayalero” que partir de 1,2 Kg de hoja se obtiene 48 gr de fibra, lo que corresponde al 4 %, por cuanto se considera que 1,152 Kg; es decir, el 96 %, son residuos, de este, del cual se deriva el extracto acuoso, cuyo análisis de cromatografía de gases GC- MS, evidenció el contenido de saponinas, identificando dos sapogeninas mayoristas que corresponden a las tigogenina (Neotigogenina) y hecogenina (3-Hydroxisprostane), con porcentajes de área relativa del 31,39 % y 68,61 %, respectivamente. Lo que permite asociar a las contaminaciones y la acción toxica en los animales que habitan en los recursos hídricos (donde se generan la labor de lavado y fermentado), de las diferentes comunidades del pueblo Kankuamo. Frente a los resultados, las hecogeninas presentan mayor uso que las tigogeninas; sin embargo, esta última representan mayor valor en el mercado farmacéutico, debido a su alta actividad biológica (MADR y MAVDT, 2006). Por último, se estandarizó un jabón en barra para uso doméstico como estrategia de aprovechamiento de residuos de fique, para tal fin se tomó como referencia la formulación con adición del 20 %; el producto obtenido fue sometido a pruebas de calidad en las que se determinó la solubilidad y el índice de espuma.

Palabras clave: fique, saponinas, jabón.

⁴ Ingeniera Agroindustrial. Docente Ocasional UNICESAR. Valledupar, Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-2610-206X>. luzcorzo@unicesar.edu.co

⁵ Ingeniero de Alimentos. Jefe de DPTO ING Agroindustrial UNICESAR, Valledupar, Colombia. <https://orcid.org/0000-0003-1020-2530>. robetvalera@unicesar.edu.co

⁶ Estudiante de ingeniería Agroindustrial. UNICESAR, Valledupar, Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-0367-1833>. martinrp94@hotmail.com

⁷ Ingeniero Agroindustrial. UNICESAR, Valledupar, Colombia. <https://orcid.org/0000-0001-6125-3341>. leonardofabio72@hotmail.com



Abstract

The present study considered the analysis of saponins from the fiber extraction process from fique, implementing two methods: GC-MS mass chromatography and by infrared method, in which it was possible to identify by characterizing the residues in the "Ayalero" species that from 1.2 Kg of leaf 48 g of fiber is obtained, which corresponds to 4%, since it is considered that 1.152 Kg; that is, 96% are residues, from which the aqueous extract is derived, whose GC-MS gas chromatography analysis showed the content of saponins, identifying two wholesale sapogenins that correspond to tigogenin (Neotigogenin) and hecogenin (3-Hydroxisprostan), with relative area percentages of 31.39% and 68.61%, respectively. What allows to associate to the contaminations and the toxic action in the animals that inhabit the hydric resources (where the washing and fermentation work is generated), of the different communities of the Kankuamo people. Faced with the results, hecogenins have greater use than tigogenins; however, the latter represent greater value in the pharmaceutical market, due to its high biological activity (MADR and MAVDT, 2006). Finally, a bar soap for domestic use was standardized as a strategy for the use of fique waste, for this purpose the formulation with the addition of 20% was taken as a reference; the product obtained was subjected to quality tests in which the solubility and the foam index were determined.

Keywords: fique, saponins, soap.



Introducción

El fique es una planta fibrosa tiene su origen en la América Tropical, perteneciente a la familia Agavaceae, es explotado para la obtención de la fibra; dejando de lado los componentes de mayor contenido inmersos en la hoja. Al respecto, Pimiento (2014), asegura que el aprovechamiento es limitado ya que la fibra corresponde al 6 % del contenido de la hoja, el resto es considerado residuo y/o desecho (distribuido en el bagazo), que en conjunto suman el 93 al 94 %, y en la actualidad son vertidos sin ningún tratamiento previo a los arroyos cercanos (rio Candela, Badillo, Guatapuri, considerados fuente de riego de los diferentes cultivos ya sean de tipo permanentes o transitorios) o en su defecto a los suelos, lo que puede inducir a posibles impactos y/o desequilibrio de los mismos.

La fibra de fique es conocida en las comunidades indígenas de la región del Cesar, como maguey, lo cual constituye la materia prima fundamental en el proceso artesanal, cultural y tradicional de la comunidad indígena Kankuama; la fibra se obtiene por tallado de la hoja de fique, mediante un proceso empírico denominado macaneo, cuyo contenido oscila entre el 4 al 8 %.

Mediante diferentes estudios se ha observado que la principal afectación ocurre en el epitelio respiratorio, debido a la capacidad que poseen estas moléculas para alterar las propiedades fisicoquímicas de las membranas celulares. Por lo tanto, es común que algunos venenos para peces tengan como ingredientes activos las saponinas (Francis et al. 2002; citado por García, 2010).

Con el fin de generar alternativas de aprovechamiento de los subproductos generados en el proceso de extracción de hoja de fique y al mismo tiempo, reducir los posibles impactos que se generen de esta práctica, se consideró la identificación de saponinas procedentes del proceso de extracción de fibra a partir de fique, implementando dos métodos: la cromatografía de masa GC-MS y por método infrarrojo, así mismo, el desarrollo de un producto (jabón en barra para ropa), como alternativa de aprovechamiento el cual se comparó en cuanto a las características físicas con un producto comercial similar, en la cual se tomaron como marco de referencia los fundamentos de: Figueroa (2016), Bacca (2012), Hernández (2004), entre otros. Con el fin de obtener y analizar datos relevantes de la saponina a partir de jugo de hoja de fique, como materia prima fundamental para la obtención del producto final.

La investigación permitió evidenciar alternativas de aprovechamiento del jugo de hoja de fique que se genera en el proceso de extracción de fibra natural, lo que se visiona como



una estrategia para reducir los posibles impactos generados a causa del mal manejo que en la actualidad se les da a estos subproductos, por ende, un beneficio para el resguardo en general, lo que puede contribuir a la conservación de los mencionados recursos.

Método

La investigación se inclina a un estudio de tipo descriptivo; cuantitativo experimental, direccionada a la identificación y enumeración detallada de las características del extracto acuoso (residuo líquido), obtenido a partir de fique; se desarrolló un diseño de experimentos 2^3 . Este diseño consiste en estudiar tres factores ($k = 3$), en dos niveles cada uno (2 réplicas). Los factores y niveles son: Temperatura (25, 50 °C), concentración de saponinas presentes en el extracto acuoso procedente del proceso de macaneo. Solvente (Metanol/agua 95/5; Etanol/agua 95/5) y relación ml solvente/ml extracto de jugo (20:5 y 40:5), cuya respuesta de interés es el rendimiento o la efectividad de la extracción, para los cuales se realizó el análisis de varianza (ANOVA), y se plantearon hipótesis nulas y alternativas con la finalidad de constatar si la temperatura o los solventes de extracción ejercen o no, algún efecto en la concentración de saponinas presentes en el extracto acuoso procedente del proceso de obtención de fibra de hojas de fique mediante macaneo.

Para efectos del presente estudio la población está determinada por 5 hectáreas de cultivo de fique que se encuentran al interior de las 12 comunidades que integran el Resguardo Indígena Kankuamo, del municipio de Valledupar, en las que se produce y se procesa la hoja de fique, el cual se ubica en su gran parte en las comunidades de la Mina y los Haticos. El muestreo aplicado corresponde al muestreo aleatorio simple, el procedimiento de selección de la muestra se realizó tomando 1,5 litros de jugo de fique, generado del proceso de macaneo que se realiza en las comunidades de la Mina y los Haticos del resguardo Kankuamo, el cual fueron sometidos a filtración y empacado, por último, se refrigeró la muestra mediante el uso de cavas plásticas tratando de mantener una temperatura inferior a 20 °C, con el fin de evitar degradación de esta. La información primaria corresponde a todos los datos cuantitativos y cualitativos que fueron registrados durante toda la fase de campo y experimentales. Las Fuentes Primarias. Corresponde a la información obtenida en los instrumentos de recolección de datos, tomando como referencia la técnica de la Observación, cuyo instrumento aplicado fue guía de observación.



La investigación se desarrolló teniendo en cuenta las fases descritas a continuación junto con las etapas de desarrollo.

Fase 1. Obtención de extracto acuoso proveniente de hoja de fique

El beneficio del fique inicia en el corte, las operaciones a continuación son el despalmado (corte de la hoja), desespinado (Extracción de espinas) y por último el desfibrado, el cual consta de 2 etapas:

Etapas I

- **Pesado:** Esta actividad no se contempla en las operaciones que realizan de manera habitual; sin embargo, para efectos de estimar el rendimiento se considera la misma. Una hoja de fique tiene un peso aproximado de 1,29 Kg. Posteriormente, se prepara la muestra para la operación del macaneo;
- **Descabezado:** que consiste en retirar el extremo de la hoja que lo une a la planta.
- **Desbarriga:** que consiste en raspar la hoja, esta se hace a la altura de mitad de la hoja, y se procede a hacer un nudo para evitar que se corra de la tabla de apoyo.

Etapas II

- **Macaneo:** el cual es acompañado de una base de madera y un instrumento de hierro forjado en forma de pala, el cual es denominado “Macana”. Esta operación consiste en remover manualmente la cascara que contiene la parte acuosa del fique y la fibra.
- **Batimiento de la fibra:** una vez separadas las partes se procede a hacer el batido de las pencas, el cual consiste en estrujar las fibras contra las piedras, con el fin de poder separar los residuos de cascara o contenido acuoso de la fibra.

Fase 2. Extracción de saponinas procedentes de extracto acuoso de fique

- **Recepción de materia prima.** En esta etapa se tomó de base el residuo líquido que se genera a partir de la actividad de extracción del fique.
- **Tratamiento térmico.** Se aplica el tratamiento térmico manteniendo la temperatura de 60 °C, por un tiempo de 30 minutos.
- **Deshidratación.** Durante esta etapa se busca evaporar la mayor cantidad de líquido, manteniendo una temperatura de 40 °C.



- Adición de solvente. Se toma 5 g del material biológico, a este se le adiciona una mezcla de solventes de acuerdo con el diseño experimental definido.
- Aplicación de tratamiento térmico. Nuevamente se aplica un tratamiento térmico, mediante baño de maría a una temperatura de 66 °C por un tiempo de 15 minutos. Finalmente se evapora la mayor cantidad de líquido. La muestra se toma de referencia para el análisis físico correspondiente.

Fase 3. Determinación de propiedades físicas del Extracto acuoso

Tabla 1

Propiedades físicas del extracto acuoso de Saponina

Análisis	Método	Descripción
Organolépticas	Color	Fotométrico
	Olor	Sensorial
Otras propiedades	Acidez (% ácido málico)	Volumetría (titulación 0.05N)
	pH	Potenciómetro

Fase 4. Evaluación del contenido saponina mediante el método de espectrofotometría IR y por cromatografía de gases GC-MS

Se realizó una prueba de identificación de saponinas mediante los métodos de Cromatografía de gases GC-MS y espectrofotometría IR, con el fin de analizar presencia de estas; en la muestra identificada como el mejor tratamiento del diseño experimental.

- Identificación de saponinas por GC-MS. Se realizó la cromatografía de gases mediante el cromatógrafo Agilent con puerto de inyección capilar Split, operando en modo SCAN (40-700 uma). Las temperaturas del inyector y el detector fueron de 280 °C y 300 °C, con una rampa de temperatura de 1 min a 160 °C, 15 min a 290 °C. Se utilizó extracto de saponina con un volumen de muestra 1 µL. La composición del extracto acuoso de fique se muestra en el espectro de masas obtenido cuyos números de picos obtenidos a diferentes tiempos de retención evidencian su composición.
- Identificación espectrofotometría IR. Se empleó con la finalidad de identificar y cuantificar saponinas esteroidales donde las frecuencias de absorción de



absorción y flexión características de los grupos funcionales en el compuesto analizado, el cual se lleva a cabo mediante una representación gráfica del porcentaje de transmitancia (%T) que presenta la muestra en varias longitudes de onda en cm^{-1} donde la intensidad de los picos es proporcional al cambio del momento dipolar que la absorción causó en la molécula (Fernández, 2019). El método empleado sugerido por Baccou y Col. 1977, cuya curva de calibración se realiza mediante el uso de diosgenina (0-10 ppm). Un mililitro de muestra el cual se disuelve en un volumen igual de acetato de etilo, se realiza una extracción de la muestra al sonicarse 2 veces por minuto, posteriormente se toma 500 μL de extracto y se disuelven en 500 μL de acetato de etilo. Luego se adiciona 500 μL de reactivo A (0,5 mL de anisaldehído y 99,5 mL de acetato de etilo) y 500 μL del reactivo B (ácido sulfúrico y acetato de etilo 50:50 v/v), posteriormente se lleva a un baño a 60 °C por un tiempo de 20 minutos. Finalmente, se enfría la mezcla con el fin de realizar la lectura correspondiente.

Fase 5. Desarrollo de un producto

El producto desarrollado fue un jabón en barra para ropa, como alternativa de aprovechamiento de Saponinas procedentes del jugo de hoja de fique (*Furcraea sp*), del proceso de extracción de fibra en el resguardo indígena Kankuamo - Valledupar. (Adaptado de Silva, 2011).

- RMP (extracto acuoso)
- Formulación (100 ml de aceite vegetal, 20 ml NaOH al 30 %, 100 gr extracto de sábila o Aloe vera).
- Calentamiento del agua (Temperatura 80 °C).
- Reposo (Temperatura 40- 45 °C).
- Adición de aceite vegetal (45 °C).
- Adición de aloe vera (previamente batido).
- Homogenización (tiempo aproximado de 20 min).
- Moldeado y secado (15 días aproximadamente).

Por último, se realizaron pruebas de control con el fin de dar cumplimiento en la norma técnica colombiana, 5131 del 2011. Posteriormente, se realizó una tabla comparativa de un producto comercial con el producto desarrollado de la Investigación.



Resultados

- Obtención de extracto acuoso proveniente de hoja de fique

Durante el proceso de obtención de fibra la generación de residuos sólidos es alta, ya que para obtener una libra (0,5 Kg), de fibra, se necesitan entre 10 y 25 hojas de fique o Maguey, este rendimiento depende de la especie; en este sentido, las especies de las que disponen en la zona son las siguientes:

- La especie Ayalero: requiere de 15 a 18 hojas para obtener una libra (0,5 Kg) de fibra.
- La especie Punta: requiere 20 hojas para obtener una libra (0,5 Kg) de fibra.
- La especie Panchito: requieren 30 hojas, para obtener una libra (0,5 Kg) de fibra.
- La especie Guamaca: requiere 10 hojas para obtener una libra (0,5 Kg) de fibra.



Figura 1

Proceso de extracción de fique



Figura 2

Extracto acuoso de fique (*Furcraea* sp).



- Extracción de saponinas procedentes de extracto acuoso de fique.



Tabla 2

Análisis de varianza para saponinas procedente de fique (Furcrae sp).

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Muestra	5,108 618 75	3	1,702 872 92	3,596 969 74	0,065 564 68	4,066 180 55
Columnas	1,749 006 25	1	1,749 006 25	3,694 416 94	0,090 822 78	5,317 655 07
Interacción	1,059 318 75	3	0,3531 062 5	0,745 864 52	0,554 392 41	4,066 180 55
Dentro del grupo	3,787 35	8	0,473 418 75			
Total	11,704 293 8	15				

A partir de los resultados de la ANOVA, se identificó:

Para el factor de la temperatura se obtuvo un valor de F de 3,59 lo cual es inferior al valor crítico (Valor-p), cuyo resultado fue de 4,066 180 55, en este orden de ideas se acepta la hipótesis nula $H_0 = \text{Efecto A} = 0$. Que indican que las temperaturas de extracción no ejercen ningún efecto en la concentración de saponinas presentes en el extracto acuoso procedente del proceso de macaneo, por cuanto no existe diferencias significativas entre la temperatura aplicada para la extracción de saponinas.

Para el factor del solvente se obtuvo un valor de F de 3,69 lo cual es inferior al valor crítico (Valor-p), cuyo resultado fue de 5,317; en este orden de ideas se acepta la hipótesis nula $H_0 = \text{Efecto B} = 0$. Que indican que los solventes de extracción no ejercen ningún efecto en la concentración de saponinas presentes en el extracto acuoso procedente del proceso de macaneo, por cuanto no existen diferencias significativas entre los solventes empleados para la extracción de saponinas.

Para el factor de la interacción solvente- extracto se obtuvo un valor de F de 0,745 lo cual es inferior al valor crítico (Valor-p), cuyo resultado fue de 4,066; en este orden de ideas se acepta la hipótesis nula $H_0 = \text{Efecto C} = 0$. Que indican que no hay interacción entre el solvente y el extracto acuoso procedente del proceso de macaneo de saponinas, por cuanto no existen diferencias significativas.

- Determinación de propiedades físicas del Extracto acuoso



Tabla 3

Parámetros fisicoquímicos del extracto acuoso procedente de fique

Análisis	Fisicoquímico Método Técnica	Descripción
Color real UPC	SM 2120 C – Fotométrico*	5280
Olor	Organoléptico	Característico de hojas verdes o con predominio de clorofila.
Acidez total (mg de CaCO ₃ /L)	SM 2310 B – Titulométrico	3280
pH	SM 4500-H-+B- Electromagnético	4,21

Nota. Método Analítico: Espectrofotométrico, SM 2120 C ed. 23-2017. Equipo utilizado Fotómetro.

A partir de los resultados se puede evidenciar un valor de pH de 4,21 moderadamente ácido para el extracto acuoso de saponinas, así mismo, se evidencia una acidez de 3280, expresados en mg de carbonatos de calcio; por su parte el olor de la muestra se manifiesta como característico de plantas o tallos con predominio de clorofila.

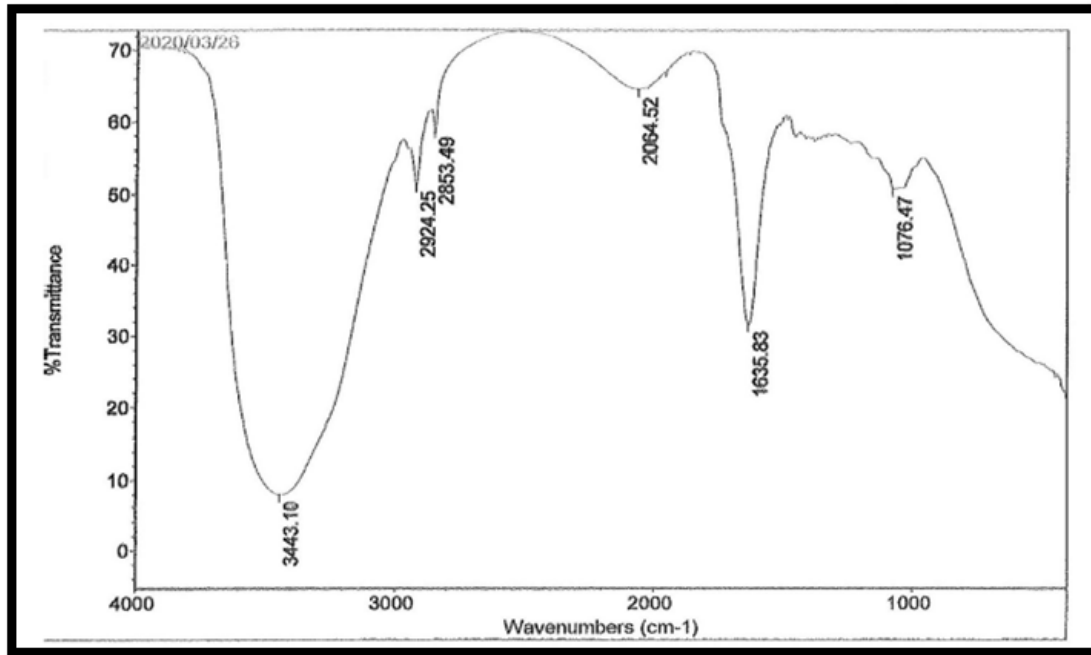
- Evaluación del contenido saponina mediante el método de espectrofotometría IR y por cromatografía de gases GC-MS

Cuantificación por método de espectrometría.



Figura 3

Espectro infrarrojo de saponina procedente de fique (Furcraea sp)



La figura 3, refleja un espectro infrarrojo sobre la presencia de saponinas en el jugo de fique; además, se aprecian 6 bandas, las posiciones y las intensidades de las 6 bandas se muestran a continuación:

Figura 4

Intensidad de banda método Infrarrojo para determinación de saponina procedente de fique (Furcraea sp)

```
Thu Mar 26 12:03:27 2020 (GMT-05:00)
FIND PEAKS:
Spectrum: 2020/03/26
Region: 4000.00 400.00
Absolute threshold: 72.484
Sensitivity: 50
Peak list:
Position: 1076.47 Intensity: 50.784
Position: 1635.83 Intensity: 31.805
Position: 2064.52 Intensity: 84.549
Position: 2853.49 Intensity: 58.873
Position: 2924.25 Intensity: 51.429
Position: 3443.10 Intensity: 8.033
```

De este modo:

Para la posición 3443,10 cm^{-1} indica presencia de alcoholes, posiblemente en estado polimérico. En cuanto a la posición 2924,25 cm^{-1} y la posición 2853,49 indica características similares a presencia de aldehídos ya que se encuentran juntas y cumpliendo con las características similares para este grupo. Sin embargo, para la posición 2064,52 cm^{-1} puede tratarse de una diazacetona. Así mismo, para la posición 1636,83 cm^{-1} hace referencia a la presencia de un carbonilo, posiblemente una cetona. Finalmente, para la posición 1076,47 cm^{-1} , se trata posiblemente de un alcohol (R-OH), siendo primario.

- Cuantificación por método de Cromatografía de gases (GC-MS).

Tabla 4

Identificación de las señales cromatográficas mayoritarias mediante GC-MS.

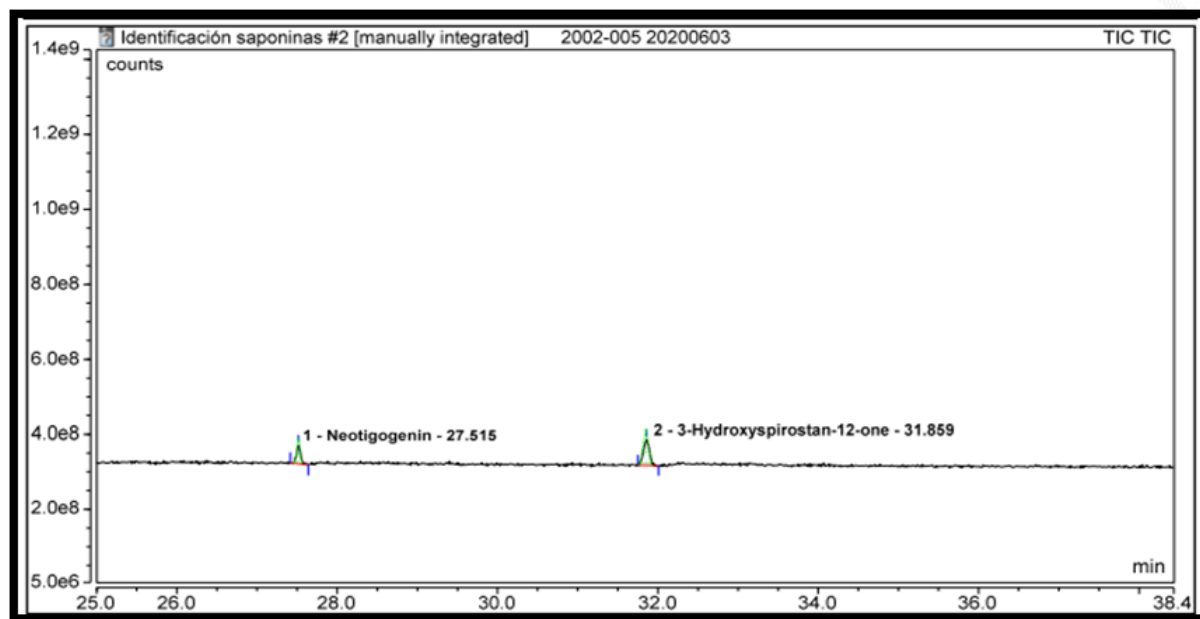
Parámetro analizado	Método de referencia o documento normativo	Resultado (unidad de medida)
Neotigogenina	Identificación de la saponina del jugo de fique (<i>furcrae</i>) mediante cromatografía de gases GC-MS	31,39 % área relativa.
3-Hydroxispirostan	Identificación de saponina del jugo de fique (<i>furcrae</i>), mediante cromatografía de gases GC-MS	68,61 % área relativa.

Se identificaron dos saponinas mayoritarias, las tigogeninas (Neotigogenina) y hecogeninas (3-Hydroxispirostan) con porcentajes de área relativa del 31,9 % y 68,61 %, respectivamente. Los análisis por cromatografía permitieron observar los dos picos mayoritarios de saponinas con porcentaje amplio para la 3-Hydroxispirostan presentes en el extracto acuoso de fique obtenido a partir de solventes.



Figura 8

Espectro de masa de la saponina tigogenina (neotigogenina) y hecogenina (3-hydroxyspirostan-12-one)



De acuerdo con la figura 8, se pudo determinar el tiempo de corrida (lectura) a partir de la muestra que corresponde al extracto acuoso de fique en alcohol, cuyo resultado fue de 37,44 min. Así mismo, el volumen de muestra corresponde a 1 μ l (microlitro = 1×10^{-6} litro); en cuanto al método de procesamiento corresponde a dilución de Saponinas SCAN. El espectro precisa en el eje de las abscisas (eje de x), el cual expresa el tiempo de la corrida en minutos desde cero a 38,4 min. Por su parte en el eje de las ordenadas (eje de y), se refleja la absorbancia (abundancia relativa). Finalmente, el nivel de pico de GC-MS de la muestra en mención expresa la posible presencia de agliconas, o no-sacáridos, de la familia de productos naturales conocidos como saponinas, estas fueron: la hecogenina (2-3 Hydroxyspirostan-12-one) y la tigogenina (1-neotigogenina), las cuales están presentes en partes desechables del fique.

- Desarrollo de un producto (jabón en barra para ropa), como alternativa de aprovechamiento de Saponinas procedentes del jugo de hoja de fique (*Furcraea sp*), del proceso de extracción de fibra en el resguardo indígena Kankuamo, Valledupar.

Figura 9

Secuencia proceso de estandarización de jabón en barra con saponinas procedente de extracto acuoso de fique (Furcraea sp).

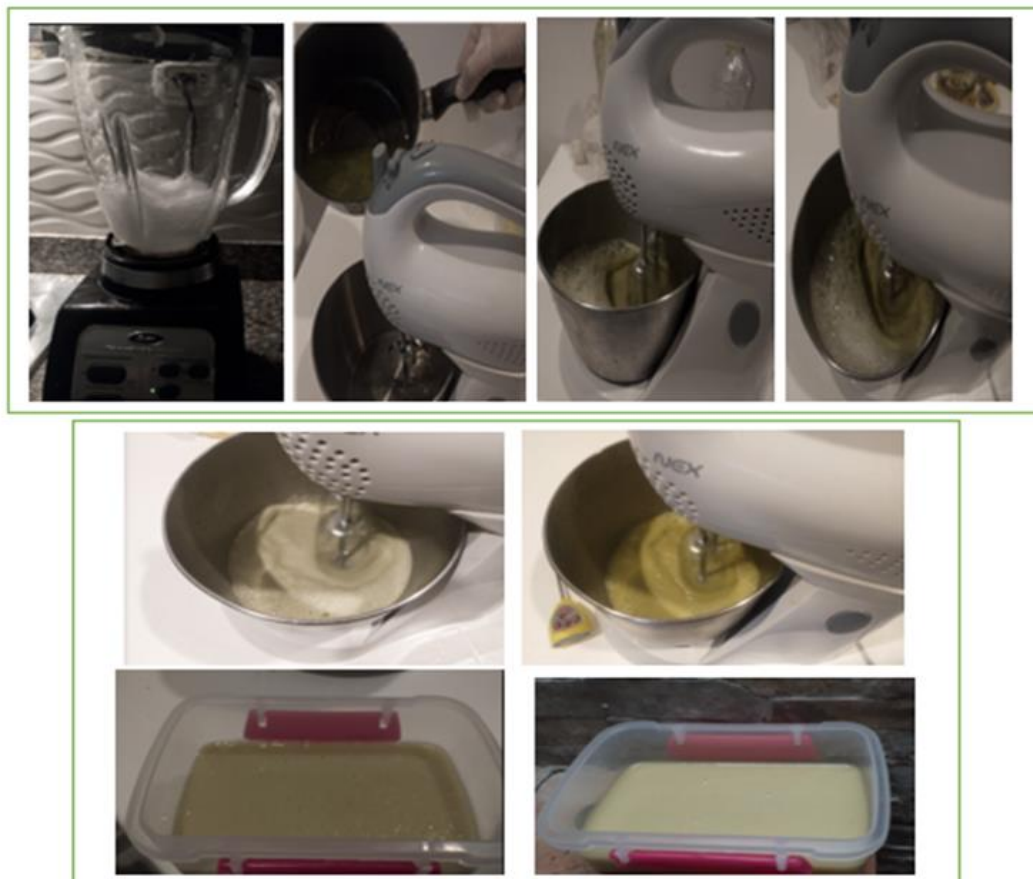


Tabla 5

Características del producto (Jabón en barra) estandarizado.

Muestra	Peso	Área	Perímetro
M1 (sábila)	156	78,7	157,4
M2	146	86,35	172,7



Figura 10

Producto estandarizado, jabón en barra con saponinas procedente de extracto acuoso de fique (*Furcraea sp*)



Tabla 6

Características físicas del producto (jabón en barra)

Muestra	Olor	Color	Textura al tacto
M1. (sábila)	Sin olor	Blanco hueso	Suave
M2.	Verde claro (pastel)	Olor a grasa	Áspera dura

Discusión

Mediante los resultados se pudo determinar que el empleo de mezclas de etanol/agua o metanol/agua para la obtención de saponinas no se ve reflejado en el aprovechamiento de estas, lo cual puede explicarse debido a la diferencia mínima de polaridades que hay entre estos alcoholes; ya que esta propiedad del solvente es la que más afecta el rendimiento de las saponinas. Por otra parte, el empleo del agua, el cual se identifica como un solvente con mayor polaridad que los alcoholes utilizados se ve limitada por la rápida fermentación que presentan las soluciones en especial las procedentes de fique; de igual manera, el factor sólido/líquido, no es relevante debido a que por un lado la relación mínima empleada asegura la humectación total del material biológico, y por otro el proceso es largo, como para asegurar la extracción de las saponinas. (Hernández, Lugo, Díaz, y Villanueva, 2005).



De acuerdo con los factores analizados temperatura e interacción solvente-extracto, de los resultados se evidenciaron que estas no ejercen ningún efecto en la concentración de saponinas presentes en el extracto acuoso procedente del proceso de extracción de fibra procedente de hojas de fique.

En cuanto a la determinación de saponinas, es preciso señalar los resultados evidenciados por Benavides, Arango, Hurtado, y Rojas, (2012), cuya identificación de saponinas procedentes de fique (*furcraea gigantea*), mediante GC-MS, arrojaron valores para tigogenina de 46,160 % área relativa, el cual es superior al valor obtenido en el presente estudio cuyo resultado fue de 31,9 % área relativa; sin embargo, frente al valor reportado para las hecogenina es de 51,440 % área relativa, el cual es un valor inferior considerando el obtenido el cual corresponde a 68,61 % área relativa. En los resultados obtenidos en los dos estudios el extracto acuoso procedente de fique presenta mayor contenido de hecogenina, a este hecho preciso, las hecogeninas presentan mayor uso que las tigogeninas; sin embargo, estas últimas representan mayor valor en el mercado farmacéutico, debido a su alta actividad biológica (MADR y MAVDT, 2006), estas a su vez inducen apoptosis en artritis reumatoide humana (Liagre et al., 2007; citado por Benavides et al., 2011).

De acuerdo con las características físicas analizadas a las muestras de jabón estandarizadas, se pudo evidenciar que existen diferencias en cuanto al olor y la textura del producto, referenciando la muestra 1 con una textura suave y agradable al tacto, lo que se atribuye a la sábila o aloe vera utilizada, lo cual le confiere características medicinales por su alto contenido de nutrientes, vitaminas y minerales (Fuentes y Martínez, 2011).

Conclusiones

Mediante la caracterización de los residuos se evidenció para la especie *Ayalero* que a partir de 1,2 Kg de hoja se obtiene 48 gr de fibra, lo que corresponde al 4 %, por cuanto se considera que 1,152 Kg, es decir, el 96 %, son residuos de este, del cual se deriva el extracto acuoso, cuyo análisis de cromatografía de gases GC- MS evidenció el contenido de saponinas, identificando dos saponinas mayoristas que corresponden a las tigogenina (Neotigogenina) y hecogenina (3-Hydroxisprostan), con porcentajes de área relativa del 31,39% y 68,61%, respectivamente. Lo que permite asociar a las contaminaciones y la acción toxica en los animales que habitan en los recursos hídricos de las diferentes comunidades del pueblo Kankuamo, frente a los resultados, las hecogeninas presentan mayor uso que las



tigogeninas; sin embargo, esta última representan mayor valor en el mercado farmacéutico, debido a su alta actividad biológica (MADR y MAVDT, 2006), estas a su vez inducen apoptosis en artritis reumatoide humana, (Liagre et al., 2007; citado por Benavides et al., 2011).

Se realizaron pruebas de calidad al producto estandarizado con respecto al producto comercial (Jabón Especial), el cual permitió evidenciar la solubilidad de los mismos, con resultado de 66 % para el primero y 71 % para el segundo, cuya diferencia del 4 % favorece al producto comercial; por su parte, la prueba de espuma evidenció un mejor resultado para el producto estandarizado con (sábila), cuyos valores evidenciaron una diferencia del 13 % de formación de espuma el cual favorece al jabón estandarizado con adición de sábila

A manera de recomendación se sugiere la siguiente: realizar pruebas que permitan la identificación de saponinas procedentes del extracto acuoso de fique concentrado y/o fermentado, con métodos diferentes, a fin de comparar con los resultados obtenidos a partir de la extracción de saponinas con solventes y evaluar la efectividad de los procesos.

Agradecimientos.

Se manifiesta un agradecimiento a la Universidad Popular del Cesar, por el apoyo y por abrir las puertas como institución de formación y desarrollo. A su vez, al rector de la IE Agrícola La Mina, el señor Aquileo Aguilar Ortiz como facilitador del proceso.



Referencias bibliográficas

- Alcaldía de Silvia. (2019). Silvia Incluyente, competitiva y sostenible 2019- 2030.
https://silviacauca.micolombiadigital.gov.co/sites/silviacauca/content/files/000105/5233_plan-agroambiental-2019.pdf
- Arias, L. (2017). *Reconfiguración Territorial del Pueblo Kankuamo* [Trabajo de grado]. Universidad Externado de Colombia. [http://www.fique/DBA-017Reconfiguración_territorial_del_pueblo_Kankuamo\(19912015\)%20antecedente.pdf](http://www.fique/DBA-017Reconfiguración_territorial_del_pueblo_Kankuamo(19912015)%20antecedente.pdf)
- Bacca, D. (2012). *Estudio Fitoquímico del jugo de fique de las especies negra común (Furcraea gigantea) y uña de águila (furcrea macriphylla) de los municipios del tambo y Guatirilla (Nariño)* [Trabajo de grado]. Universidad de Nariño.
<http://biblioteca.udenar.edu.co:8085/atenea/biblioteca/85571.pdf>
- Benavides, O., Arango, O., Hurtado, A., y Rojas, M. (2012). Cuantificación de Sapogeninas del Jugo Fresco y Fermentado de Fique (*Furcraea gigantea*) mediante. *Información tecnológica*, 23, pp. 67-76. DOI:10.4067/S0718-07642012000300009
- Casierra, F., Pérez, W., y Portilla, F. (2006). Relaciones hídricas y distribución de materia seca en especies de fique (*Furcraea* sp. Vent.) cultivadas bajo estrés por NaCl. *Revista Agronomía Colombiana*, pp. 280-289
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstractypid=S0120-99652006000200010yIng=enynrm=isoytIng=es
- Castellano, V., Yugsi, L., y Zambrano, Z. (2015). *Evaluación de la extracción de saponinas de dos variedades de agave (Sisalana Perrine, Americana L.)* [Trabajo de grado]. Universidad Técnica de COTOPAXI.
http://rraae.org.ec/Record/0063_3e023a6ee5c3df6bc1549513b0a9d08b.
- Figueroa, D., y Díaz y L. (2016). *Obtención de saponinas del corno de Gladiolo Gladiolas Communis Linnaeus) Mediante Extracción por Solventes Orgánico* [Trabajo de grado]. Universidad Nacional del Callao.
http://repositorio.unac.edu.pe/bitstream/handle/UNAC/1781/Denisse_Tesis_T%C3%ADtuloprofesional_2016.pdf?sequence=1yisAllowed=y



Flores, D., Huamàn, J., y Tomas, G. (2013). Estudio comparativo de tres metodologías cuantitativas de extracción de saponinas de la melisa officinalis Toronjil. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, 16(2), pp. 47-51.

<https://docplayer.es/121201641-Estudio-comparativo-de-tres-metodologias-cuantitativas-de-extraccion-de-saponinas-de-la.html>.

Fuentes, Y., y Martínez, L. (2011). *Incorporación de pulpa de sábila en la elaboración de jabones de tocador (sulfurados, humectantes y antisépticos)* [Trabajo de grado].

Universidad Técnica del Norte. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/331>

García, A. (2010). *Extracción, cuantificación y aislamiento de saponinas*. [Consultado 15 abril 2018].

https://www.academia.edu/8522936/TESIS_EXTRACCI%C3%93N_CUANTIFICACI%C3%93N_Y_AISLAMIENTO_DE_SAPONINAS?auto=download

Gutiérrez, H., y De la Vara, R. (2008). *Análisis y diseños de Experimentos* (2 ed.). México: Mc Graw Hill.

Guzman, B., Reynaldo, D., Christian, J., y Alvarado, P. (2015). Artículo. Saponins from *Chenopodium Quinoa Willd* and *Chenopodium Pallidicaule Aellen* as biocontrollers of phytopathogen fungi and hemolysis agents. *Revista Boliviana de Química*, 32. scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0250-54602015000100002.

Hernández, A., y Hermosilla, V. (2014). *Actividad hemolítica de extractos de ocho plantas de uso medicinal en Guatemala* [Trabajo de grado]. Universidad de San Carlos de

Guatemala. http://www.repositorio.usac.edu.gt/2065/1/06_3661.pdf

Hernández, R., Lugo, E., Díaz, L., y Villanueva, S. (2005). Extracción y cuantificación indirecta de las saponinas de agave lechuguilla Torrey. *e-Gnosis*, 3, pp. 1-9.

<http://http://www.redalyc.org/articulo.oa?=73000311>

Hurtado, J. (2015). *El proyecto de investigación. Comprensión holística de la metodología de la investigación*. Caracas: Editorial Quirón, 2015.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas [ICONTEC]. (2011). NTC 5131.

<https://www.invima.gov.co>

López, A., y Sarli, D. (2016). El modelo CIELAB, las fórmulas de diferencia de color y el uso de la norma europea en 12878 en morteros y. *Ciencia y tecnología de los*



materiales, 6, pp. 41-53.

https://digital.cic.gba.gob.ar/bitstream/handle/11746/5804/11746_5804.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Lozano, M., Ticona, E., Carrasco, C., Flores, Y., y Almanza, G. (2012). Cuantificación de saponinas en residuos de quinua real *chenopodium Quinoa Willd.* *Revista Boliviana de la Química*, 29. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0250-54602012000200002

Martínez, A., Valencia, G., Jiménez, N., Mesa, M., y Galeano, E. (2008). *Manual de prácticas de laboratorio de farmacognosia y fitoquímica*. Medellín: Universidad de Antioquia.

https://www.academia.edu/8569789/UNIVERSIDAD_DE_ANTIOQUIA_FACULTA_D_DE_QU%C3%8DMICA_FARMAC%C3%89UTICA_DEPARTAMENTO_DE_FARMACIA_MANUAL_DE_PR%C3%81CTICAS_DE_LABORATORIO_DE_FARMACOGNOSIA_Y_FITOQU%C3%8DMICA_200_8_Recopilado_y_revisado_por

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2016). *Dirección de Cadenas Agrícolas y Forestales. Diagnóstico de la cadena del Fique y su Agroindustria*. <https://sioc.minagricultura.gov.co/.../A924-FIQUE%2011092016.docx>.

Mojica, A., y Vega, J. (2006). *El cultivo de fique en Santander*. Centro Regional de Estudios Económicos Bucaramanga.

http://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/2004_julio.pdf

Rodríguez, A. (2016). *Extracción de saponinas a partir de la Furcraea hexapetala y Estudio de sus propiedades como insecticida* [Trabajo de grado]. Universidad Central “Marta Abreu”.

<http://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/7295/Ary%20Rodr%C3%ADguez%20Alvarez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Silva, D. (2004). Uso de Saponinas en la Formulación de Lavalozas. *Revista Bistua*, 2.

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90320210>

Sistema de Información para la Artesanía Siart. (2014). *Mochilas Kankuama una Expresión artesanal*. http://www.artesaniasdecolombia.com.co/PortalAC/C_noticias/la-mochila-kankuama-unaexpresion-artesanal_5200



Sistema de Información para la Artesanía Siart. (2014). *Mochilas Kankuama una Expresión artesanal*. http://www.artesaniasdecolombia.com.co/PortalAC/C_noticias/la-mochila-kankuama-unaexpresion-artesanal_5200

Tapia, M. E. (1997). Cultivos andinos subexplotados y su aporte a la alimentación.
<https://books.google.com.co/books?id=FfemqEmGXysCypg=PA179ydq=extraccion+de+saponinas&hl=es-19ysa=Xyved=0ahUKEwjx0Nm4hM7aAhVB0LmKHasSAaQQ6AEIKzAB#v=onepage&q=extraccion%20de%20saponinas&f=false>



Caracterización de pretratamientos fisicoquímicos en PP-PET para su posible biodegradación por medio de bacterias

Characterization of physicochemical pretreatments in PP-PET for its possible biodegradation by bacteria

Nicolás Zapata Ramírez⁸
Andrés Felipe Vargas Ramírez⁹
Alejandro Arango Correa¹⁰

Resumen

Los desechos generados son preocupantes ya que se busca un sistema limpio, además de una disposición adecuada. Gran proporción son polímeros, entre ellos el polipropileno y el polietilentereftalato, con alta estabilidad en el tiempo y difícil degradación biológica. En estudios, se ha demostrado que microorganismos extraídos de suelos contaminados pueden mejorar la degradación de polímeros, pero se requiere de pretratamientos fisicoquímicos que aceleren la reacción, por tanto, en este trabajo se estudia el efecto de pretratamientos fisicoquímico en polímeros y bacterias extraídas de suelos contaminados con petróleo. Se usó polietilentereftalato obtenido de botellas plásticas transparentes y polipropileno en pellets, estos fueron sometidos a 3 tipos de tratamientos: UV, Metanol y UV+Metanol, se caracterizaron por espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier y los resultados se analizaron con Chemospec en el entorno de programación R. Se hizo análisis de componentes principales, conglomerados jerárquicos y análisis de varianzas, se extrajeron muestras de suelo mezclado con crudo de petróleo y se sembraron bacterias en medios de sales minerales, suplementados con diferentes concentraciones. Posteriormente se caracterizó morfológicamente las bacterias. Se verifica que existen variaciones entre los espectros de polipropileno en el grupo carbonilo, y en el grupo CH del polietilentereftalato, lo que indica que hay cambios químicos en los polímeros debido a los pretratamientos, lo que permitiría que los microorganismos puedan degradar con mayor facilidad los polímeros. Se encontraron bacterias Gram positivas y negativas en los cultivos, la bioprospección de bacterias en suelos mezclados con petróleo podría tener un potencial de biodegradación de polímeros.

Palabras clave: Pretratamientos fisicoquímicos, PET, PP, bacterias, FTIR

⁸ Ingeniero Biomédico. Instituto Tecnológico Metropolitano ITM. Medellín, Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-0341-8950>. nicolaszapata206172@correo.itm.edu.co

⁹ Químico. Instituto Tecnológico Metropolitano ITM. Medellín, Colombia. <https://orcid.org/0000-0001-8743-1687>. andresvargas@itm.edu.co

¹⁰ Biotecnólogo. Universitaria Colegio Mayor de Antioquia. Medellín, Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-9320-7347>. alejandro.arango@colmayor.edu.co



Abstract

The waste generated is worrying since a clean system is sought, in addition to an adequate disposal. A large proportion are polymers, including polypropylene and polyethylene terephthalate, with high stability over time and difficult biological degradation. In studies, it has been shown that microorganisms extracted from contaminated soils can improve the degradation of polymers, but physicochemical pretreatments are required to accelerate the reaction, therefore, in this work the effect of physicochemical pretreatments on polymers and bacteria extracted from soils is studied. contaminated with oil. Polyethylene terephthalate obtained from transparent plastic bottles and polypropylene in pellets were used, these were subjected to 3 types of treatments: UV, Methanol and UV+Methanol, they were characterized by Fourier transform infrared spectroscopy and the results were analyzed with Chemospic in the environment of R programming. Analysis of principal components, hierarchical conglomerates and analysis of variances were carried out, samples of soil mixed with crude oil were extracted and bacteria were planted in mineral salt media, supplemented with different concentrations. Subsequently, the bacteria were morphologically characterized. It is verified that there are variations between the polypropylene spectra in the carbonyl group, and in the CH group of the polyethylene terephthalate, which indicates that there are chemical changes in the polymers due to the pretreatments, which would allow microorganisms to more easily degrade the polymers. Gram positive and negative bacteria were found in the cultures, bioprospecting for bacteria in soils mixed with oil could have a potential for polymer biodegradation.

Keywords: physicochemical pretreatments, PET, PP, bacteria, FTIR.



Introducción

En Colombia los hospitales pueden generar 5560 toneladas por año de residuos hospitalarios y similares (Quinto–Mosquera et al., 2013). Teniendo en cuenta que los residuos hospitalarios pueden ser diferenciados en dos tipos, los que son altamente peligrosos por considerar que su naturaleza es patógena y los que no, estos últimos son muy similares a los generados en hogares, según la organización mundial de la salud (OMS), la proporción de estos es de 10-25 % y 75-90 % respectivamente (*Health-Care Waste*, 2021), Aunque el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible cree que la cifra de los residuos hospitalarios peligrosos puede aumentar a un 40 % (Ministerio de Ambiente, 2017).

La disposición de residuos hospitalarios es uno de los tantos inconvenientes que tienen las instituciones prestadoras de salud debido a dos factores, el primero es la cantidad que se produce y el otro es la naturaleza de estos, ya que muchos vienen asociados con una carga biológica, la cual los hace peligrosos, incluso para el personal que trabaja en la extracción de los residuos, a este tipo de elementos se les inactiva por medio de la incineración (Valencia y Rodríguez, 2010); sin embargo aquí no acaba el problema, debido a que hay otra gran parte que es inocua, es decir que no presenta peligro biológico, entre estos una gran parte son plásticos como el polipropileno (PP) y polietilentereftalato (PET) utilizados como recipientes de medicamentos, bolsas de suero, empaques y utensilios de comida que normalmente terminan en rellenos sanitarios, propiciando un daño ambiental sin precedentes, gracias a su lenta descomposición, lo cual hace que tenga un crecimiento año tras año, teniendo en cuenta que incluso su reutilización es complicada, ya que en el estado que terminan no presentan la misma utilidad. A muchos de estos se les llama plásticos de un solo uso por lo antes mencionado, a pesar de que estos pueden ser reciclados en cierta medida, no es una solución completa porque en algunos lugares no hay empresas especializadas que puedan hacer esta labor, en especial poblaciones alejadas de centros urbanos, lugares donde se van a ver represados cada vez más por residuos de este tipo.

La excesiva producción de plásticos no biodegradables ha llevado finalmente a la acumulación de muchos de estos, ocasionando un grave daño ambiental ya que sus componentes son filtrados a reservas naturales, fuentes hídricas o incluso al aire cuando se habla de microplásticos, siendo nosotros los humanos los únicos responsables de ello, por esto es necesario empezar a buscar estrategias que permitan revertir la situación, empleando los diferentes avances científicos que se han dado, que permita crear alternativas sostenibles y



con sentido. En las instituciones prestadoras de salud como hospitales se producen grandes cantidades de residuos sólidos como plástico, entre estos (PP) y (PET) no contaminados biológicamente, los cuales pueden tener una mejor disposición final que un relleno sanitario o incineración, que finalmente terminan siendo también contaminantes. Una alternativa es la degradación de estos plásticos, que puede llevarse a cabo de diversas maneras como la degradación fisicoquímica que puede ser por fotodegradación, hidrólisis, degradación térmica o degradación microbiana (Ali et al., 2021).

Es por esto que la identificación de microorganismos con posible capacidad de biodegradar los plásticos antes mencionados, permitiría dar una disposición final más amigable con el medio ambiente además de brindar datos que puedan servir para futuros modelos de reciclaje tanto a nivel privado como estatal, además, para servir potencialmente para degradar otros tipos de polímeros.

El objetivo general del presente trabajo es evaluar los efectos de pretratamientos fisicoquímicos como es la luz ultravioleta y metanol sobre el PP y el PET, para su potencial degradación empleando bacterias extraídas de suelos contaminados con petróleo.

Para ello se debe primero realizar los pretratamientos en PP y PET, para su posterior caracterización empleando espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier (FTIR) y análisis de los resultados mediante el uso de herramientas de quimiometría empleando el paquete Chemospec dentro del entorno de programación R y segundo caracterizar morfológicamente bacterias aisladas de suelos contaminados con derivados del petróleo con potencial capacidad para degradar PET y PP.

El PP es un polímero termoplástico utilizado en varias aplicaciones tales como fibras textiles, embalaje, etiquetado, envases reutilizables, equipos de laboratorio, autopartes, entre otros (Qin, 2016). El PP es sintetizado como una película o películas multicapa, lo cual le confiere propiedades tales como resistencia a la tracción, resistencia a la tenacidad y alto punto de fusión, esto se debe al ser una poliolefina, un hidrocarburo que al perder dos átomos de hidrogeno se estabiliza con un doble enlace, lo cual le confiere estabilidad estructural. El PP es un polímero resultado de la unión de varios monómeros de propileno, este consiste en un grupo metilo unido a una cadena de carbonos también unidos a moléculas de hidrogeno (*ver figura 1*), dependiendo de la ubicación de los hidrógenos y grupos metilo en la molécula del polímero este va tener propiedades diferentes, siendo unos más estables químicamente que otros, las tres formas conocidas en las que se puede dar son: la isostática en la cual los



grupos metilos se ubican en un extremo de la cadena, la sindiotáctica, donde los grupos metilo son alternados en los lados de la cadena y la atáctica en la que los grupos metilo se alternan de forma aleatoria en la cadena (Calhoun, 2016). La capacidad de degradación de los polímeros es inversamente proporcional a la estabilidad física y química que estos posean.

Figura 1

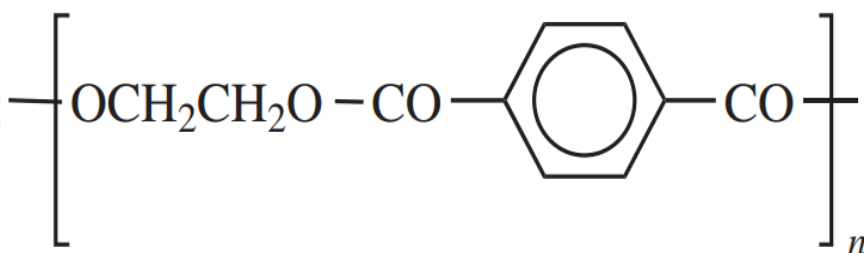
Estructura del polipropileno



Nota. Fuente: Odian (2004).

El polietileno tereftalato, llamado comúnmente PET, es un poliéster sintetizado a partir de ácido tereftálico y un diol que usualmente es etilenglicol, (ver figura 2) ampliamente usado en la industria para la producción de tejido textil, componentes electrónicos, fabricación de botellas e incluso aplicaciones de alta exigencia ingenieriles, esto se debe a sus considerables propiedades mecánicas como alta tenacidad, resistencia a la temperatura (150–175 °C) y resistencia mecánica. También es de apreciar las propiedades químicas en las que resalta la resistencia a solventes y al agua (Farah et al., 2015). Esto lo hace un material ampliamente utilizado en la industria del empackado, como en el caso del polipropileno, su estabilidad lo hace difícil de biodegradar, sumando al problema el extenso uso que se tiene en la industria de los refrescos y el agua embotellada, por esto se viene estudiando hace unos años la forma de degradar estos polímeros, para poder darles una adecuada salida y en un futuro encontrar alternativas al uso de plásticos degradables en el medio ambiente.



Figura 2*Estructura del PET*

Nota. Fuente: Odian (2004).

Estudios acerca de la biodegradación del PP son varios, se destaca el de los científicos del Departamento de Agrobiología y Agrobioquímica de la Universidad de la Tuscia Italia, donde hicieron ensayos con suelos enriquecidos de PP y otras fuentes de carbono como almidón, allí se extrajo suelo del que se cultivaría los microorganismos, para luego evaluar la biodegradación de polipropileno isotáctico, se llegó a la conclusión de que sin tratamientos fisicoquímicos previos, sólo los microorganismos anaerobios, que subsisten en ausencia de oxígeno, son capaces de adaptar y alimentar de compuestos sintéticos como el polipropileno, los aerobios vivirían en pequeñas fracciones, estableciendo cooperación con los anaerobios (Cacciari et al., 1993). En otro estudio se evidenció que una cepa extraída de un suelo enriquecido con polipropileno fue capaz de degradar polipropileno de alto peso molecular (228,000 Da), por lo tanto, hay microorganismos con capacidad para degradar polímeros artificiales, sin necesidad de calor o fotoestabilizadores (Atiq et al., 2010).

En el PET estudios sobre la biodegradación de este, se observó cómo la degradación del dimetil de tereftalato, el cual es un compuesto utilizado en la fabricación junto con el PET, es degradado en casi un 90 %, pero para el caso del PET fue poco considerable (Zhang et al., 2004). Finalmente se puede observar un estudio reciente (2018) en el que se degradó PET por especies de *Streptomyces* a escala de laboratorio, en el cual se llegó a la conclusión de que se puede dar la biodegradación de una forma más eficaz y rápida cuando se hacen pretratamientos físicos tales como la pulverización y molienda (Farzi et al., 2019).

La influencia de factores físico-químicos en la biodegradación de los polímeros de uso comercial como son el PP y el PET es de vital importancia ya que, en condiciones



normales, estos compuestos mencionados previamente son recalcitrantes a la descomposición por medio de microorganismos, pero al verse sometidos a agentes externos esta degradación puede variar, aquello se puede verificar al realizar caracterización de los compuestos tratados, donde se observa como su estructura se ve comprometida o alterada. Al alterarse la estructura original, puede darse que las enzimas de los microorganismos actúen sobre el compuesto de forma óptima (Arkatkar et al., 2009).

Cuando se da la fotooxidación, la escisión ocurre predominantemente en los eslabones débiles que tienen energías de enlace más bajas, conduciendo a la formación de radicales libres, el fenómeno se puede dar por la exposición a diferentes elementos que pueden ser físicos o químicos, aquellos son tomados como pretratamientos, estos son:

Físicos

- **Radiación UV:** la luz solar es una rica fuente de radiación ultravioleta y los desechos de polímeros vertidos al aire libre se someten a este proceso de fotoiniciación. La fotooxidación está controlada por la intensidad de la luz y conduce a la formación de radicales. Estos radicales se propagan formando otros, aumentando así su reactividad. Este pretratamiento conduce a una disminución del peso molecular medio ponderado del polímero, las cadenas escindidas terminan con mayor frecuencia de grupos carboxílicos y otros grupos funcionales como ésteres, cetonas, alcoholes y dobles enlaces. Los peróxidos e hidroperóxidos que absorben débilmente los rayos UV en el rango de longitud de onda de 290 a 400 nm juegan un papel importante en la fotoiniciación, lo que lleva a la escisión homolítica de la cadena (Arkatkar et al., 2009).
- **Pretratamiento térmico:** El pretratamiento térmico lleva a que el polímero sea más débil frente al ataque microbiano. El tratamiento térmico oxida las cadenas poliméricas, introduciendo grupos hidroxilo, carboxilo e hidroperoxilo. La formación de productos oxidados también hace que el polímero sea más hidrófilo, lo que favorece la adhesión de microorganismos (Arkatkar et al., 2009).
- **Radiaciones de alta energía**
 - **Radiación de haz de electrones:** La radiación de haz de electrones es una forma de energía ionizante que se caracteriza generalmente por su baja penetración y altas tasas de dosificación. Es una corriente de electrones concentrada y muy cargada. Los electrones pueden colimarse mediante



agujeros y rendijas, y dado que están cargados eléctricamente, pueden enfocarse y activarse mediante campos electromagnéticos. Los aceleradores a gran escala pueden producir electrones de alta energía, luego de esto se absorbe la energía de los electrones que inciden sobre el polímero; introduciendo los cambios necesarios a través de la producción de radicales que posteriormente pueden iniciar varias reacciones en el polímero. Los materiales poliméricos irradiados se vuelven frágiles (deterioro) a causa de la reducción de su peso molecular debido a la degradación. Otros cambios que podrían ocurrir incluyen la pérdida de la longitud de la cadena del polímero; disminución de la reticulación y modificaciones en el dominio cristalino. Este mecanismo de degradación se ve acentuado por la presencia de aire que conduce a una oxidación simultánea (Arkatkar et al., 2009).

- Radiación gamma: Los rayos gamma son una forma energética de radiación electromagnética producida por la desintegración radiactiva de los núcleos. Tienen la frecuencia más alta y la mayor cantidad de energía con la longitud de onda más corta de todas las ondas del espectro electromagnético. La radiación gamma puede facilitar la biodegradación del polímero. Los productos de radiolisis de baja volatilidad son extraíbles con disolventes de diferentes materiales de envasado junto poliolefinas, después de que la irradiación gamma aumentó, esto se atribuyó a la descomposición oxidativa del polímero, sus oligómeros y aditivos (Arkatkar et al., 2009).
- Ultrasonido: El ultrasonido es una onda elástica. La ultra sonicación provoca la formación de microcavidades en los compuestos. Estas cavidades generan ondas de choque al aumentar la temperatura y presión dentro de las burbujas. Como resultado, la rotura de enlaces débiles, como los de hidrógeno y se producen fuerzas de Van der Waals. Se ha investigado su uso en PET (Mahal, 2021).

Químicos

Los productos químicos pueden tener diferentes efectos como pretratamientos en la estructura polimérica, ya sea en la resistencia, flexibilidad, apariencia de la superficie, color, dimensiones o peso de los plásticos (Arkatkar et al., 2009). Los polímeros pueden ser afectados por los productos químicos de la siguiente forma:



- Ataques a la cadena polimérica, resultando en la reducción de sus propiedades físicas.
- Reaccionar u oxidar los grupos funcionales en o sobre la cadena. La despolimerización también puede tener lugar durante este proceso.
- Formación de radicales.
- Se pueden destacar alteraciones por medios físicos.
- Permitir que el solvente penetre a través del plástico.
- Desarrollar agrietamiento por tensión debido a la interacción de un "agente de agrietamiento por tensión" con tensiones moldeadas o externas.

Los productos químicos que pueden ser utilizados son ácidos de diferente naturaleza (Arkatkar et al., 2009). Estos pueden generar diferentes efectos en las poliolefinas, en el PP se dan de la siguiente manera:

- Ácido clorhídrico: cambio de color, de uno claro a marrón oscuro, dependiendo de la temperatura y la concentración a la que se es expuesto el PP.
- Ácido sulfúrico: con concentraciones menores al 70% no se registran efectos aparentes en el PP, pero cuando la concentración se aumenta por encima del 80 % se registra disminución del peso molecular y resistencia a la tracción.
- Ácido acético: a concentraciones mayores del 70 % se tiene reducción de las fuerzas intermoleculares en el PP.
- Ácido nítrico: disminución de las fuerzas intermoleculares cuando se varía la concentración, entre (10-40 %) y la temperatura (20-100 °C) respectivamente, pero no hay disminución del peso molecular.
- Ácido crómico: ataque a las regiones cristalinas y amorfas, eliminando las capas del polímero para dejar al descubierto su microestructura.

Para el PET se ha investigado como pretratamiento la aplicación de ozono, debido a que este es altamente reactivo, oxidando compuestos intermedios, formando radicales libres de grupos hidroxilo. Se ha verificado reducción del peso molecular del PET al utilizar ozono de aproximadamente un 7 % (Mahal, 2021).

Además de los pretratamientos, se investiga el uso de diferentes microorganismos que puedan ser útiles para realizar la biodegradación de PP y PET, de ellos se verifica si es un hongo, bacteria u otro tipo de organismo, el tipo de plástico que procesan, su temperatura ideal de cultivo y la eficiencia en la biodegradación (Lee y Liew, 2020). Estos son:



- *Ideonella sakaiensis* 201-F6: es una bacteria Gram negativa que degrada el PET a una temperatura de 30 °C, con una eficiencia de aproximadamente 60 mg en 6 semanas (Yoshida et al., 2016).
- *Humicola insolens*: es un hongo que degrada el PET a una temperatura de 70 °C, con una eficiencia de aproximadamente el 97 % en 96 horas cuando la muestra inicialmente era de 80 mg (Ronkvist et al., 2009).
- *Pseudomonas mendocina*: es una bacteria Gram negativa que degrada el PET a una temperatura de 50 °C, con una eficiencia del 5 % en 48 horas (Ronkvist et al., 2009).
- *Fusarium solani*: es un hongo que degrada el PET a una temperatura de 40 °C, con una eficiencia aproximada del 5 % en 24 horas (Ronkvist et al., 2009).
- *Thermobifida fusca*: es una bacteria Gram positiva que degrada el PET a una temperatura de 55 °C, con una eficiencia aproximada del 50 % luego de tres semanas cuando la muestra inicial era de 20-25 mg (Müller et al., 2005).
- *Paenibacillus urinalis* NA26, *Bacillus* sp. NB6, *Microbacterium* sp. NB6: bacterias Gram positiva que degrada el PP a una temperatura de 30 °C, con una eficiencia en la cual no se notan cambios significativos en el primer año de degradación (Atiq et al., 2010).
- *Pseudomonas aeruginosa* NB26: bacteria Gram negativa que degrada el PP a una temperatura de 30 °C, con una eficiencia no notable hasta luego de un año (Atiq et al., 2010).
- *Pseudomonas chlororaphis*, *Pseudomonas stutzeri*, y *Vibrio* sp.: bacteria Gram negativa que degrada el PP a una temperatura de 30 °C, con una eficiencia de degradación de aproximados 40 mg, luego de 175 días, cuando se tenía originalmente 1 g de muestra (Cacciari et al., 1993).

Para verificar la influencia de los factores físico-químicos en las muestras antes y después de la biodegradación, es necesario utilizar técnicas que permitan visualizar los cambios mecánicos, químicos y físicos generados. La investigación de las propiedades mecánicas consiste en el análisis de propiedades como la resistencia a la tracción de los polímeros, el alargamiento en falla y el módulo de los polímeros usando un Instron (Arutchelvi et al., 2008). En el caso de las propiedades físicas se analizan los siguientes factores:



- Morfología: microfisuras, fragilización por microscopía electrónica de barrido (SEM) y superficies por medio de microscopía electrónica de transmisión (TEM).
- Densidad, ángulo de contacto y viscosidad: antes y después de la biodegradación.
- Distribución de peso molecular: se utiliza cromatografía por permeación del gel (GPC).
- Propiedades térmicas: se verifica cómo son alteradas las temperaturas de fusión (T_m), la temperatura de transición vítrea (T_g) por medio del análisis termogravimétrico (TGA) y la calorimetría diferencial de barrido (DSC).
- Regiones cristalinas y amorfas: se utiliza difracción de rayos X y dispersión de rayos X de ángulo reducido.

Los posibles cambios químicos generados, incluyen información tal como la formación o pérdida de grupos funcionales en las moléculas de los polímeros que pueden ser estudiados por medio de espectroscopia FTIR. También se puede identificar el peso molecular de los productos degradados o de los compuestos intermedios, esto gracias a las técnicas de cromatografía de capa fina (TLC), cromatografía de gases (GC), cromatografía de gases acoplada a espectrometría de gases (GCMS), quimioluminiscencia (CL), desorción/ionización láser asistida por matriz acoplado a un detector Time- of-flight (MALDI-TOF) y resonancia magnética nuclear (Arutchelvi et al., 2008).

Entre estas técnicas se encuentra la espectroscopia FTIR. Siendo ésta última una de las más utilizadas debido a sus características especiales que permiten un fácil escalado y posteriores análisis cuantitativos por métodos computacionales. La técnica es altamente sensible de forma molecular, ya que está basada en la absorción o atenuación de radiación electromagnética por parte del compuesto irradiado, en específico de movimientos en los enlaces químicos que le componen, movimientos que generan un patrón de frecuencias y energías absorbidas (absorbancia), en el cual se ubican los modos de absorción, siendo la absorbancia la medida de concentración de diferentes especies químicas en la muestra (Bouzyk et al., 2001).

El método computacional más utilizado es la quimiometría, la cual se define como la disciplina química que utiliza métodos matemáticos y estadísticos para diseñar o seleccionar procedimientos y experimentos óptimos de medición, además de proporcionar información química máxima, analizando datos químicos. Esto sirve para analizar previamente con cuantas variables se debe trabajar, las diferencias entre muestras a nivel estadístico, los



intervalos de confianza, análisis de componentes principales, análisis de conglomerados jerárquicos, ANOVA, entre otros (Chretien y Verwaerde, 1998)(Miller, J, Miller, 2002).

Método

Materiales

Para la investigación se usó PET y PP. El PET se obtuvo a partir de botellas plásticas de una misma marca comercial de agua embotellada, se les removió la etiqueta, se eliminaron los residuos de pegamento con acetona y luego fueron lavadas con agua con jabón y finalmente enjuagadas con agua desionizada. Las botellas de PET fueron picadas en trozos de aproximadamente 10 x 10 mm y estos fueron los que se usaron posteriormente. Para el PP se usaron pellets de aproximadamente 5 x 3 mm de un polímero comercial marca Químico plásticos usado para inyección, estos fueron lavados con agua y jabón, además de ser enjuagados con agua desionizada. Todas las muestras de plásticos fueron secadas en una estufa universal Memmert UN55 a 60 °C por 24 h. Para los pretratamientos se usó metanol marca JT Baker.

Pretratamientos

Tratamiento 1

Se pesaron 5 g de cada plástico y se colocaron en beakers de 100 mL de vidrio, estos fueron expuestos a radiación ultravioleta a una longitud de onda de 254 nm, a una distancia de 20 cm durante 72 horas en una cámara de construcción propia.

Tratamiento 2

Se pesaron 5 g de cada plástico y se colocaron en beakers de 100 mL de vidrio, y se agregaron 50 mL de metanol durante 72 horas.

Tratamiento 3

Se pesaron 5 g de cada plástico, se colocaron en beakers de 100 mL de vidrio, se agregaron 50 mL de metanol, y estos fueron expuestos a radiación ultravioleta a una longitud de onda de 254 nm, a una distancia de 20 cm durante 72 horas en una cámara de construcción propia.



Caracterización por Espectroscopia Infrarroja con Transformada de Fourier (FTIR)

Los espectros de FTIR se tomaron en un equipo Shimadzu Tracer 100 usando una celda de reflectancia total atenuada (ATR) de cristal simple de Selenuro de Zinc, se tomaron en un rango de 500 a 4000 cm^{-1} , con una resolución de 2 cm^{-1} y empleando 32 escaneos por muestra.

Para cada muestra de plástico con o sin tratamiento se tomaron 20 espectros, y se clasificaron de acuerdo con la información de la Tabla 1.

Tabla 1

Nomenclatura de las muestras

Muestra y tratamiento	Nomenclatura
PP sin tratamiento	PP_a1u1
PP tratamiento 1 (UV)	PP_a1u2
PP tratamiento 2 (Metanol)	PP_a2u1
PP tratamiento 3 (UV+Metanol)	PP_a2u2
PET sin tratamiento	PET_o1u1
PET tratamiento 1 (UV)	PET_o1u2
PET tratamiento 2 (Metanol)	PET_o2u1
PET tratamiento 3 (UV+Metanol)	PET_o2u2

Nota. u1 sin tratamiento UV, u2 con tratamiento UV, a1 y o1 sin tratamiento con metanol, a2 y o2 con tratamiento con metanol.

Análisis por quimiometría

Los espectros obtenidos para cada muestra fueron exportados a texto plano (csv). Para el análisis estadístico de los datos recolectados, se empleó el paquete estadístico R de dominio público, el cuál puede ser obtenido en: <http://cran.r-project.org> y el paquete ChemoSpec <https://cran.r-project.org/web/packages/ChemoSpec/index.html>, para ello los espectros fueron transformados a absorbancia y posteriormente importados en una matriz de datos compatible con ChemoSpec.

Para todos los espectros se realizó una corrección de línea base, se removieron las frecuencias en el rango 2000-2500 cm^{-1} , que corresponden al CO_2 atmosférico previo a los análisis. Se realizaron análisis estadísticos empleando todos los datos del espectro FTIR o una fracción de estos buscando mejorar los resultados.



Análisis de componentes principales (PCA)

Este es un análisis estadístico que permite reducir un conjunto de datos complejo conservando la información de este, y arroja el número de componentes necesarios para describir los datos. Está incluido en el paquete ChemoSpec.

Análisis de conglomerados jerárquicos (HCA)

Este análisis se realiza para buscar agrupaciones de los elementos buscando una máxima homogeneidad y poder encontrar las diferencias que existen entre los grupos. Está incluido en el paquete ChemoSpec.

Agrupamiento basado en modelos

Se emplea la librería mclust del paquete ChemoSpec, este modelo se usa para buscar posibles agrupamientos de los datos asumiendo una distribución normal de estos y el criterio de información Bayesiano (BIC).

Análisis de varianza

Se realizó un análisis de variantes combinado con PCA al subdividir los datos de acuerdo con los pretratamientos realizados, esto con la finalidad de verificar diferencias en los datos de FTIR debido a los tratamientos.

Cultivo bacteriano

Se seleccionaron 6 puntos de muestreos de los suelos de compostaje de la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia (IUCMA). De cada punto, se tomaron aproximadamente 10 gramos de suelo a una profundidad de 1 cm, utilizando recipientes de plástico. Seguidamente, a cada muestra se le adicionó 20 mL de crudo de petróleo. Luego de 15 días a temperatura ambiente, las muestras se llevaron al centro de biotecnología de la IUCMA, se pesó 1 g de suelo de cada muestra. El suelo pesado fue suspendido en tubos de ensayo con 9 mL de solución de peptona, se realizaron diluciones seriadas desde 10⁻¹ hasta 10⁻¹⁰. Las muestras se sembraron en el medio de sales minerales con la siguiente composición (en g/L) MgSO₄·7H₂O 0,5, KH₂PO₄ 0,5, NaHPO₄·12H₂O 2,52, NH₄Cl 1, CaCl₂ 0,002, MnSO₄·7H₂O 0,007, FeSO₄·7H₂O 0,001 y ZnSO₄·7H₂O 0,007; suplementado con 2 g/L de extracto de levadura.



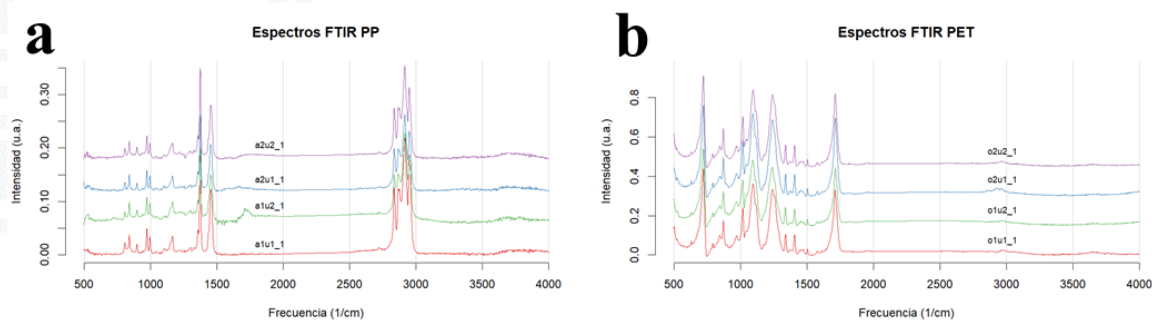
Resultados

Pretratamiento

En la Figura 3 se muestra los espectros completos FTIR obtenidos tanto para PP como para PET.

Figura 3

Espectros completos de FTIR para a) PP y b) PET con y sin tratamientos



Análisis de componentes principales (PCA)

En la Tabla 2 se muestran los resultados del número de componentes necesario para explicar por lo menos el 95 % de los datos.

Tabla 2

Resultados de PCA para el espectro completo

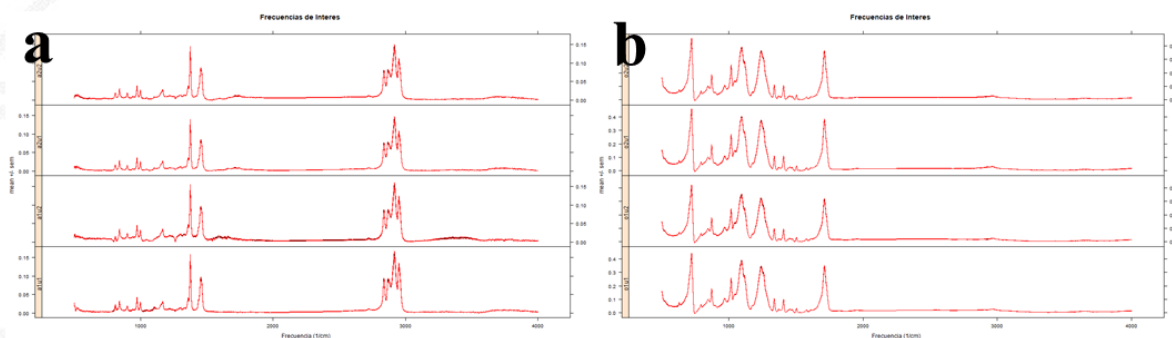
Muestra	Número de componentes necesarios
PP	7
PET	4

También se realizó un análisis de tendencias centrales y desviación del conjunto de datos, para obtener un gráfico donde se muestra qué regiones del espectro son las que más difieren entre tratamientos y así poder seleccionar las frecuencias más importantes para el análisis posterior, Figura 4.



Figura 4

Análisis de tendencias centrales y desviación a) PP y b) PET

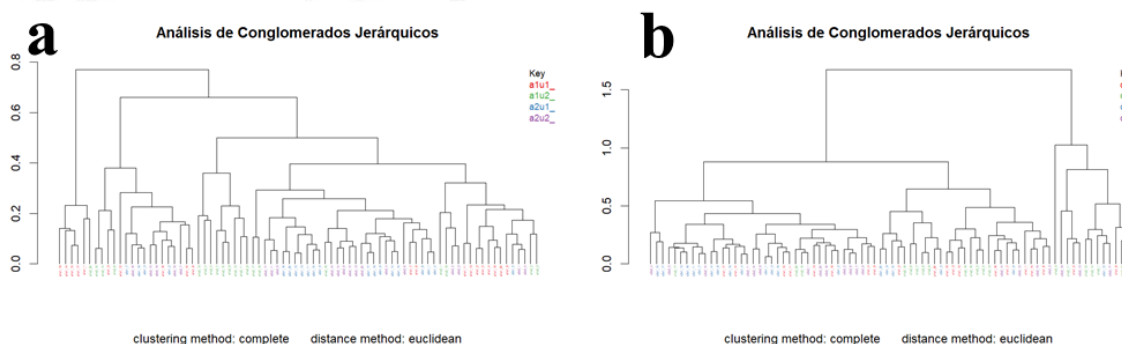


Análisis de conglomerados jerárquicos (HCA)

En la Figura 5 se muestra los análisis de conglomerados jerárquicos generados tanto para PP como para PET.

Figura 5

Análisis de conglomerados jerárquicos para a) PP y b) PET con y sin tratamientos



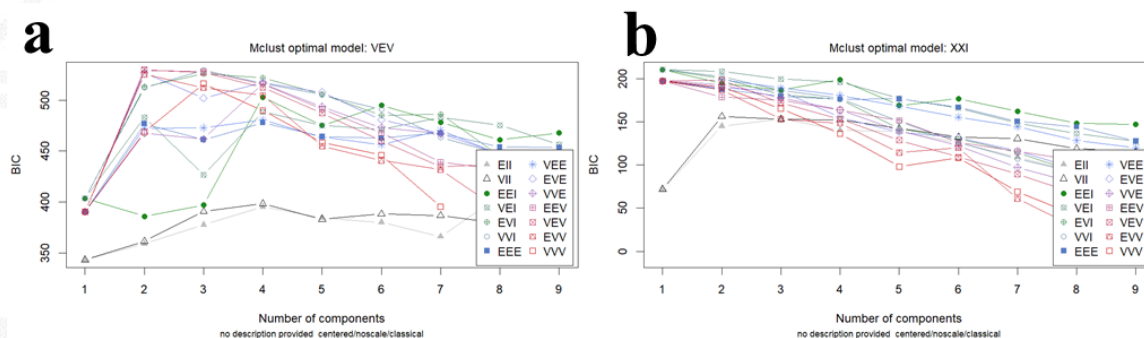
Agrupamiento basado en modelos

En la Figura 6 se muestran los resultados de la búsqueda del mejor modelo para hacer la agrupación de los datos, para el PP fue el modelo VEV y para el PET el modelo EEI.



Figura 6

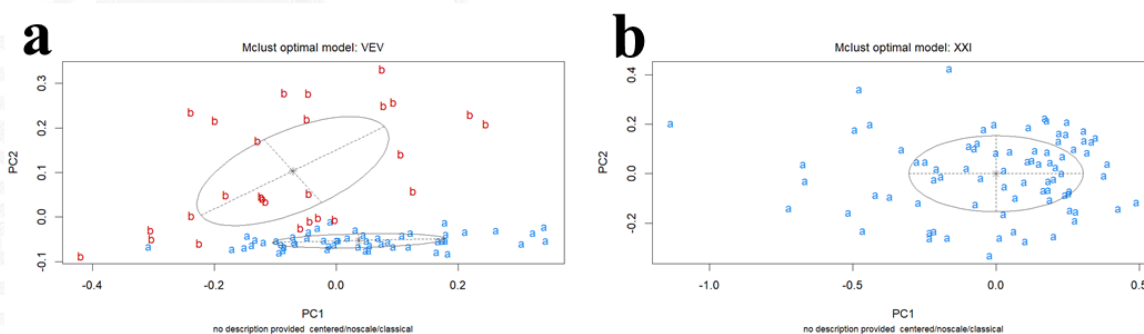
Modelo de agrupamiento óptimo a) PP y b) PET



En la Figura 7 se muestran los grupos hallados en el conjunto de datos del PP (a) y PET (b), se observa que para el PP hay dos grupos y para el PET uno, por lo tanto no se logran diferenciar los datos de acuerdo con los 3 pretratamientos aplicados.

Figura 7

Grupos encontrados en los datos a) PP y b) PET



Análisis empleando subconjunto de datos del espectro

Como se mencionó en la metodología, se filtraron regiones de los espectros FTIR obtenidos previo al análisis estadístico, con el fin de evidenciar si existe un agrupamiento de los datos debido a los 3 pretratamientos usados.

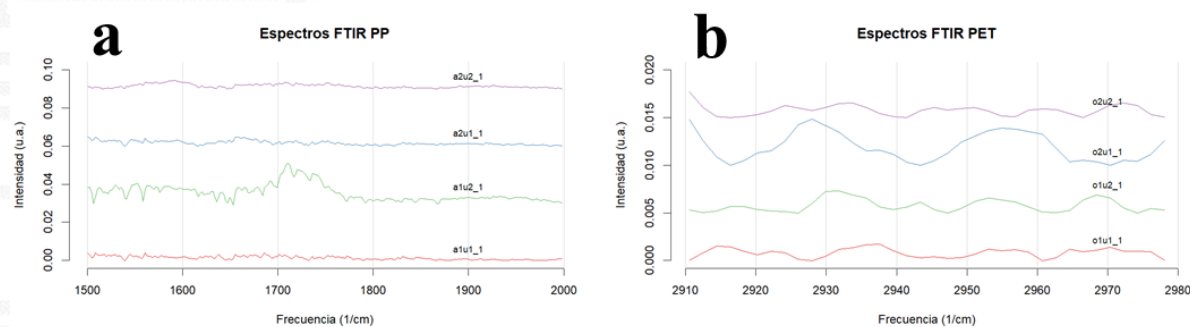


Para el PP (Figura 8a) la región seleccionada para el análisis está comprendida entre 1500 y 2000 cm^{-1} , que corresponde aproximadamente a la región donde aparecen las vibraciones del grupo carbonilo.

En el caso del PET (Figura 8b), se escogió la zona entre 2910 y 2980 cm^{-1} , en esta región se encuentran bandas asociadas a grupos CH.

Figura 8

Región espectral de FTIR para a) PP y b) PET con y sin tratamientos



PCA región espectral

La Tabla 3 muestra el número de componentes principales necesarios para explicar el 95 % de los datos después de reducir los datos a una región espectral de interés.

Tabla 3

Resultados de PCA para región espectral

Muestra	Número de componentes necesarios
PP	4
PET	10

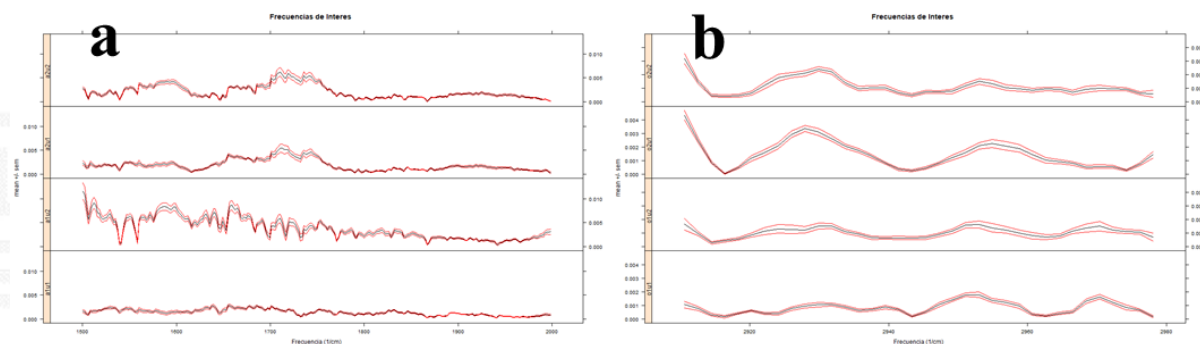
En la Figura 9 se muestran los resultados del análisis de tendencias centrales y desviaciones luego de realizarse el respectivo filtro de las frecuencias más importantes de los



espectros, en ellas se pueden apreciar claramente diferencias en las bandas de FTIR para las muestras con y sin pretratamiento.

Figura 9

Análisis de tendencias centrales y desviación a) PP y b) PET en región espectral



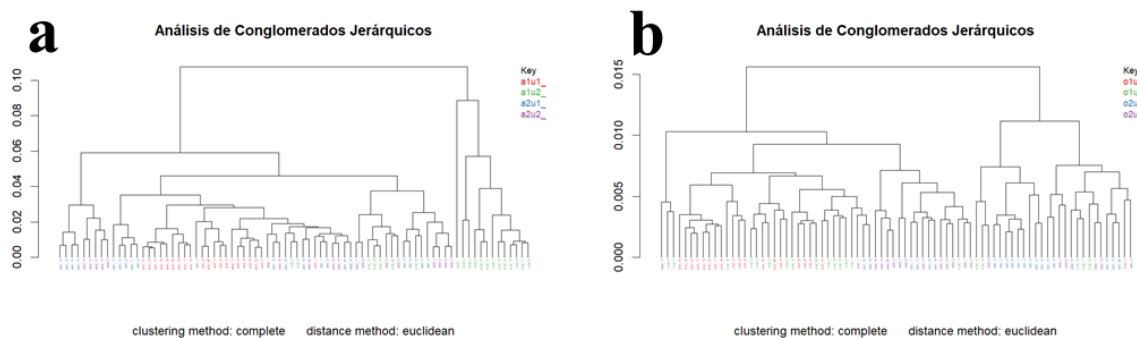
HCA por región espectral

Se puede apreciar en la Figura 10 el resultado de este análisis para el PP(a) y el PET(b). Claramente se observa una mejor distribución de los conglomerados de acuerdo con los pretratamientos, para el PP se tienen 2 conglomerados principales, uno de estos corresponde mayoritariamente a las muestras a1u2, es decir las que recibieron exclusivamente el pretratamiento con UV, el otro grupo muestra una combinación de los otros pretratamientos, pero parece haber separaciones por subdivisiones dentro de este conglomerado. En el caso del PET también se aprecian dos conglomerados principales, que a su vez muestran subdivisiones que parecen estar relacionadas con los pretratamientos realizados.



Figura 10

Análisis de conglomerados jerárquicos para a) PP y b) PET con y sin tratamientos, región espectral

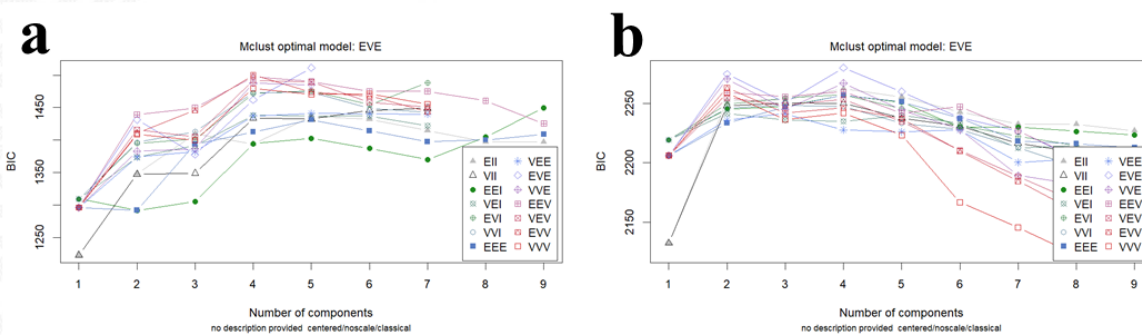


Agrupamiento basado en modelos en región espectral

Para PP como PET al restringir la región espectral analizada, el modelo óptimo encontrado fue EVE, Figura 11.

Figura 11

Modelo de agrupamiento óptimo por región espectral a) PP y b) PET



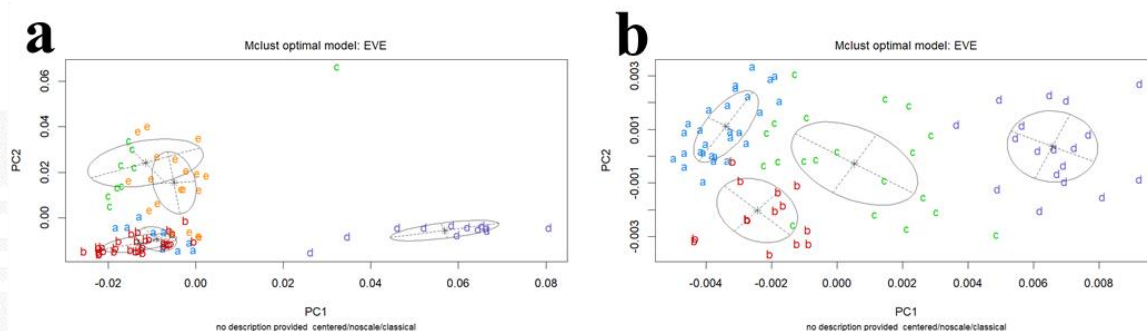
Para el PP (Figura 12a) se encontraron 5 grupos, de los cuales podemos decir que 3 de ellos están diferenciados, ya que los grupos c-e y a-b presentan superposición, que podría corresponder al PP tratado y al PP no tratado.



En el caso del PET (Figura 12b), se observan 4 grupos diferenciados, que pueden corresponder al plástico no tratados y a los que se le aplicaron los 3 pretratamientos.

Figura 12

Grupos encontrados en los datos por región espectral a) PP y b) PET



Análisis de varianza (ANOVA) combinado con PCA

Para cada plástico, los datos fueron reclasificados en una matriz de acuerdo con 2 factores, pretratamiento con metanol y pretratamiento con UV, Tabla 4, donde 0 corresponde a no aplicar el tratamiento y 1 a aplicar el tratamiento.

Tabla 4

Factores usados para el ANOVA-PCA

Factor	Nivel 1	Nivel 2
UV	0	1
Metanol	0	1

Para el PP, Tabla 5, se puede decir con un 99,9 % de confianza que el tratamiento con UV, con metanol, y con UV-metanol producen una diferencia significativa en los espectros FTIR.



Tabla 5*Resumen ANOVA-PCA PP región espectral*

	aprox F	Pr(>F)	Diferencia significativa
OH	11,39	$3,18 \times 10^{-6}$	99,9 %
UV	32,264	$1,92 \times 10^{-13}$	99,9 %
OH:UV	13,655	$3,53 \times 10^{-7}$	99,9 %

En el caso del PET, Tabla 6, se observa que existe una diferencia significativa entre los espectros FTIR después del tratamiento con OH con una confianza del 99.9%, para el tratamiento con Metanol y UV también existe una diferencia significativa en los datos, pero en este caso solo con una confianza del 99%. Para el tratamiento con UV no hay diferencia significativa.

Tabla 6*Resumen ANOVA-PCA PET región espectral*

	aprox F	Pr(>F)	Diferencia significativa
OH	38.043	5.53×10^{-15}	99.9%
UV	0.67	0.573217	0.0%
OH:UV	5.971	0.001058	99%

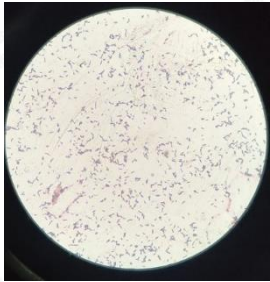

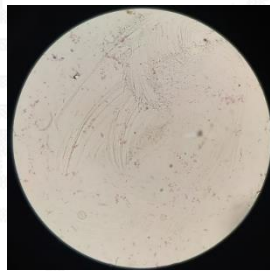

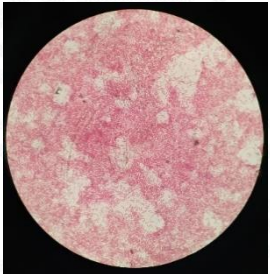
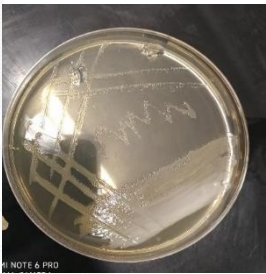
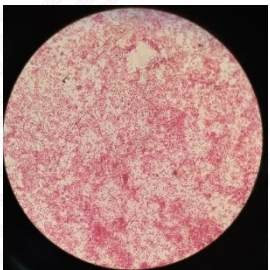

Cultivo bacteriano

Se obtuvieron 21 cepas, en la Tabla 7 se muestran algunas de las colonias de bacterias obtenidas a partir de la extracción de suelos contaminados con petróleo y crecidas en medios de sales minerales suplementados.



Tabla 7

Caracterización morfológica de algunas de las colonias bacterianas obtenidas

Imagen microscópica 100 X	Imagen macroscópica Medio de cultivo msm	Características macroscópicas	Características microscópicas
		Color: amarillo con centro blanco Olor: no Forma: rizoides Tamaño colonia: grande Borde: ondulado Superficie: plana textura: seca	Bacilos GRAM + Gruesos
		Color: amarillento, brillante. Luego de 48 horas aprox se torna a color rosado. Olor: no Forma: circular Tamaño colonia: pequeña Borde: redondeado Superficie: convexa textura: cremosa	Cocos GRAM + Muy pequeños
		Color: amarillento, brillante Olor: no Forma: circular Tamaño colonia: pequeña Borde: redondeado Superficie: convexa textura: cremosa	Bacilos GRAM - Pequeños
		Color: amarillento. Olor: no Forma: circular Tamaño colonia: pequeña Borde: redondeado Superficie: convexa	Cocobacilo GRAM -

Discusión

En la Figura 3 se aprecian los espectros FTIR obtenidos tanto para el PP como para el PET, para el PP (Figura 3a) se observan las bandas características de 1376 y 1456 cm^{-1} (vibraciones de flexión simétricas) y 2870 cm^{-1} (vibración de estiramiento) del grupo $-\text{CH}_3$, a 2920 y 2950 cm^{-1} (Vibración estiramiento asimétrico) del grupo CH_2 y a 1166 las vibraciones



de CH y CH₃, (Fang et al., 2012) todas estas asociadas con la estructura química del PP; Figura 1.

Para el PET (Figura 3b) se puede apreciar las bandas a 1730 cm⁻¹ (Estiramiento grupo carbonilo C = O), en la región 1340-1450 cm⁻¹ (estiramiento de grupo éster C-O y deformación de OH), 1240 y 1124 cm⁻¹ (Grupo tereftalato), 972, 872 y 848 cm⁻¹ (Anillos aromáticos) y 712 cm⁻¹ (Interacción grupo éster anillo de benceno) (Dos Santos Pereira et al., 2017), nuevamente características del PET, Figura 2.

Debido a que no se pueden apreciar diferencias a simple vista entre los espectros FTIR gracias a los pretratamientos, se usó la técnica de quimiometría para poder hacer una comparación entre los datos obtenidos para cada muestra y tratamiento.

El primer paso para el análisis, consiste en determinar el número necesario de componentes para explicar un 95 % de los datos experimentales, para ello se utilizó PCA, se encontró que para el PP usando el espectro completo se requieren de 7 componentes, mientras que para el PP usando la región espectral entre 1500 y 2000 cm⁻¹ se requieren de 4 componentes, es decir que las frecuencias seleccionadas fueron adecuadas para realizar la simplificación del conjunto de datos, esto mismo fue utilizado por (Chavarro y Vargas, 2022).

Para el PET el PCA mostró que para el espectro completo se requieren 4 componentes, y cuando los datos fueron limitados a las frecuencias a 2910 y 2980 cm⁻¹ se requirieron 10 componentes, en este caso no se logra una simplificación del conjunto de datos, pero como se verá más adelante, esta región espectral permite identificar variaciones entre los conjuntos de datos estudiados.

En el análisis de conglomerados jerárquicos para PP y PET en espectro completo (Figura 5a y Figura 5b respectivamente) no se observa una clara separación de los datos de acuerdo con los tratamientos aplicados, pues las diferentes subdivisiones muestran una combinación de los diferentes pretratamientos. Esto se esperaba desde los resultados de los análisis de tendencias centrales (Figura 4a y Figura 4b), ya que no es posible observar diferencias entre las bandas de los espectros para los diferentes tratamientos.

Para confirmar estos resultados se empleó el agrupamiento basado en modelos, la primera parte consiste en definir cuál es el criterio de información bayesiano (BIC), existen 14 modelos posibles para el análisis multivariado como es este caso, que se diferencian en su



distribución, volumen, forma y orientación. (Scrucca et al., 2016), para el PP en espectro completo, el modelo óptimo fue VEV, que corresponde a una distribución elipsoidal, volumen variable, forma igual y orientación variable, para el PET en espectro completo fue EEI, que es de distribución diagonal, volumen igual, forma igual y orientación en los ejes coordenados. Desafortunadamente, no se encontró una agrupación que estuviera relacionada con los pretratamientos aplicados, ya que para el PP (Figura 7a) solamente hay dos grupos y para el PET (Figura 7b) un solo grupo, lo que corrobora el resultado inicial de que no hay diferencias entre los espectros completos.

Por lo tanto, se hicieron análisis seleccionando fracciones de las regiones espectrales, como se mencionó anteriormente para PP fue en la región del grupo carbonilo, pues en esta zona se observó la mayor variación entre los espectros FTIR de acuerdo con el análisis de tendencias centrales (Figura 9a), lo mismo se realizó para el PET en la zona del grupo CH, como se observa en la Figura 9b.

Después de realizar el HCA para PP y PET en las regiones espectrales seleccionadas, se pueden observar subdivisiones con grupos característicos, posiblemente relacionados con los pretratamientos, donde se observan menores distancias entre datos que pertenecen al mismo pretratamiento (agrupaciones por colores en la Figura 10 a y b).

Tanto para PP y PET en la región espectral el modelo óptimo del BIC para la agrupación fue EVE, que corresponde a distribución elipsoidal, volumen igual, forma variable y orientación igual, Figura 11. En este caso se obtuvieron 5 grupos para el PP, pero estos corresponden realmente a 3 diferenciados, pues hay superposición entre estos, esto podría indicar que los corresponden a los pretratamientos realizados, pero no se puede decir a que pretratamiento corresponde cada grupo. Para el caso del PET se obtuvieron 4 grupos bien diferenciados, nuevamente podrían asociarse estos grupos con los pretratamientos aplicados, es posible decir entonces que después de realizar una selección de las frecuencias más importantes, es posible usar la quimiometría en datos de FTIR para identificar diferentes grupos en los plásticos después de ser sometidos a pretratamientos fisicoquímicos.

Los resultados del ANOVA-PCA (Tabla 5), permiten decir que para el PP existe una diferencia significativa entre los datos obtenidos mediante FTIR después de realizarse los pretratamientos fisicoquímicos, por tanto es posible confirmar que hay cambios en los grupos funcionales químicos del PP luego del pretratamiento fisicoquímico con UV, metanol o ambos.



Para el PET, a partir de la Tabla 6, se puede concluir entonces que el tratamiento con metanol tiene una diferencia significativa, mientras que no se puede decir lo mismo para el tratamiento con UV, para la combinación nuevamente existe una diferencia significativa, a lo mejor esto se deba solamente al metanol.

Por lo tanto, el FTIR combinado con quimiometría se convierte en una alternativa rápida y efectiva para caracterizar los grupos funcionales afectados por factores fisicoquímicos en plásticos, y puede ser una herramienta que permita decidir los mejores pretratamientos para una posible biodegradación de estos.

La toma de muestras de suelo contaminados con petróleo y la técnica de diluciones seriadas permitió obtener 21 cepas bacterianas con potencial de biodegradación de plástico. El medio de sales minerales (MSM) permitió el crecimiento de bacterias en 48 horas y la separación adecuada para obtener aislados puros o colonias bacterianas individuales. El MSM suplementado con levadura y glucosa es ideal para las bacterias hidrocarburoclásticas o degradadoras de hidrocarburos por su alta concentración de sales minerales en su metabolismo.

De las 21 cepas bacterianas se encontraron 5 bacterias Gram negativas y 16 bacterias Gram positivas. Entre las bacterias Gram negativas se encuentran cepas consistentes al género *Pseudomona sp.* Debido a su forma de bastón o bacilo de pequeño tamaño, además, de su color característico y el crecimiento en el medio de cultivo.

Esta investigación abre la posibilidad de evaluar la biodegradación de polímeros mediante bacterias como el PP y el PET, después de ser expuestos a diferentes pretratamientos fisicoquímicos, empleando espectroscopia infrarroja y análisis mediante herramientas de quimiometría

Se cumplió con el objetivo general, ya que se obtiene una metodología que permite evaluar los efectos de pretratamientos fisicoquímicos en PP y PET, mediante el análisis con FTIR y quimiometría.

Conclusiones

Usando el paquete ChemoSpec dentro del entorno de programación R, fue posible evaluar el efecto de pretratamientos fisicoquímicos en los polímeros PP y PET a partir de los



espectros FTIR. Para el PP el rango de frecuencias óptimo para el análisis quimiométrico está entre $1500-2000\text{ cm}^{-1}$, que corresponde a las vibraciones del grupo carbonilo $\text{C} = \text{O}$, se encontró también que los datos se distribuyen en 3 grupos que pueden estar relacionados con los pretratamientos, y que hay una diferencia significativa entre los datos después de exponer el PP a UV, metanol o ambos. Para el PET se encontró que el rango de frecuencias óptimo es de $2910 - 2980\text{ cm}^{-1}$ que corresponde a bandas del grupo CH, los datos se pueden clasificar en 4 grupos, lo que sugiere una correlación con los diferentes tratamientos usados, para este plástico sólo el tratamiento con metanol y metanol-UV produjo un cambio significativo en los espectros FTIR. Se identificaron 21 cepas bacterianas, tanto Gram negativas como Gram positivas, con potencial para la biodegradación de plásticos, porque fueron extraídas de suelos contaminados con petróleo.

Agradecimientos

Los investigadores agradecen al Instituto Tecnológico Metropolitano por la financiación del proyecto titulado “Bioprospección bacteriana para la degradación de Polietileno Tereftalato –PET- y Polipropileno –PP” P17203 y a la Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, ya que se contó con la infraestructura y el personal de ambas instituciones para el desarrollo de esta investigación.



Referencias

- Ali, S. S., Elsamahy, T., Koutra, E., Kornaros, M., El-Sheekh, M., Abdelkarim, E. A., Zhu, D., y Sun, J. (2021). Degradation of conventional plastic wastes in the environment: A review on current status of knowledge and future perspectives of disposal. *Science of The Total Environment*, 771. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.144719>
- Arkatkar, A., Arutchelvi, J., Sudhakar, M., Bhaduri, S., Uppara, P. V., y Doble, M. (2009). Approaches to Enhance the Biodegradation of Polyolefins. *The Open Environmental Engineering Journal*, 2(1), pp. 68–80. <https://doi.org/10.2174/1874829500902010068>
- Arutchelvi, J., Sudhakar, M., Arkatkar, A., Doble, M., Bhaduri, S., y Uppara, P. V. (2008). Biodegradation of polyethylene and polypropylene. *Indian Journal of Biotechnology*, 7(1), pp. 9–22.
- Atiq, N., Ahmed, S., Ali, M. I., Andleeb, S., y Ahmad, B. (2010). Isolation and identification of polystyrene biodegrading bacteria from soil. *African Journal of Microbiology Research*, 4(14), pp. 1537–1541.
- Bouzyk, A., Jóźwiak, L., Rak, J., y Blazejowska, J. (2001). Infrared and Raman spectroscopy of 9-acridinones. In *Vibrational Spectroscopy*, 27. [https://doi.org/10.1016/S0924-2031\(01\)00129-1](https://doi.org/10.1016/S0924-2031(01)00129-1)
- Cacciari, I., Quatrini, P., Zirletta, G., Mincione, E., Vinciguerra, V., Lupattelli, P., y Giovannozzi Sermanni, G. (1993). Isotactic Polypropylene Biodegradation by a Microbial Community: Physicochemical Characterization of Metabolites Produced. *APPLIED AND ENVIRONMENTAL MICROBIOLOGY*, 59(11), pp. 3695–3700.
- Calhoun, A. (2016). Polypropylene. *Multilayer Flexible Packaging: Second Edition*, 35–45. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-37100-1.00003-X>
- Chavarro, B. A., y Vargas, A. F. (2022). Evaluar el Software Libre R para el Análisis de Espectros Infrarrojo Empleando Quimiometría. *Ingenierías USBMed*, 20(20).
- Chretien, J. R., y Verwaerde, R. (1998). What is Chemometrics? *Analisis*, 26(8), pp. 1–13. <https://doi.org/10.1002/9783527699377.ch1>
- Dos Santos Pereira, A. P., Da Silva, M. H. P., Lima, É. P., Dos Santos Paula, A., y Tommasini, F. J. (2017). Processing and Characterization of PET Composites Reinforced With Geopolymer Concrete Waste. *Materials Research*, 20, pp. 411–420.



<https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-0734>

Fang, J., Zhang, L., Sutton, D., Wang, X., y Lin, T. (2012). Needleless melt-electrospinning of polypropylene nanofibres. *Journal of Nanomaterials*.

<https://doi.org/10.1155/2012/382639>

Farah, S., Kunduru, K. R., Basu, A., y Domb, A. J. (2015). Molecular Weight Determination of Polyethylene Terephthalate. *Poly (Ethylene Terephthalate) Based Blends, Composites and Nanocomposites*, pp. 143–165. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-31306-3.00008-7>

<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-31306-3.00008-7>

Farzi, A., Dehnad, A., y Fotouhi, A. F. (2019). Biodegradation of polyethylene terephthalate waste using *Streptomyces* species and kinetic modeling of the process. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 17, pp. 25–31.

<https://doi.org/10.1016/J.BCAB.2018.11.002>

Health-care waste. (2021).

Lee, A., y Liew, M. S. (2020). Ecologically derived waste management of conventional plastics. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 22(1).

<https://doi.org/10.1007/s10163-019-00931-4>

Mahal, Z. (2021). *Enhanced hydrolysis of polyethylene terephthalate (PET) plastics by ozone and ultrasound pretreatment*.

Miller, J. (2002). Química-Y-Quimiometria. In *Prentice Hall*.

Ministerio de Ambiente. (2017). Política Ambiental para la Gestión Integral de Residuos o Desechos Peligrosos. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 110, Issue 9).

Müller, R., Schrader, H., Profe, J., Dresler, K., y Deckwer, W. (2005). Enzymatic degradation of poly (ethylene terephthalate): Rapid hydrolyse using a hydrolase from *T. fusca*. *Macromolecular Rapid Communications*, 26(17), pp. 1400–1405.

<https://doi.org/10.1002/marc.200500410>

Odian, G. (2004). *Principles of Polimerization*. John Wiley y Sons.

Qin, Y. (2016). A brief description of textile fibers. *Medical Textile Materials*, pp. 23–42.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100618-4.00003-0>



- Quinto–Mosquera, Y., Jaramillo Pérez, L., y Cardona Arias, J. (2013). Conocimientos y prácticas de los trabajadores de un hospital sobre el manejo de residuos hospitalarios, Chocó, Colombia. *Médicas UIS*, 26(1).
- Ronkvist, Å., Xie, W., Lu, W., y Gross, R. (2009). Cutinase-Catalyzed hydrolysis of poly (ethylene terephthalate). *Macromolecules*, 42(14), pp. 5128–5138.
<https://doi.org/10.1021/ma9005318>
- Scrucca, L., Fop, M., Murphy, T., y Raftery, A. (2016). Mclust 5: Clustering, classification and density estimation using Gaussian finite mixture models. *R Journal*, 8(1), pp. 289–317. <https://doi.org/10.32614/rj-2016-021>
- Valencia, C., y Rodríguez, M. (2010). Manual de Gestión Integral de Residuos. *Manual de Gestión Integral de Residuos*, 1, 105.
- Yoshida, S., Hiraga, K., Takehana, T., Taniguchi, I., Yamaji, H., Maeda, Y., Toyohara, K., Miyamoto, K., Kimura, Y., y Oda, K. (2016). A bacterium that degrades and assimilates poly (ethylene terephthalate). *Science (New York, N.Y.)*, 351(6278), pp. 1196–1199. <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>
- Zhang, J., Wang, X., Gong, J., y Gu, Z. (2004). A study on the biodegradability of polyethylene terephthalate fiber and diethylene glycol terephthalate. *Journal of Applied Polymer Science*, 93(3), pp. 1089–1096. <https://doi.org/10.1002/app.20556>



CAPÍTULO IV

Caracterización del agua para riego en 15 fincas agrícolas del municipio Ocaña, Norte de Santander

Characterization of water for irrigation in 15 agricultural farms in the municipality of Ocaña, Norte de Santander

Ana Francisca González-Pedraza¹¹

Leónides Castellanos González¹²

Alfonso Eugenio Capacho¹³

Resumen

En los sistemas agrícolas es importante conocer la calidad del agua, dada su importancia en la productividad de los cultivos. El municipio de Ocaña cuenta con un enorme potencial en cultivos promisorios que permiten diseñar modelos agroecológicos exitosos. En tal sentido, el objetivo de este estudio fue evaluar la calidad del agua de riego previo al establecimiento de tres modelos agroecológicos con cultivos promisorios en 15 fincas del municipio de Ocaña, Norte de Santander. Para ello se tomaron 30 muestras de agua, dos muestras por finca en las fuentes de abastecimiento de agua y reservorios. Se determinaron las variables fisicoquímicas en las fuentes hídricas para conocer la calidad de estas. De acuerdo con los resultados, las concentraciones de sodio presentaron diferencias entre algunas fincas y no excedieron los estándares recomendados. La concentración de potasio y calcio no presentó diferencias estadísticas entre las fincas y están dentro de los límites permitidos. Los valores de magnesio y amonio fueron bajos. La suma total de cationes y la concentración de bicarbonatos presentó diferencias entre algunas fincas solamente. No hubo diferencias estadísticas en los cloruros, sulfatos, nitratos y carbonatos entre fincas, de igual forma los valores obtenidos no exceden los límites recomendados. No hubo diferencias estadísticas en la concentración de microelementos y los valores están dentro de los límites. En algunas fincas se encontró que la dureza total del agua superó el límite. En conclusión, los parámetros evaluados cumplen con los límites permitidos en la normativa nacional.

Palabras clave: modelos agroecológicos, aguas de riego, cultivos promisorios, calidad agua de riego.

¹¹ Ingeniera Agrónoma. Programa de Ingeniería Agronómica, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad de Pamplona. Pamplona, Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-4392-3724>. anagonzalez11@gmail.com

¹² Ingeniero Agrónomo. Programa de Ingeniería Agronómica, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad de Pamplona. Pamplona, Colombia. <http://orcid.org/0000-0001-9285-4879>. leonides.castellanos@unipamplona.edu.co

¹³ Zootecnista. Programa de Zootecnia, Agronómica, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad de Pamplona. Pamplona, Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-0044-5566>. aecapacho@unipamplona.edu.co



Abstract

In agricultural systems it is important to know the quality of water, given its importance in crop productivity. The municipality of Ocaña has enormous potential in promising crops that allow the design of successful agroecological models. In this sense, the objective of this study was to evaluate the quality of irrigation water prior to the establishment of three agroecological models with promising crops in 15 farms in the municipality of Ocaña, Norte de Santander. For this, 30 water samples were taken, two samples per farm in the sources of water supply and reservoirs. The physicochemical variables in the water sources were determined to know their quality. According to the results, the sodium concentrations showed differences between some farms and did not exceed the recommended standards. The concentration of potassium and calcium did not present statistical differences between the farms and are within the allowed limits. The magnesium and ammonium values were low. The total sum of cations and the concentration of bicarbonates showed differences between only some. There were no statistical differences in chlorides, sulfates, nitrates and carbonates between farms, in the same way the values obtained do not exceed the recommended limits. There were no statistical differences in the concentration of trace elements and the values are within limits. In some farms it was found that the total hardness of the water exceeded the limit. In general terms, the waters used for the irrigation of the farms comply with the parameters allowed in the national regulations.

Keywords: agroecological models, irrigation water, promising crops, irrigation water quality.



Introducción

La creciente población humana mundial demanda la producción de más alimentos especialmente desde el sector agrícola. Para poder cubrir esas necesidades, es necesario incrementar la producción agrícola lo que necesariamente requiere del uso del riego para el aprovechamiento de las tierras asegurar cosechas exitosas. En ese sentido, la agricultura usa el 70 % del agua disponible, aunado a las pérdidas que ocurren por la evapotranspiración de los cultivos y se estima que el agua destinada al riego aumentará un 14 por ciento para 2030 (FAO, 2007a). La agricultura de regadío representa el 20 % del total de la superficie cultivada y aporta el 40 % de la producción total de alimentos en todo el mundo.

En los sistemas agrícolas es importante conocer la calidad del agua, dada su importancia para la vida y productividad de los cultivos. Los sistemas de producción agrícola convencional basados en el monocultivo y la utilización excesiva de agroquímicos generan problemas de proliferación de plagas y enfermedades por la resistencia que los organismos desarrollan a los compuestos de síntesis química. De igual forma, esas moléculas causan problemas de contaminación de aguas, aire y suelo, poniendo en riesgo la salud de los ecosistemas y de las personas (Guerrero et al., 2021; Castellanos et al., 2020; Orellana et al., 2020).

Existen alternativas de producción más limpia que son ecológicamente viable, socialmente aceptables y económicamente viables. Entre estas son los modelos de producción agroecológica. Pueden citarse, por ejemplo, los sistemas agroforestales en los que se combina cultivos frutales y otros cultivos arbóreos con sistemas arables y/o animales simultáneamente. Estos sistemas presentan la ventaja de contar con una gran variedad de productos para la venta y el auto sostenimiento de las familias de los agricultores, mayor flujo de ingresos, menor riesgo con poco capital, mejoramiento del estado físico, químico y biológico del suelo por aumento de la materia orgánica lo que a su vez mejora las condiciones micro climáticas tanto para los cultivos como para los animales tales como captación de luz, regulación de temperatura, mantenimiento de la humedad del suelo, y control de los vientos, etc. (Escalante et al., 2019; FAO, 2007b).

El principio de los sistemas agroforestales se basa en la biodiversidad de plantas y animales que permite un mayor flujo de energía y materia para un mayor desarrollo de los individuos. Por ejemplo, los productores captan y aprovechan la energía de la luz solar para transformar sustancias inorgánicas. Los consumidores primarios se alimentan de los



productores y los consumidores secundarios se alimentan de otros animales. Por último, los descomponedores aprovechan los restos de animales y vegetales, descomponiendo la materia orgánica en inorgánica (Hernández et al., 2017; Bayon, 2006).

Las condiciones de clima y suelo con las que cuenta el municipio de Ocaña permite el establecimiento de modelos agroecológicos exitosos. En tal sentido, el objetivo de esta investigación fue evaluar la calidad del agua de riego para el establecimiento de tres modelos con cultivos promisorios en 15 fincas del municipio de Ocaña, Norte de Santander. Esta investigación formó parte del Proyecto Plantar denominado: Desarrollo estratégico agroecológico con uso de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC), para el fortalecimiento de cultivos promisorios en el municipio Ocaña, Norte de Santander bajo el Convenio Especial 00356 de Colciencias.

Método

El estudio se llevó a cabo en el municipio de Ocaña ubicado en el departamento Norte de Santander ubicado en las estribaciones de la Cordillera Oriental (CORPONOR, 2010).

Figura 1

Mapa de ubicación del municipio Ocaña, Norte de Santander



Nota. Fuente: CORPONOR (2010).



Se usó la información del último censo del DANE (2015) para la población agrícola en el Departamento de Norte de Santander (Gráfico 1). Con base en esa información, se seleccionaron las familias participantes teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Vocación agrícola.
- Superficie de tierra disponible de tres hectáreas.
- Contar con dos hectáreas para el desarrollo del proyecto.
- Estar categorizado como pequeño productor agrícola según el decreto 780 de 2011 del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural).
- Compromiso para participar en el proyecto.
- No haber participado en proyectos de índole similar.
- Saber leer y escribir.

Muestra

La muestra poblacional estuvo conformada por 15 familias (con cuatro personas por familia y aproximadamente 60 personas en total). Se realizó el cálculo por medio de la fórmula matemática de muestreo aleatorio (1).

$$n = \frac{z^2(p * q)}{e^2 + \frac{z^2(p * q)}{N}} \quad (1)$$

Donde:

Z = Grado de confianza del 95% con valor de Z equivalente a 1,96.

e = Margen de error de 10%.

N = Tamaño de la población (total de fincas integrantes del proyecto en el municipio).

p = probabilidad de éxito de 50%.

q = probabilidad de fracaso de 50%.

Los datos se procesaron mediante el software estadístico SPSS.

Cobertura del proyecto

El área total de intervención fue de 30 ha (2 ha por familia), correspondientes a minifundios de ocho veredas. Dentro de cada finca se escogieron tres modelos



agroecológicos adecuados a las condiciones agroclimáticas de la zona y con la participación de los agricultores (*ver tabla 1*).

Tabla 1

Fincas seleccionadas y modelos agroecológicos a implementar en el municipio Ocaña, Norte de Santander

Finca	Modelo 1. Nogal cafetero-Aguacate-Maíz (NC-A-M)	Finca	Modelo 2. Nogal cafetero-Cacao-Plátano (NC-C P)	Finca	Modelo 3. Nogal cafetero-Aguacate-Frijol (NC-A-F)
1	El Caracol	1	El Zancudo	1	Los Guasimales
2	Mosquera	2	San José	2	El Porvenir
3	San Jacinto	3	Zorro Cuco	3	Villa Ángel
4	Vida Tranquila	4	El Caimito	4	La Estrella
5	El Motilón II	5	Doña Juana	5	Casita

Nota. Fuente: Equipo Investigador Plantar, 2019.

Análisis de las muestras

Se tomaron muestras de agua siguiendo el protocolo establecido por el laboratorio en cada una de las fuentes hídricas dentro de cada predio. Se determinó las concentraciones de las variables fisicoquímicas en las fuentes hídricas a fin de determinar la calidad de estas aguas para el uso agrícola (*ver tabla 2*).



Tabla 2

Variables fisicoquímicas analizadas en las aguas de riego utilizadas en las fincas participantes del proyecto, municipio Ocaña, Norte de Santander.

Cationes						
Sodio	Potasio	Calcio	Magnesio	Amonio	Suma	
(meq/L)						
Aniones						
Cloruros (Cl ⁻)	Sulfatos (SO ₄ ⁼)	Carbonatos (CO ₃ ⁻)	Bicarbonatos (HCO ₃ ⁻)	Nitratos (NO ₃ ⁻)	Fosfatos (PO ₄ ⁼)	Suma
(meq/L)						
Elementos Químicos						
Hierro	Manganeso	Cobre	Zinc	Boro		
(ppm)						
Dureza						
Dureza total (CaCO ₃) (mg/L)	pH	Conductividad eléctrica CE (mS/cm)	Relación de Absorción de Sodio RAS			

Nota. Fuente: Equipo Investigador Plantar, 2019.

Análisis estadístico de los datos recopilados

Para determinar diferencias de las variables fisicoquímica de las aguas de riego entre las fincas se hizo un análisis de varianza, cuando este resultó significativo ($p < 0,05$) se aplicó una prueba de comparación múltiple de medias de Tukey, empleando el software estadístico SPSS versión 21.

Resultados

De acuerdo con los resultados, la concentración de Na⁺ fue significativamente más baja ($p < 0,05$) en la finca 1 de los modelos 1 y 2 y en la finca 3 del modelo 3, con el respeto al resto de las fincas. En los modelos 1 y 2 no hubo diferencias estadísticas ($p > 0,05$) entre las fincas 2, 3, 4 y 5, mientras que en el modelo 3 las fincas 1 y 5 presentaron la concentración más alta de Na⁺ cuyo valor difirió estadísticamente de la finca 3 para ese mismo modelo (*ver tabla 3*).



Tabla 3

Concentración de cationes en las aguas de las 15 fincas del municipio Ocaña

Finca	Modelo	Cationes					Suma total cationes
		Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	NH ₄ ⁺	
(meq/L)							
1. El Caracol	Modelo 1	0,12c	0,02c	2,99a	0,59bcdef	0,03a	3,75abc
2. Mosquera		0,23ab	0,05c	3,27a	0,26defg	0,04a	3,83abc
3. San Jacinto		0,20ab	0,06bc	2,54a	0,42bcdefg	0,04a	3,25abcd
4. Vida Tranquila		0,71abc	0,04c	2,90a	1,21a	0,03a	4,88a
5. El Motilón II		0,86ab	0,06bc	0,67b	0,73bcd	0,04a	2,35cdef
1. El Zancudo	Modelo 2	0,08c	0,02c	0,65b	0,12fg	0,02a	0,89efg
2. San José		0,77abc	0,06bc	0,69b	0,61bcde	0,02a	2,14cdefg
3. Zorro Cuco		0,31ab	0,09bc	0,16b	0,11g	0,03a	0,69fg
4. El Caimito		0,22ab	0,06bc	0,08b	0,04g	0,03a	0,42fg
5. Doña Juana		0,19ab	0,04c	0,05b	0,04g	0,04a	0,35g
1. Los Guasimales	Modelo 3	0,89a	0,13abc	1,00b	0,74abc	0,03a	2,77bcde
2. El Porvenir		0,21ab	0,23a	0,63b	0,17efg	0,05a	1,27efg
3. Villa Ángel		0,14c	0,02c	3,55a	0,82ab	0,04a	4,56ab
4. La Estrella		0,68abc	0,16ab	0,62b	0,26defg	0,03a	1,74defg
5. Casita		1,07c	0,07bc	0,57b	0,31cdefg	0,03a	2,05cdefg
CV (%)		40,38	44,33	24,80	27,82	0,00	20,88
EE*		0,13	0,02	0,24	0,08	0,00	0,34

Nota. Valores promedios dentro de las columnas seguidos por letras minúsculas distintas difieren estadísticamente para un nivel de significancia $p < 0,05$ según prueba de Tukey.

Fuente: Equipo Investigador Plantar, 2019.

Es importante destacar que las concentraciones de Na⁺ presentes en las aguas de riego de las fincas 4 y 5 del modelo 1 (0,71 y 0,86 meq/L respectivamente), la finca 2 del modelo 2 (0,77 meq/L) y de las fincas 1, 4 y 5 del modelo 3 (0,89, 0,68 y 1,07 meq/L, respectivamente), superan los límites máximos permitidos para aguas de riego (0-40 meq/L). Los valores de Na⁺ se encuentran dentro de los estándares recomendados para aguas de riego (0-0,2 meq/L) (Ayers y Westcot, 1985).

Ninguna diferencia estadística se encontró en la concentración de K⁺ entre las fincas en los tres modelos, con excepción de la finca 2 del modelo 3 en donde esta fue estadísticamente mayor ($p < 0,05$) en relación con el resto de las fincas y exceptuando las



fincas 1 y 4 de ese mismo modelo. El Ca^{+2} por su parte fue mayor ($p < 0,05$) en las fincas 1, 2, 3 y 4 del modelo 1 y la finca 3 del modelo 3 con respecto a las cinco fincas del modelo 2 y las fincas 1, 4 y 5 del modelo 3, mientras que entre ellas no hubo diferencias. La concentración más alta de Ca^{+2} se presentó en la finca 3 del modelo 3 (3,55 meq/L). Entre las fincas del modelo 2 no se observó diferencias significativas. La concentración de calcio de las aguas de riego se encuentra dentro de los límites permitidos (Bartok, 2009).

La concentración de magnesio en las aguas de riego resultó más alta ($p < 0,05$) en la finca 4 (1,21 meq/L), con respecto a las otras fincas del modelo 1 y sin diferencia estadística con las fincas 1 y 3 del modelo 3, que a su vez se diferenciaron de las otras fincas de este modelo. Hubo diferencias entre las fincas de los tres modelos agroecológicos, sin embargo, los valores de concentración en general fueron bajos (Biernbaum, 1995). El NH_4^+ por su parte no presentó diferencias estadísticas entre las fincas, la concentración fue baja y no superó los límites máximos permitidos en la normativa nacional (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 1984; Ayers y Westcot, 1985).

La suma total de cationes presentó los mayores valores para las fincas 1, 2, 3, y 4 del modelo 1, sin diferencia con la finca 3 del modelo 3. Hubo diferencias entre las fincas de los modelos 1 y 3 pero no dentro de las fincas del modelo 3.

En relación con la concentración de aniones en las aguas de riego de las 15 fincas se encontró que los cloruros (Cl^-) no presentaron diferencias entre fincas en los tres modelos agroecológicos. Sin embargo, es importante enfatizar que los valores superaron los límites máximos (0-30 meq/L) en la mayoría de los casos con excepción de las fincas 3 y 4 del modelo 1 y 4 del modelo 2. La concentración de sulfatos (SO_4^-), en la mayoría de las aguas de riego fue baja y no superó los máximos permitidos (0-20 meq/100 L) (FAO, 1997) (Tabla 4).



Tabla 4

Concentraciones de aniones en las aguas de riego de las fincas del municipio Ocaña.

Finca	Modelo	Aniones						Suma total aniones
		Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻²	PO ₄ ⁻²	
(meq/L)								
1. El Caracol	Modelo 1	0,42a	0,09b	0,05a	2,45abc	0,004a	0,24a	3,25abc
2. Mosquera		0,30a	0,09b	0,10a	2,55ab	0,005a	0,32a	3,36ab
3. San Jacinto		0,28a	0,09b	0,10a	2,25abcd	0,005a	0,20a	2,92abcd
4. Vida Tranquila		0,28a	0,52a	0,15a	2,90a	0,003a	0,31a	4,16a
5. El Motilón II		0,38a	0,11b	0,05a	1,55bcde	0,041a	0,21a	2,34bcdef
1. El Zancudo	Modelo 2	0,43a	0,08b	0,05a	0,30efg	0,005a	0,17a	1,03ef
2. San José		0,36a	0,08b	0,05a	1,20cdefg	0,004a	0,25a	1,94bcdef
3. Zorro Cuco		0,40a	0,08b	0,05a	0,40efg	0,004a	0,31a	1,24ef
4. El Caimito		0,24a	0,09b	0,05a	0,10g	0,003a	0,34a	0,81f
5. Doña Juana		0,36a	0,10b	0,05a	0,20fg	0,004a	0,35a	1,07ef
1. Los Guasimales	Modelo 3	0,52a	0,13b	0,05a	1,50bcdef	0,041a	0,27a	2,50bcde
2. El Porvenir		0,52a	0,10b	0,05a	0,70efg	0,004a	0,15a	1,52def
3. Villa Ángel		0,36a	0,25ab	0,10a	3,40a	0,004a	0,21a	4,33a
4. La Estrella		0,46a	0,08b	0,05a	1,00defg	0,037a	0,17a	1,79cdef
5. Casita		0,34a	0,12b	0,05a	1,00defg	0,017a	0,38*	1,90bcdef
CV (%)		59,36	67,93	67,08	23,45	267,99	24,77	17,20
EE*		0,16	0,06	0,03	0,24	0,02	0,04	0,28

Nota. Valores promedios dentro de las columnas seguidos por letras minúsculas distintas difieren estadísticamente para un nivel de significancia $p < 0,05$ según prueba de Tukey.

Fuente: Equipo Investigador Plantar, 2019.

La concentración de nitratos y carbonato fue similar entre las diferentes fincas y los valores obtenidos no superaron los máximos recomendados para aguas de riego (0-5 meq/L y 0-0,1 meq/L, respectivamente). El ión bicarbonato (HCO_3^-) por su parte, resultó significativamente mayor en las aguas de la finca 3 del modelo 3 sin diferencia con las fincas 1, 2, 3 y 4 del modelo 1. La mayoría de las fincas en los modelos 2 y 3 no presentaron diferencias estadísticas en las concentraciones de HCO_3^- . Los valores encontrados en estas aguas no exceden los valores permitidos (0-10 meq/L) (Ayers y Westcot, 1985).

En cuanto a la suma total de aniones, esta fue más alta en las aguas de la finca 4 del modelo 1 (4,16 meq/L) y la finca 3 del modelo 3 (4,33 meq/L), mientras que entre estas dos



no se observaron diferencias. La concentración más baja correspondió a la finca 4 del modelo 2 (0,81 meq/L), y esta solamente resultó diferente de las fincas 1 a la 4 del modelo 1 y las fincas 1 y 3 del modelo 3 (ver tabla 4).

No hubo diferencias estadísticas en la concentración de Fe de las aguas de riego de las 15 fincas de los tres modelos y los valores de Fe no superan los límites máximos permitidos (5 meq/L según el Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible, Decreto 1594 de 1984 y la Resolución 1207 de 2014) con excepción del valor extremadamente alto observado en la finca 3 del modelo (14,58 meq/L) (ver tabla 5) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 1984; Miranda et al., 2007; Castellanos et al., 2020).

Tabla 5

Concentraciones de microelementos y dureza en las aguas de riego en las fincas del municipio Ocaña.

Finca	Modelo	Elementos químicos					Dureza del agua			
		Fe	Mn	Cu	Zn	B	Dureza Total (CaCO ₃)	pH	CE	RAS
		ppm					(mg/L)	(mS/cm)		
1. El Caracol	Modelo 1	0,20a	0,04b	0,02a	0,26a	0,24a	179,50a	7,73a	0,39abcd	0,09d
2. Mosquera		0,98a	0,05b	0,02a	3,24a	0,36a	176,00a	7,86a	0,41abc	0,17d
3. San Jacinto		0,87a	0,04b	0,03a	0,28a	0,27a	148,00ab	7,94a	0,39abcd	0,16d
4. Vida Tranquila		0,66a	0,04b	0,03a	0,26a	0,30a	205,50a	8,07a	0,51ab	0,45cd
5. El Motilón II		0,48a	0,33ab	0,04a	0,04a	0,21a	70,00cd	8,02a	0,25cdef	1,03b
1. El Zancudo	Modelo 2	1,40a	0,04b	0,02a	0,26a	0,42a	38,50cd	7,94a	0,08f	0,12d
2. San José		1,81a	0,11b	0,03a	0,04a	0,39a	59,50cd	8,03a	0,25cdef	0,96b
3. Zorro Cuco		0,25a	0,12b	0,04a	0,28a	0,26a	13,50cd	8,00a	0,09f	0,85bc
4. El Caimito		1,27a	0,08b	0,03a	0,04a	0,30a	5,50d	7,99a	0,05f	0,94b
5. Doña Juana		0,69a	0,04b	0,03a	0,27a	0,30a	4,50d	7,87a	0,05f	0,93b
1. Los Guasimales	Modelo 3	0,55a	0,09b	0,03a	0,04a	0,15a	87,00bc	7,45a	0,31bcde	0,95b
2. El Porvenir		3,38a	0,50a	0,03a	0,31a	0,27a	39,50cd	7,88a	0,16ef	0,34d
3. Villa Ángel		14,58a	0,05b	0,02a	0,30a	0,21a	218,00a	7,76a	0,55a	0,10d
4. La Estrella		0,83a	0,10b	0,03a	0,02a	0,21a	43,50cd	7,86a	0,18def	1,04b
5. Casita		1,11a	0,05b	0,04a	0,02a	0,10a	44,00cd	8,04a	0,22cdef	1,67a
CV (%)		174,8	76,52	0,00	176,19	41,60	20,84	3,58	21,31	17,53
EE*		3,76	0,06	0,00	0,73	0,08	13,09	0,20	0,04	0,08

Nota. Valores promedios dentro de las columnas seguidos por letras minúsculas distintas difieren estadísticamente para un nivel de significancia $p < 0,05$ según prueba de Tukey.

Fuente: Equipo Investigador Plantar, 2019.

La concentración de Mn fue mayor ($p < 0,05$) en la finca 2 del modelo 3 (0,50 ppm), y fue diferente de las demás fincas con excepción de la finca 5 del modelo 1 (0,33 meq/L). Esta última finca no presentó diferencias con el resto de las fincas y entre fincas tampoco hubo diferencias estadísticas. De igual forma, los valores encontrados con excepción de los arriba mencionados no excedieron el límite máximo permitido (0,2 meq/L) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 1984; Ayers y Westcot, 1985).

Las concentraciones de Cu, Zn y B no presentaron diferencias estadísticas en las aguas de riego entre fincas en los tres modelos. Los niveles de Cu se encuentran dentro de los límites permitidos para las aguas de riego (0,2 meq/L), la concentración de Zinc en la mayoría de los casos estuvo por debajo de los niveles máximos (2 meq/L) con excepción de la finca 2 del modelo 1 (3,24 meq/L). La concentración de B en las aguas de riego estuvo por debajo del límite máximo permitido (0-2 meq/L) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 1984; Ayers y Westcot, 1985; Bartok, 2009).

La dureza total del agua fue más alta en la finca 3 del modelo 3 (218,0 mg/L de CaCO_3) y en las fincas 1, 2 y 3 del modelo 1 (>175 mg/L). Estas concentraciones fueron diferentes de las encontradas en las fincas del modelo 2 y el resto de las fincas del modelo 3. El agua de riego de todas las fincas del modelo 1, cuatro fincas del modelo 3 (excepto finca 1) y la finca 3 del modelo 3 superaron el límite de 54 mg/L considerandos estas aguas como muy duras (Bartok, 2009).

Los valores más altos de CE se encontraron en la finca 4 del modelo 1 (0,51 mS/cm) y en la finca 3 del modelo 3 (0,55 mS/cm), los cuales difirieron con mayoría de las fincas exceptuando las fincas 1, 2 y 3 del modelo 1. Entre la mayoría de las fincas no se observaron diferencias. El RAS alcanzó un valor de 1,67 en la finca 5 del modelo 3 con diferencia del resto de las fincas, aunque este valor es inferior al nivel de riesgo de 3, establecido para los cultivos por Ayers y Wescot (1985). Se observó diferencias estadísticas entre las fincas de los modelos 2 y entre las del modelo 3.

Discusión

Tanto el tipo como la concentración de cationes y aniones presentes en las aguas de riego pueden afectar su calidad y disponibilidad para las plantas afectando los rendimientos de los cultivos. Una alta concentración de sodio causa la dispersión de las partículas finas de



arcilla, lo que a su vez puede reducir la velocidad de infiltración de agua en el suelo debido al alto radio de hidratación del sodio, que causa la oclusión de macro y microporos trayendo como consecuencia un bajo suministro de agua disponible para las plantas (Bartok, 2009; Zaman et al., 2018).

Dado los resultados encontrados, es necesario ser cuidadoso con el uso de estas aguas con altas concentraciones de sodio por el riesgo de deterioro de la estructura del suelo y en consecuencia habría una reducción en la absorción de agua para las plantas. En casos de excesos de sodio, los síntomas de toxicidad del sodio en las hojas se evidencian como manchas necróticas de color pardo (Ayers y Westcot, 1985; FAO, 1997).

El riego prolongado con aguas con altas concentraciones de sales puede conllevar a la salinización de los suelos, reducción del agua disponible para las plantas y disminución de los rendimientos debido a que la presencia de sales tanto en el suelo como en el agua afecta el potencial osmótico e incrementan el esfuerzo de la planta para extraer el agua del suelo (Zaman et al. 2018). Por otro lado, el uso de aguas con una alta dureza puede traer como consecuencia riesgos de taponamiento de los emisores de los sistemas de riego y de microirrigación (Hernández et al., 2013). Las aguas muy duras son poco recomendables en suelos con alto contenido de arcilla debido a que no ayudan a mejorar la permeabilidad del suelo.

En las fincas del municipio Ocaña, la dureza de las aguas está asociada a la presencia de carbonatos de calcio, por lo que este tipo de dureza es de tipo temporal, la cual es la más común y se relaciona directamente con la alcalinidad. A mayor dureza de carbonatos el agua será más estable en relación con la capacidad de las aguas de neutralizar posibles desequilibrios y cambios bruscos en el potencial de hidrógeno (pH) (Ayers y Westcot, 1985; Hernández et al., 2013).

Conclusiones

Las aguas utilizadas para el riego de las fincas cumplen con los límites máximos permitidos en la normativa nacional. Sin embargo, algunos cationes estuvieron cerca del límite superior, dando como resultado una dureza total del agua que superó el límite: En este sentido, algunos cultivos pueden resultar especialmente sensibles a estos valores.



Referencias bibliográficas

- Aranguren Yerson A, Castellanos Leónides, Escalante Juan C. (2020). Hongos formadores de micorrizas arbusculares (HMA) en frutales de Colombia y su comparación con investigaciones internacionales. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 5(1): 5(1): 27-37. <https://ojs.unipamplona.edu.co/ojsviceinves/index.php/rcyta/article/view/794>
- Ayers, R., y Westcot, D. (1985). *Water Quality for Agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 29 Rev. 1.*, FAO, Rome.
- Bartok, J.W., Jr. (2009). *Protect Your Water System with a Good Filter. Center for Agriculture, Food, and the Environment.* UMass Extension Greenhouse Crops and Floriculture Program.
- Bayon, P. (2006). Educación ambiental, participación y transformación social sostenible en Cuba. *Revista INTERFACE*, 3(3), pp. 35-50.
- Biernbaum, J.A. 1995. *Water Quality, Tips on Growing Bedding Plants.* The Ohio Florists' Association.
- Castellanos González, L., Moreno, X. y Casanovas, E. (2020a). Socialización de los procesos de innovación para del desarrollo sostenible: Aguada de Pasajeros y Rodas. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 5(2), 62–67. <https://ojs.unipamplona.edu.co/ojsviceinves/index.php/rcyta/article/view/844>
- Castellanos González, L., Thomas Manzano, J., y Hernández Tabaco, B. (2020a). Caracterización del agua de riego en 90 fincas propuestas para 18 modelos agroecológicos en Norte de Santander, Colombia. *INGE CUC*, 16(2). <https://doi.org/10.17981/10.17981/ingecuc.16.2.2020.03>
- Castellanos, L., Martínez, G., Castro, M., y Villamizar, C. (2019). Alternativas para el control de la hernia de las crucíferas en coliflor en el municipio Mutiscua, provincia de Pamplona, Norte de Santander: *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 4(2): 75-81. <https://ojs.unipamplona.edu.co/ojsviceinves/index.php/rcyta/article/view/1014>
- Castellón Gómez, J., Bernal Muñoz, R., y Hernández Rodríguez, M. de L. (2015). Calidad del agua para riego en la agricultura protegida en Tlaxcala. *Ingeniería*, 19(1), pp. 39-50. <https://www.redalyc.org/pdf/467/46750924004.pdf>



Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA). (1994). *Calidad del agua para riego. Interpretación y uso*. Programa Regional Agrícola. Centro de Investigación Caribia.

Decreto 1594/84, junio 26, 1984. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Colombia).

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=18617>

Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE]. (2015). *Dirección de metodología y producción estadística – DIMPE. Encuesta Nacional Agropecuaria ENA 2015*. En:

https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/enda/ena/2015/presentacion_ena_2015.pdf

Escalante, J., Palencia, J., y Urdaneta, D. (2019). Aprovechamiento de los recursos agrícolas bajo el enfoque de Desarrollo Endógeno de las Cooperativas Agropecuarias. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 4(2), pp. 119-126.

<http://ojs.unipamplona.edu.co/ojsviceinves/index.php/rcyta/article/view/1073>

FAO. (1997). *Quality control of wastewater for irrigated crop production*. FAO Water Report 10. Rome.

FAO. (2007a). *La agricultura y la escasez de agua: enfoque programático de la eficiencia en el uso del agua y la productividad agrícola*. Comité de Agricultura.

FAO. (2007b). *Situación de los bosques del mundo*. Boletín anual sobre la situación de la reforestación, ONU, Roma.

González-Pedraza, A. F., Orellana, R., y González-Lanza, R. (2019). Efecto del tiempo de inundación sobre la disponibilidad del fósforo (P) en un suelo arrocero de los Llanos Occidentales, Venezuela. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 4(1), 45-54.

<https://ojs.unipamplona.edu.co/ojsviceinves/index.php/rcyta/article/view/985>

Guerrero Guio J., Castellanos González L., y Rodríguez Cely N. (2021). Calidad de agua para riego de 60 fincas agroecológicas de 4 municipios del departamento de Boyacá. *IngeCUC*, 17(1), pp. 96–111. DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.17.1.2021.08>

Hernández, C. A. y Faye, K. (2017). Papel de la gestión del conocimiento en el aprovechamiento de los recursos naturales, la generación de tecnologías que agregan



valor a productos agropecuarios y la restauración del equilibrio ecológico en las cooperativas campesinas. *DELOS*, 3(7).

Hernández, D., Hidalgo, Y., Osbert N. R., Mujica C., y Paneque R. P. (2013). Influencia de la calidad del agua para el riego en las obturaciones de los emisores en Ciego de Ávila. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 22(1), pp. 36-38.

Miranda Lasprilla, D., Carranza C., y Fischer, G. (2008). *Calidad de agua de riego en la Sabana de Bogotá*. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Agronomía, Bogotá.

Orellana, R., Orellana, E., y Méndez, R. (2020). Calidad del agroecosistema de producción de cacao (*Theobroma cacao* L.) en la finca Los Lirios municipio Sucre estado Portuguesa Venezuela. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 5(1), pp. 3-8.

<http://ojs.unipamplona.edu.co/ojsviceinves/index.php/rcyta/article/view/786>

Resolución 1207/14, julio 25, 2014. Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible (Colombia). <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/7.-Anexo-7-Resolucion-1207-de-2014.pdf>

Zaman, M., Shahid, S., y Heng, L. (2018). Irrigation Water Quality. In book: *Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques*, https://doi.org/10.1007/978-3-319-96190-3_5113



Desarrollo de Pastas Cementantes Fosforescentes usando Geopolímeros y Aluminatos de Estroncio para aplicaciones medioambientales

Development of Phosphorescent Cementitious Pastes using Geopolymers and Strontium Aluminates for environmental applications

Jessica Katherine Lamus Sanguino ¹⁴

Danna Lizbeth Contreras Meza ¹⁵

Gabriel Peña Rodríguez ¹⁶

Resumen

Se reportan las propiedades térmicas y morfológicas de la pasta cementante fosforescente. La obtención del geopolímero se llevó a cabo usando polvos comerciales de caolín, tamizados en pasante malla 325, posteriormente se realizó la transformación a metacaolín a 750 °C por 6 horas. El proceso de geopolimeración fue obtenido usando metacaolín en relación 1:1 con una solución alcalina (NaOH a 10M, y silicato de sodio), y se usaron tres concentraciones de polvos fosforescentes con porcentajes en peso del 10, 20 y 30: con un precurado de la pasta por 2h a temperatura ambiente y posteriormente un curado por 24h a 60°C. La morfología de los polvos fosforescentes fue estudiada usando microscopía electrónica de barrido, y la composición elemental mediante el análisis de los espectros de dispersión de energías de rayos X, el análisis de imágenes se realizó con el software Image J. Las propiedades térmicas fueron medidas usando el sistema C-Therm®, para lo cual se prepararon muestras cilíndricas de 0,5 cm de espesor y 5 cm de diámetro. Los resultados muestran que la conductividad térmica disminuye a medida que aumenta la concentración de los polvos de aluminato de estroncio, dando un comportamiento al material de aislante térmico, y la morfología de los polvos de aluminato de estroncio presentan un tamaño promedio de partícula de 21,75 µm, donde el microanálisis revela pequeñas concentraciones de las tierras raras Eu y Dy, las cuales aportan a la muestra, propiedades fosforescentes, que pueden ser usadas en procesos fotocatalíticos en tratamiento de aguas contaminadas con colorantes.

Palabras clave: Conductividad, fosforescentes, geopolímeros, metacaolines.

¹⁴ Ingeniera Industrial. Profesional Joven Investigador, Grupo de Investigación en Instrumentación y Física de la Materia Condensada. Universidad Francisco de Paula Santander. Cúcuta, Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-0589-5945>. jessicakatherinels@ufps.edu.co

¹⁵ Ingeniería Industrial. Estudiante Joven Investigador, Grupo de Investigación en Instrumentación y Física de la Materia Condensada. Universidad Francisco de Paula Santander. Cúcuta, Colombia. <https://orcid.org/0000-0001-5065-2515>. dannalizabethcm@ufps.edu.co

¹⁶ Doctor en Ciencia de Materiales. Facultad de Ciencias básicas, Grupo de Investigación en Instrumentación y Física de la Materia Condensada. Universidad Francisco de Paula Santander. Cúcuta, Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-7114-9174>. gabrielpr@ufps.edu.co



Abstract

The thermal and morphological properties of the phosphorescent cementitious paste are reported. Obtaining the geopolymer was carried out using commercial kaolin powders, sieved through a 325 mesh, then transformation to metakaolin was carried out at 750 °C for 6 hours. The geopolymerization process was obtained using metakaolin in a 1:1 ratio with an alkaline solution (NaOH at 10M, and sodium silicate), and three concentrations of phosphorescent powders with weight percentages of 10, 20 and 30 were used: with a precured of the paste for 2h at room temperature and subsequently curing for 24h at 60°C. The morphology of the phosphorescent powders was studied using scanning electron microscopy, and the elemental composition by analyzing X-ray energy dispersion spectra, image analysis was performed with Image J software. Thermal properties were measured using the C-Therm® system, for which cylindrical samples 0.5 cm thick and 5 cm in diameter were prepared. The results show that the thermal conductivity decreases as the concentration of the strontium aluminate powders increases, giving the material a thermal insulation behavior, and the morphology of the strontium aluminate powders presents an average particle size of 21, 75 µm, where microanalysis reveals small concentrations of the rare earths Eu and Dy, which provide the sample with phosphorescent properties, which can be used in photocatalytic processes in the treatment of water contaminated with dyes.

Keywords: conductivity, phosphorescents, geopolymers, metakaolins.



Introducción

Actualmente un tema trascendental estudiado alrededor del mundo es el desarrollo de materiales que fomenten el ahorro de energía eléctrica, los materiales fotoluminiscentes responden a esta necesidad de forma eficiente (Flor, Carpio y Santamaría, 2018), promoviendo además ahorro económico y la reducción de gases de efecto invernadero (Sanjuán y Argiz, 2019). Por otra parte, se conoce que el uso de materiales fotoluminiscentes debido a la absorción de radiación UV, y a su posterior emisión cuando son inmersos en agua producen efectos de oxidación-reducción, los cuales pueden ser usados para el tratamiento de gases y aguas usando fotocátalisis o foto-electrocátalisis (Byung-Geon, 2018). Los materiales fosforescentes se han utilizado como una forma alternativa del sistema de iluminación. (Kousis, Fabiani, Gobbi y Pisello, 2020), en el campo de la construcción son de gran interés para requerimientos de señalización de seguridad y para requerimientos estéticos en diseños arquitectónicos usados como revestimientos en las fachadas que se exponen al sol. (Flor, Carpio y Santamaría, 2018). También a nivel ambiental, estos materiales se han utilizado para la degradación fotocatalítica de contaminantes orgánicos (Regulska et al., 2020; Benítez-Guerrero, Rolón-Rodríguez y Peña-Rodríguez, 2021).

Los aluminatos de estroncio dopados con tierras raras han sido objeto de estudio durante mucho tiempo, debido su amplia banda de energía (GAP), y a sus excelentes propiedades, como alta eficiencia cuántica y luminiscencia prolongada y persistente (Misevicius y Balevicius, 2020), estos brillan en la región azul-verde del espectro (Bite et al., 2018), también presentan buena estabilidad térmica y química, respecto al medio ambiente y no toxicidad, haciendo que dicho material pueda ser usado en muchas aplicaciones industriales (Ganesh Kumar, Aravinth y Arumugam, 2020), por ejemplo en la industria de las pinturas. La adición de este material en compuestos no sólo produce el fenómeno de fotoluminiscencia, sino que mejora también las propiedades mecánicas (Flor, Carpio y Santamaría, 2018). El uso de aluminatos de estroncio (SrAl_2O_4) dopados con Europio (Eu^{2+}) y Disproscio (Dy^{+3}), incrementan la estabilidad y persistencia de la fosforescencia con respecto a otros materiales como los silicatos, aluminosilicatos y óxidos (Hernández y Lozano, 2015), además maximiza la utilidad de la pasta cementante ya que pueden emitir fosforescencia durante toda la noche y estimularse durante el día (Sanjuán y Argiz, 2019).

Por lo anterior, se presenta la elaboración de pastas cementantes fosforescentes a base de geopolímeros obtenidos a partir de metacaolines, y su caracterización morfológica y



térmica con el objeto de obtener un producto para aplicaciones medioambientales, por ejemplo, ser usado en proceso fotocatalíticos para el tratamiento de agua y gases, así como en la señalización en ambientes exteriores.

Método

El tipo de investigación que se realizó es exploratorio, en la que se estudiaron las propiedades morfológicas y estructurales de los polvos de aluminato de estroncio y las propiedades térmicas de la pasta geo-polimérica fosforescente para tres concentraciones en peso de los polvos fosforescentes. En este trabajo se define la población como los materiales geopoliméricos y la muestra, los geopolímeros fosforescentes.

Así mismo, la fuente inicial de la información de los materiales de partida fue obtenida de los proveedores como lo fue para el caso del caolín usado, el cual fue suministrado por industrias de caolín Santander S.A.S., mientras que para los polvos fosforescentes, dado que el proveedor no suministró dichos datos, se procedió a realizar su análisis químico y de morfología usando microscopía electrónica de barrido (SEM) y fluorescencia de rayos X (FRX).

En la revisión de literatura se usaron las fuentes primarias y secundarias que se obtuvieron con un criterio de búsqueda dado por las palabras clave, en bases de datos y repositorios institucionales que se encuentran disponibles en internet.

Para el análisis de datos obtenidos durante la caracterización se usaron softwares como image J, y los propios de los equipos usados.

Para la ejecución del proyecto se plantearon cuatro fases que se describen a continuación:

Fase 1 Obtención de la pasta cementante y de los polvos de aluminato de estroncio dopados de Eu^{-2} y Dy^{+3}

El polvo de caolín utilizado es de uso comercial, el cual se tamizó en seco en malla tamiz No. 325 (44 μm). Como el geopolímero es a base de metacaolín, se procede a la transformación estructural mediante tratamiento térmico el cual se realizó a 750 °C, con una rampla de 10 °C/min por 6 horas (Burciaga-Díaz, Escalante-García y Magallanes-Rivera, 2015) usando mufla eléctrica marca Ney Vulcan D-130.



El proceso de geopolimerización, se realizó con una solución de hidróxido de sodio (NaOH) a 10M, donde la solución reacciona exotérmicamente, y una vez esté a temperatura ambiente se adiciona silicato de sodio (Na_2SiO_3) en relación 1:1. Cuando la mezcla de las soluciones está a temperatura ambiente, se agrega el metacaolín en una proporción igual a la de soluciones, realizado mezclado mediante oscilador de cabezal a 900 rpm con el fin de homogeneizar la muestra, hasta tener buena fluidez en la pasta. Al terminar de homogeneizar la pasta, se procede a verter en los moldes y realizar el proceso de curado. Para el curado se empleó el método denominado “Cured in covered molds” (Curado de moldes cubiertos) como sugiere (Baladrán, 2011), el cual tiene como objetivo mantener las condiciones adecuadas de humedad mientras el material fragua y endurece, para prevenir fraguados rápidos, debidos a la pérdida de agua y/o procesos de carbonatación. Este método consiste en introducir los moldes conteniendo la pasta fresca, en contenedores de polietileno herméticos, con el objeto de impedir la evaporación del agua durante el tiempo de pre-curado, que fue dos horas a temperatura ambiente, luego se realiza el curado del geo-polímero en la estufa de secado universal Memmert a 60 °C por 24 horas; posteriormente se desmolda y se mantiene en una campana desecadora, para la caracterización. En la figura 1, se presentan imágenes del proceso de elaboración de la muestra de las pastas cementantes geo-poliméricas iniciales (sin la adición del aluminato de estroncio), a los cuales se les realizó una caracterización química usando FRX, para lo cual se utilizó el equipo Minipal de PANalytical®.

Los polvos de aluminato de estroncio dopado de Eu y Dy son comerciales suministrados por Novacolor S.A.S, los cuales se sometieron a un proceso de secado a 100 °C por una hora y posteriormente alojados en la campana desecadora. A éstos se les realizó la caracterización morfológica usando MEB y química mediante microanálisis EDS.



Figura 1

Proceso de geopolimerización



Fase 2. Caracterización térmica y morfológica de las pastas cementantes, y química de los polvos de aluminato de estroncio

Para realizar la caracterización térmica de las muestras, las probetas que se sintetizaron fueron adecuadas para que el equipo C-Therm TCi®, el cual funciona con el principio físico de flujo transitorio de calor. Las dimensiones de las muestras cilíndricas fueron de 0,5 cm de espesor y 5 cm de diámetro, las cuales fueron preparadas usando papel abrasivo (lijas) con diferentes tamaños de grano (200, 400, 600, 1000, 1500 y 2000), lo anterior con el fin de homogenizar la superficie y evitar errores experimentales durante las medidas de las propiedades térmicas, consiguiéndose una buena adherencia entre la muestra y el sensor del equipo (Lamus, 2020).

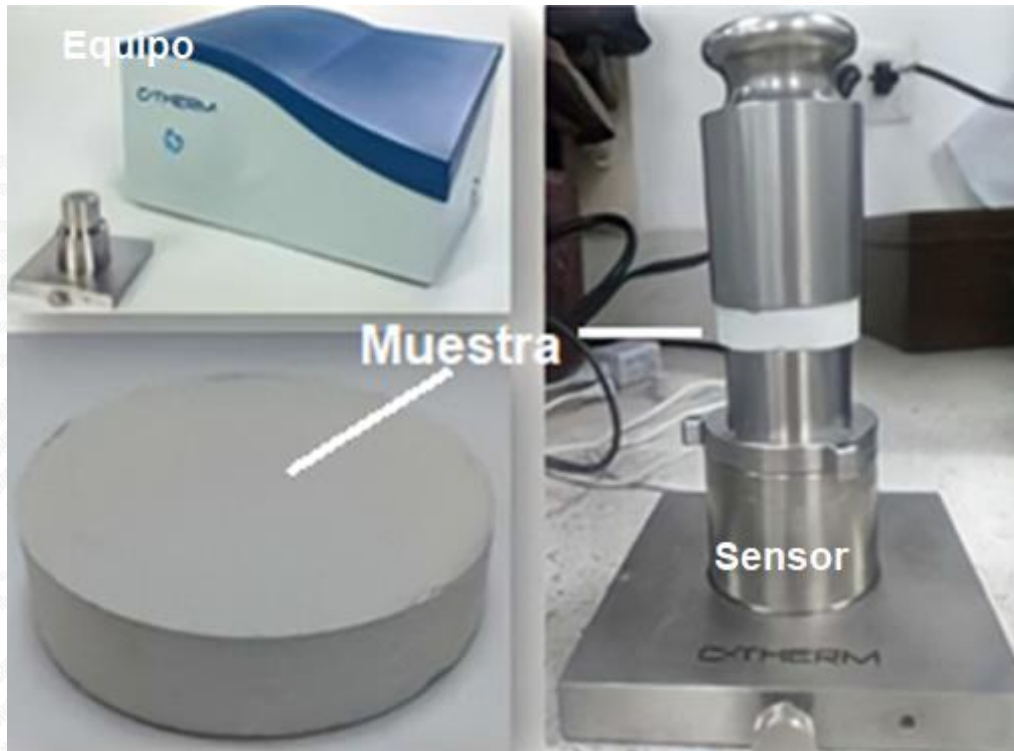
En la figura 2, se presentan imágenes del proceso de caracterización térmica a temperatura ambiente donde se observa el equipo, el sensor, la muestra y la muestra colocada encima del sensor la cual es presionada por una pesa de 500 g. Es importante tener en cuenta que durante las medidas experimentales los datos se almacenan directamente en el computador conectado al equipo, el cual está provisto del software que permite ajustar los



datos experimentales usando el modelo teórico, que permite calcular la conductividad térmica de la muestra. El proceso anterior se realizó por triplicado para disminuir las incertidumbres en las medidas experimentales.

Figura 2

Equipo y montaje caracterización térmica de las muestras



La caracterización morfológica y microanálisis químico de los polvos de aluminato de estroncio dopados con Eu y Dy se realizó utilizando el microscopio electrónico marca FEI modelo Quanta 650 FEG, y los espectros de dispersión de energías de rayos X (EDS).



Fase 3. Obtención de las pastas geo-poliméricas fosforescentes agregando en porcentaje en peso polvos de aluminato de estroncio de 10 %, 20 % y 30 %

Figura 3

Conformado de la pasta fosforescente



Para la obtención de las pastas fosforescentes se agregó el aluminato de estroncio en porcentaje en peso (10 %, 20 % y 30 %) a la mezcla durante la homogenización, luego se siguió lo establecido en la fase 1. En la figura 3, se presenta una imagen que describe tanto el polvo de metacaolín, como el polvo de aluminato de estroncio dopado con Eu y Dy, así como una probeta de la pasta cementante conformada.

Fase 4. Caracterización térmica de la pasta fosforescente

Para la caracterización térmica de la pasta geo-polimérica fosforescente, se siguió el procedimiento de preparación y medición de las muestras, descrito en la fase 2.

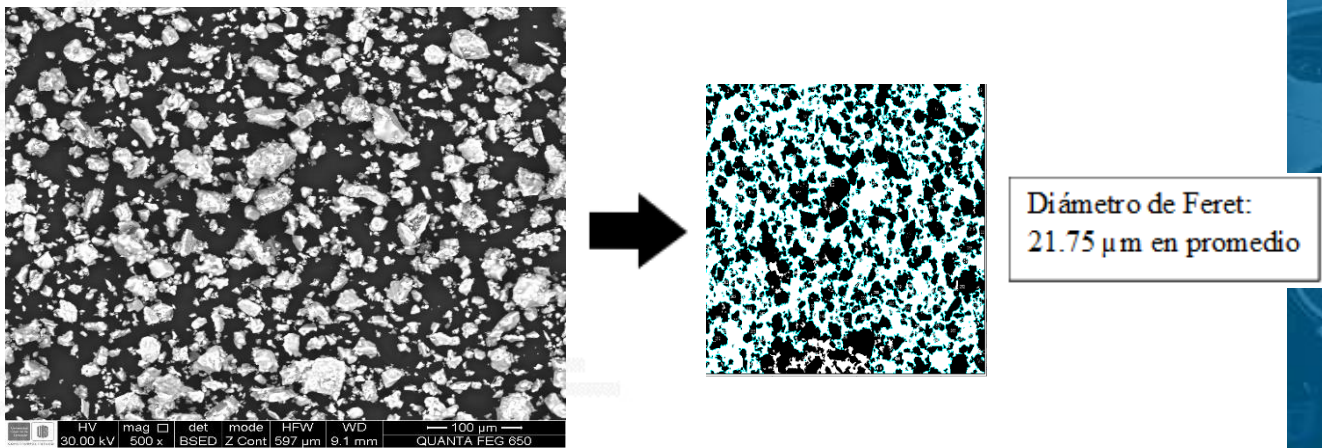
Resultados

En la figura 4, se presenta una imagen de MEB con una magnificación de 500X, tomada con el detector de electrones retrodispersados, a la muestra de polvos fosforescentes de aluminato de estroncio, así como una imagen usando el software Image J para determinar el tamaño promedio de las partículas, encontrándose un diámetro promedio de Feret de 21,75 μm .



Figura 4

Micrografía del aluminato de estroncio



En la tabla 1, se reporta el microanálisis químico realizado a los polvos de aluminato de estroncio, los cuales fueron obtenidos por corrección ZAF del espectro de dispersión de energías de rayos X que fue medido a la muestra, el cual se presenta en la figura 5.

Tabla 1

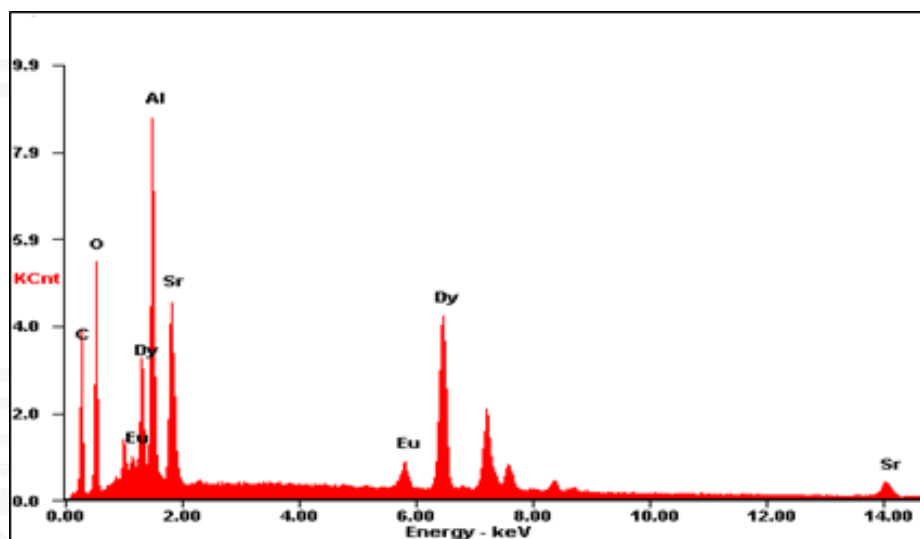
Composición química del aluminato de estroncio

Elemento	Wt%	At%
C	26,38	50,83
O	20,62	29,83
Al	14,76	12,66
Eu	03,25	00,50
Dy	25,23	03,59
Sr	09,77	02,58



Figura 5

Espectro de dispersión de energías de rayos X, con los cuales se obtuvo el microanálisis reportado en la tabla 1



La composición química de las muestras de meta-caolín se presenta en la tabla 2, los cuales se obtuvieron usando FRX, a muestras en polvo de meta-caolín sinterizado

Tabla 2

Composición química por compuesto del meta-caolín usando FRX.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₂	CaO	MgO	SO ₃	NaO ₂	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	Bao
67,37	26,99	1,52	0,2	0,11	0,41	0,13	1,06	1,02	0,2	0,08

Los resultados de la conductividad térmica a temperatura ambiente tanto para la muestra de la pasta cementante pura (100% de meta-caolín), como para las conformadas con los polvos de aluminato de estroncio dopados con Eu y Dy para las diferentes concentraciones (10 %, 20 % y 30 %) se presenta en la tabla 3, en ésta se reportan los valores obtenidos para las tres replicas como su valor promedio e incertidumbre de medida. Por otra parte, el análisis de la conductividad térmica de las muestras se presenta en el diagrama de barras de la figura 6.



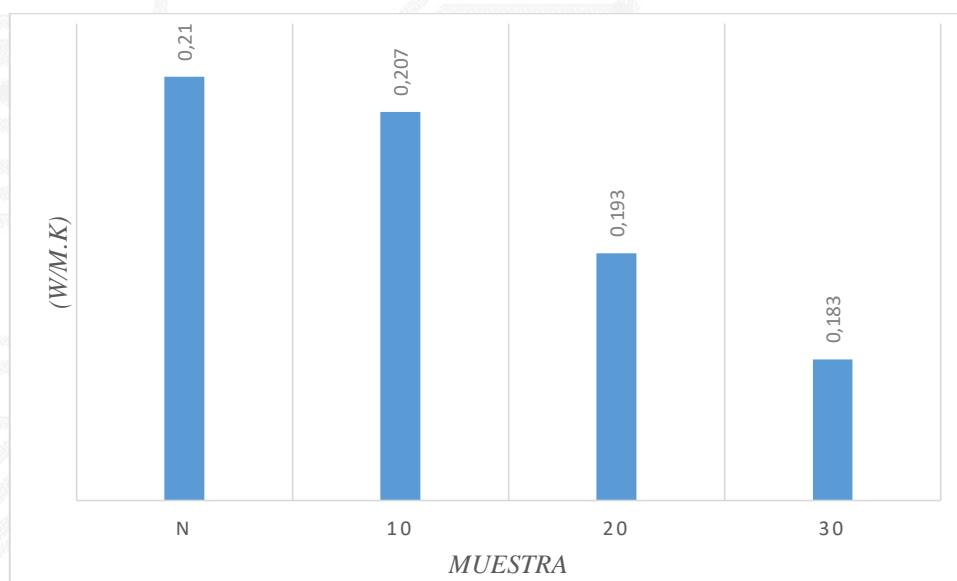
Tabla 3

Resultados conductividad térmica del geopolímero puro y fosforescente (W/m.K)

Ensayo	1	2	3	Promedio
Muestra				
Puro	0,21	0,21	0,21	0,21±0,012
10	0,2	0,2	0,22	0,207±0,011
20	0,18	0,21	0,19	0,193±0,015
30	0,18	0,18	0,19	0,183±0,005

Figura 6

Análisis del comportamiento conductividad térmica



Discusión

Se encontró que la morfología y los valores promedios del tamaño de partícula de los polvos de aluminato de estroncio dopados con Eu y Dy (ver figura 4), son de orden micrométrico y menores a los de los polvos de caolín, lo anterior es importante en las mezclas de estos polvos, durante el conformado, ya que permiten la integración y aglomeración entre los compuestos por procesos cohesivos propios de la superficie específica de contacto de los polvos (Das, Shyamal et al., 2013), durante el proceso de homogenización



de la muestra, permitiendo la integración de los polvos fosforescentes a la pasta cementante de meta-caolín, aportando propiedades fosforescentes, las cuales aparecen cuando son excitados con radiación UV (320 nm), generando en la muestra una emisión en el color verde (520 nm) que es atribuida a la transición electrónica del ion Eu^{2+} de los estados $4f^65d^1$ a $4f^7$ (Poulose, et al., 2021).

El microanálisis en porcentaje en peso de los polvos de aluminato (ver tabla 1, y figura 5), reporta una composición química principal de Al, Sr, Dy, Eu, la cual corresponde a los aluminatos de estroncio con Eu y Dy, así mismo la concentración de carbono presente en la muestra, es propia del recubrimiento realizado durante la metalización (la cual fue realizada con grafito) de la muestra para disminuir los efectos de carga durante el barrido de los electrones. Lo anterior, ratifica una vez más las propiedades fosforescentes de las muestras debido a la concentración de las tierras raras (Eu y Dy).

Se observa que la relación sílice/alúmina para la muestra de meta-caolín es $\approx 2,5$ (ver tabla 2), lo anterior permite inferir que la geo-polimerización es óptima, pues dicho factor debe ser mayor a 2 para obtener un buen curado de la pasta cementante (Villaquirán, Rodríguez y Mejía, 2015).

Respecto a la conductividad térmica, se aprecia a medida que se incrementa la concentración de polvo de aluminato a la muestra, este parámetro termo-físico disminuye (ver figura 6), y que dichos valores permiten inferir que la muestra es térmicamente aislante, lo cual es propio de los materiales cerámicos, parámetros que son influenciados por los óxidos de aluminio y silicio presentes en la muestra, donde la conducción de calor es vía fonónica y al incrementar la concentración de polvo fosforescente en la muestra existe la presencia de más sitios o interfaces intergranulares que actúan como centros de dispersión, ocasionando una mayor trayectoria libre media que debe recorrer el flujo de calor en la muestra, disminuyendo así la conductividad térmica en la muestra (Kang, Choi, J., y Choi, S., 2019). Por otra parte, al comparar los valores encontrados para la conductividad térmica de las pastas cementantes fosforescentes, con lo reportado en la literatura para pastas cementantes a base de cemento Portland, se evidencia que dichos valores son menores, lo cual sin lugar a duda aportará confort térmico cuando sea usado en aplicaciones constructivas.



Conclusiones

Se elaboró y caracterizó física, química y térmicamente una pasta cementante a base de meta-caolín y polvos de aluminato de estroncio dopados con Eu y Dy, para tres concentraciones en porcentaje en peso de éstos. La geo-polimerización fue óptima debido a que la relación sílice/alúmina fue mayor que dos.

El uso de software libre Imaje J, permitió obtener el tamaño de grano promedio de los polvos de aluminato, para lo cual se utilizó la imagen obtenida por MEB de la muestra, encontrándose que dicho tamaño promedio era menor que el de los polvos de meta-caolín, permitiendo una mejor integración durante el proceso de conformado de la pasta cementante.

Respecto a la conductividad térmica efectiva a temperatura ambiente de las muestras de geo-polímeros fosforescentes, se evidenció una disminución de este parámetro al incrementar la concentración de los polvos de aluminato, encontrándose que dichas muestras son bajas conductoras de calor lo que permite su aplicación como aislantes térmicas, en comparación con muestras cementantes a base de cemento Portland.

En general, dadas las propiedades fosforescentes de los polvos de aluminato de estroncio dopado con Eu y Dy, se puede inferir que dichas pastas cementantes desarrolladas pueden ser utilizadas en aplicaciones medio-ambientales dadas las propiedades fotocatalíticas de los polvos fosforescentes, así como en aplicaciones en la industria de la construcción y en la señalización de exteriores, las cuales pueden absorber la radiación UV del sol durante el día, y emitir durante la noche, sin el uso de baterías o electricidad.

En la actualidad, se están realizando las medidas de las propiedades ópticas a las muestras con el fin de estudiar los tiempos de emisión para un tiempo de radiación constante, en función de la concentración del polvo fosforescente agregado.

Agradecimientos

A Minciencias por la Convocatoria fortalecimiento de vocaciones y formación en CTEI para la reactivación económica N° 891-2020, por medio de la cual se financia a los jóvenes investigadores.

Al fondo FINU de la Universidad Francisco de Paula Santander según contrato 003-2021 por la financiación del proyecto.



Referencias

- Baladrán-Torres, M. (2011). *Síntesis de geopolímeros mediante diferentes precursores* [Tesis de Maestría]. Universidad Autónoma Nuevo León.
<http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1080049524.PDF>
- Benítez-Guerrero, N., Rolón-Rodríguez, Y. y Peña-Rodríguez, G. (2021). Use of strontium aluminate powders in the photocatalytic removal of dyes present in water. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2046/1/012042>
- Bite, I., Krieke, G., Zolotarjovs, A., Laganovska, K., Liepina, V., Smits, K., y Skuja, L. (2018). Novel method of phosphorescent strontium aluminate coating preparation on aluminum. *Materials y Design*, 160, pp. 794–802.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.10.021>
- Burciaga-Díaz, O., Escalante-García, J., y Magallanes-Rivera, R. (2015). Resistencia a la compresión y evolución microestructural de geopolímeros base metacaolín expuestos a alta temperatura. *Revista ALCONPAT*, 5(1), pp. 58-73.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-68352015000100006&lng=es&tylng=es.
- Das, S., Behara, S., Morton, D., Larson, I. y Stewart, P. (2013). Importance of particle size and shape on the tensile strength distribution and de-agglomeration of cohesive powders. *Powder Technology*, 249, pp. 297-303. 10.1016/j.powtec.2013.08.034.
- Flor, M., Carpio, A., y Santamaría, J. (2018). Estudio de un compuesto cementante fotoluminiscente y su aplicación en la construcción. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 1(1), pp. 62–70. <https://doi.org/10.29166/revfig.v1i1.811>
- Ganesh Kumar, P., Aravindh, K., y Arumugam, R. (2020). Dysprosium activated strontium aluminate phosphor: A potential candidate for WLED applications. *Diario de luminiscencia* (117126). doi:doi.org/10.1016/j.jlumin.2020.117126
- Hernández, R., y Lozano, J. (2015). Diseño y síntesis de materiales nanoestructurados basados en aluminatos de estroncio con propiedades fotoluminiscentes. Universidad Politécnica de Madrid.



- Kang, S., Choi, J., y Choi, S. (2019). Mechanism of Heat Transfer through Porous Media of Inorganic Intumescent Coating in Cone Calorimeter Testing. *Polymers*, 11(2). MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/polym11020221>
- Kousis, I., Fabiani, C., Gobbi, L., y Pisello, A. (2020). Phosphorescent-based pavements for counteracting urban overheating – A proof of concept. *Solar Energy*, 202, pp. 540-552. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.03.092>
- Lamus, J. (2020). *Crecimiento y caracterización de recubrimientos de dióxido de titanio sobre sustratos geopoliméricos a base de metacaolines usando la técnica rf magnetron sputtering para aplicaciones industriales* [Trabajo de grado]. Universidad Francisco de Paula Santander.
- Misevicius, M., y Balevicius, V. (2020). Solid-state synthesis of SrAl₄O₇ and luminescence of Eu³⁺-doped samples. *Materials Chemistry and Physics*, 249(122998).
oi:10.1016/j.matchemphys.2020.122998
- Norma Chilena. (2007). *Cálculo de Resistencias y Transmitancias Térmicas*. Santiago de Chile.
http://www.inmetro.gov.br/barreirastecnicas/pontofocal/textos/regulamentos/CHL_65.pdf
- Oviedo-Sánchez, K., y Mejía-de-Gutiérrez, R. (2019). Mortero geopolimérico para uso potencial como recubrimiento en concreto. *Revista EIA*, 16(31), pp. 159-170.
<https://doi.org/10.24050/reia.v16i31.1243>
- Park, B. (2018). "Photocatalytic Behavior of Strontium Aluminates Co-Doped with Europium and Dysprosium Synthesized by Hydrothermal Reaction in Degradation of Methylene Blue". *Catalysts*, 8(6). <https://doi.org/10.3390/catal8060227>
- Poulose, A., Anis, A., Shaikh, H., Alhamidi, A., Siva Kumar, N., Elnour, A., y Al-Zahrani, S. (2021). Strontium Aluminate-Based Long Afterglow PP Composites: Phosphorescence, Thermal, and Mechanical Characteristics. *Polymers*, 13(9). MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/polym13091373>
- Regulska, E., Breczko, J., Basa, A., y Dubis, A. (2020). Rare-Earth Metals-Doped Nickel Aluminate Spinel for Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants. *Catalysts*. 10. 1003. 10.3390/catal10091003



Rojas Hernández, R. (2015). Diseño y síntesis de materiales nanoestructurados basados en aluminatos de estroncio con propiedades fotoluminiscentes [Tesis Doctoral]. E.T.S.I. Telecomunicación (UPM). <http://oa.upm.es/view/institution/Telecomunicacion/>

Sanjuán, M., y Argiz C. (2019). Cementos Fotoluminiscentes. *Afinidad*, 76(588), pp. 262-269 <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/361875>

Villaquirán, M., Rodríguez, E., y Mejía, R. (2015). Evaluación microestructural de geopolímeros basados en metacaolín y fuentes alternativas de sílice expuestos a temperaturas altas. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*. 358. 10.1016/S1405-7743(15)72112-8.



CAPÍTULO VI

Determinación de condiciones de crecimiento y producción de astaxantina aplicando modelo primario en *Haematococcus pluvialis*

Determination of growth conditions and astaxanthin production applying primary model in Haematococcus pluvialis

Vivian Daniela Pineda Amaya ¹⁷
Madelene Daniela Quevedo Guerrero ¹⁸
Ana Graciela Lancheros Díaz ¹⁹

Resumen

Introducción. La microalga *Haematococcus pluvialis* es un microorganismo unicelular que bajo determinadas condiciones de crecimiento y estrés produce astaxantina. Para la obtención del carotenoide, se utilizaron biorreactores sistemas de cultivo que sirven para la producción de biomasa y compuestos de interés. El objetivo del presente estudio fue aplicar el modelo matemático Gompertz, realizando un ajuste estadístico al crecimiento celular, para determinar las condiciones óptimas de crecimiento y producción de astaxantina. **Métodos.** Hacia la implementación del modelo Gompertz, se seleccionaron 9 trabajos realizados por el grupo Bioprocesos y Control de la Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, que presentaban los mejores resultados, años 2015 al 2020, usando como medios de cultivo RM, BBM, OHM y KOBAYASHI, condiciones como pH, temperatura, irradiancia, fotoperiodo luz/oscuridad, deficiencia de nutrientes, agitación, producción celular, concentración de astaxantina y velocidad de crecimiento. **Resultados.** Para lograr una mayor producción celular y mejor producción de astaxantina se deben implementar condiciones de estrés como pH 6,8, temperatura 20 °C, fotoperiodo 20:4 h luz/oscuridad, luz blanca, irradiancia de 70 -140 $\mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$ deficiencia de nitratos de 5 % y fosfatos de 10 %, agitación 100 rpm, adición de $\text{NaC}_2\text{H}_3\text{O}_2$ (1,6g/L) y NaCl (1,28 g/L) y aire filtrado, en medio de cultivo RM. **Conclusión.** Se determinaron las condiciones donde se obtiene mayor biomasa ($8,62 \times 10^9$ cel/mL) con alta velocidad de crecimiento (0,39 cel/día), un td (1,77 días) y mayor cantidad de astaxantina (7,3 $\mu\text{g/ml}$). El modelo se validó utilizando R^2 ; obteniendo resultados entre 0,9 y 0,99 cercanos a 1, indicando que este se ajustó a los datos experimentales.

Palabras clave: Función Gompertz, crecimiento, estrés, astaxantina.

¹⁷ Bacterióloga y laboratorista clínica. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca. Bogotá, Colombia.
<https://orcid.org/0000-0001-6491-482X>. vpineda@unicolmayor.edu.co

¹⁸ Bacterióloga y laboratorista clínica. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca. Bogotá, Colombia.
<https://orcid.org/0000-0002-5714-836X>. mquevedo@unicolmayor.edu.co

¹⁹ Bacterióloga y laboratorista clínica. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca. Bogotá, Colombia.
<https://orcid.org/0000-0002-5799-0282>. aglancheros@unicolmayor.edu.co



Abstract

The microalga *Haematococcus pluvialis* is a unicellular microorganism that, under certain growth and stress conditions, produces astaxanthin. To obtain the carotenoid, bioreactors were used, culture systems used for the production of biomass and compounds of interest. The objective of the present study was to apply the Gompertz mathematical model, performing a statistical adjustment to cell growth, to determine the optimal conditions for growth and astaxanthin production. Methods.

Towards the implementation of the Gompertz model, 9 works carried out by the Bioprocesses and Control group of the Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca were selected, which presented the best results, from 2015 to 2020, using RM, BBM, OHM and KOBAYASHI as culture media. conditions such as pH, temperature, irradiance, light/dark photoperiod, nutrient deficiency, agitation, cell production, astaxanthin concentration, and growth rate. To achieve greater cell production and better astaxanthin production, stress conditions such as pH 6.8, temperature 20 °C, photoperiod 20:4 h light/dark, white light, irradiance of 70 -140 $\mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$ must be implemented. 1 deficiency of nitrates of 5% and phosphates of 10%, stirring at 100 rpm, addition of $\text{NaC}_2\text{H}_3\text{O}_2$ (1.6g/L) and NaCl (1.28g/L) and filtered air, in RM culture medium. The conditions where the highest biomass (8.62×10^9 cells/mL) with high growth rate (0.39 cells/day), a td (1.77 days) and the highest amount of astaxanthin (7.3 $\mu\text{g/day}$) were determined. ml). The model was validated using R2; obtaining results between 0.9 and 0.99 close to 1, indicating that it was adjusted to the experimental data.

Keywords: Gompertz function, growth, stress, astaxanthin.



Introducción

El uso de las microalgas se ha implementado durante muchos años, por lo que estas han adquirido gran importancia a causa de su aplicabilidad en la industria. Estos microorganismos están siendo involucrados en los diferentes sectores productivos como un instrumento de reproducibilidad, favoreciendo diversos procesos gracias a su funcionalidad, su gran diversidad y su amplia distribución. Dichas industrias han hallado diversas ventajas en el empleo de astaxantina natural en comparación a la sintética, aumentando su demanda y fomentando el uso de microorganismos capaces de sintetizar astaxantina (Ramírez, 2013; Shah, et al., 2016; Tjørve y Tjørve, 2017).

Para la obtención de este carotenoide, se deben tener en cuenta los medios de cultivo, las condiciones nutricionales y los parámetros de estrés que permitan el desarrollo de los microorganismos, ya que estos se encuentran sujetos al medio que les rodea. En este caso los biorreactores son sistemas de cultivo que sirven como un medio para optimizar la producción de biomasa y de compuestos de interés, mantienen un control continuo para el crecimiento óptimo y rápido, además permiten una mayor esterilidad del medio de cultivo, mantener el control sobre el pH, la temperatura, la intensidad de luz del medio, entre otras variables.

En la actualidad, el crecimiento microbiano requiere de una descripción detallada sobre el comportamiento de los microorganismos durante el proceso de reproducción y desarrollo de los mismos. Para dar solución a este aspecto, nace la Microbiología Predictiva, una rama de la microbiología que estudia los factores, las condiciones y el comportamiento de los microorganismos, teniendo como objetivo la cuantificación de dichas relaciones y la elaboración de ecuaciones matemáticas que permiten conocer comportamientos a largo plazo (Chicata, 2015). La microbiología predictiva funciona en base a la respuesta de los microorganismos frente a cambios en los factores ambientales, que pueden ser controlados en laboratorio, a través de modelos matemáticos y estadísticos, por medio de los cuales puede ser posible predecir el comportamiento de dichos microorganismos cuando cambian las condiciones que les rodea (Sancho, 2015).

El crecimiento, la supervivencia e inactivación de un microorganismo puede verse representado a través de una curva de crecimiento, siendo esta la representación del logaritmo del número de microorganismos con relación al tiempo. Los modelos matemáticos Logístico y Gompertz, corresponden a modelos sigmoidales. Dichos modelos permiten describir la evolución de un proceso, en donde se muestra una progresión temporal desde un nivel bajo



inicial hasta alcanzar un punto máximo en el transcurso de cierto tiempo. Esta transición ocurre en una región de aceleración intermedia, que se ve representada gráficamente en forma de “S” (Garre, et al., 2016).

La función sigmoide sirve como la base de la función de Gompertz, en la que el crecimiento inicial es rápido seguido de una nivelación; basados en esto Gompertz es el modelo de elección debido a su aplicabilidad y eficacia (Solano, 2017). El objetivo de un modelo primario es describir por medio de la estadística y la matemática los resultados obtenidos a través de una curva de crecimiento, generada por microorganismos de interés (Garre, 2016).

Para llevar a cabo la implementación del modelo primario Gompertz, se seleccionaron 9 trabajos realizados por el grupo bioprocesos y control del año 2015 al 2020, de la Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca, que presentaron mejores resultados, en los cuales se evidenció el uso de medios de cultivo como RM, BBM, OHM y KOBAYASHI, teniendo en cuenta condiciones de estrés como el pH, temperatura, irradiancia, fotoperiodo luz/oscuridad, deficiencia de nutrientes, agitación, entre otros. Se analizó la producción celular, la concentración de astaxantina y la velocidad de crecimiento celular, que sustentaban la capacidad de la microalga para la producción del carotenoide.

Método

Tipo de estudio

El presente estudio es de tipo cuantitativo, ya que, se obtuvo información de los trabajos realizados por el grupo Bioprocesos y control de la Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca en el periodo del 2015 al 2020, datos de crecimiento celular y producción de astaxantina en diferentes periodos de tiempo.

Alcance de la investigación

El estudio tiene un nivel de profundización descriptivo, puesto que, se describe el crecimiento celular de *H. pluvialis*, bajo diferentes condiciones de cultivo. El objeto de la investigación es aplicada, ya que, el modelo de Gompertz permite realizar un ajuste estadístico a la producción y crecimiento celular obtenida en los diferentes estudios con diversas condiciones de cultivo, su periodo de tiempo es longitudinal, porque, se evalúa un



periodo de tiempo de 2015 a 2020, el estudio es no experimental, dado que, no se tiene control de las variables, es decir, no se puede alterar las condiciones de cultivos de los trabajos de investigación, el análisis es inductivo, pues, se observa y analiza los datos proporcionados dando respuesta a determinar las mejores condiciones para el cultivo de *H. pluvialis*.

Hipótesis de investigación

La aplicación del modelo primario Gompertz permite un ajuste estadístico y determina las condiciones de estrés óptimas para obtener mayor crecimiento celular con una alta velocidad de crecimiento, tiempo de duplicación y mayor concentración de astaxantina.

Hipótesis nula

La aplicación del modelo primario Gompertz no permite un ajuste estadístico y no determina las condiciones de estrés óptimas para obtener mayor crecimiento celular con una alta velocidad de crecimiento, tiempo de duplicación y concentración de astaxantina.

Hipótesis alterna

La aplicación de otros modelos primarios como Baranyi and Roberts y Logístico, permiten un ajuste estadístico y determinan las condiciones de estrés óptimas para obtener mayor crecimiento celular con una alta velocidad de crecimiento, tiempo de duplicación y mayor concentración de astaxantina.

Variables

Variable independiente: Tiempo (días)

Variable dependiente: Crecimiento celular, concentración de astaxantina, velocidad de crecimiento y tiempo de duplicación.

Población

La población objeto de estudio son los trabajos realizados por el grupo bioprocesos y control de la Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca en el periodo del 2015 al 2020, para obtener astaxantina a partir de *Haematococcus pluvialis* en diferentes biorreactores, bajo condiciones de estrés.



Muestra

Como muestra se utilizaron 9 trabajos revisados en donde se pudieron obtener los datos del crecimiento celular.

Procedimiento

Se obtuvo la información de los trabajos realizados por el grupo Bioprocesos y control de la Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca en el periodo del 2015 al 2020. Se tomó como referencia 12 trabajos de investigación realizados por los estudiantes pertenecientes al semillero de Bioprocesos y control, sobre factores de estrés y producción de astaxantina en *H. pluviialis*.

A continuación, se presenta una tabla con los 12 trabajos seleccionados, los modelos matemáticos aplicados y los mejores resultados obtenidos (*ver tabla 1*), estos modelos fueron usados para ajustar las curvas de crecimiento de *Haematococcus pluviialis*, para describir la cinética de crecimiento y aplicar el modelo matemático Gompertz, objeto de esta investigación.



Tabla 1

Modelos aplicados para ajustar las curvas de crecimiento obtenidas de la microalga Haematococcus pluvialis, parámetros y mejores resultados.

MODELO Y PROGRAMA ESTADÍSTICO APLICADO	PARÁMETROS	RESULTADOS	AUTOR (ES)
Modelo de Baranyi and Roberts (1994) Programa software DMfit	<ul style="list-style-type: none"> - Medios de cultivo BBM, OHM, RM. - pH 6,7 a 7,0. - Temperatura de 25 °C. - Fotoperiodo 16/8 h de luz/oscuridad. - CO₂ al 5 %. - Irradiancia de 70 µE/m²s. - Agitación durante 10 segundos. 	<p>Mejores resultados en el medio RM:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Crecimiento celular de 7,5x10⁵cel/mL en el día 36 - Producción de astaxantina de 8.3 µg/ml en - Velocidad de crecimiento de 0,092 cel/día. 	Niño y Rodríguez, 2015
Modelo Baranyi and Roberts (1994) Programa software DMfit	<ul style="list-style-type: none"> - Medio de cultivo RM. - pH 6,7. - Temperatura 25 °C. - Ciclo luz/oscuridad 20 h/4h. - CO₂ 5%. - Deficiencia de nitrógeno 4 % - Irradiancia alta de 140 µE. - Agitación continua. - Iluminación con lámparas fluorescentes blancas 	<ul style="list-style-type: none"> - Crecimiento celular de 2.10x10⁶ cel/mL - Producción de astaxantina de 3,52x10⁻⁶ µg/celx mL - Velocidad de crecimiento de 0,0029 cel/día. 	Díaz L. et al.,2016
N/A	<ul style="list-style-type: none"> - Medio de cultivo BBM. - pH de 7,0. - Temperatura de 21 °C. - Fotoperiodo 20/4 h de luz/oscuridad con lámparas fluorescentes blancas. - CO₂ 5%. - Deficiencia de nitrógeno 4 %. - Humedad relativa de 45 %. - Agitación manual una vez al día durante 10 min. 	<ul style="list-style-type: none"> - Crecimiento celular de 1.12x10⁶ cel/mL en el día 21 - Producción de astaxantina fue de 0,102 - 3,058 ug/ml. 	Ríos y Vargas, 2016



MODELO Y PROGRAMA ESTADÍSTICO APLICADO	PARÁMETROS	RESULTADOS	AUTOR (ES)
N/A	<ul style="list-style-type: none"> - Medio de cultivo RM. - pH 7,0 - Temperatura de 25 ± 2 °C - Fotoperiodo 24/4 h de luz/oscuridad. - Luz blanca. - Agitación 100 rpm. - Aire filtrado. - Concentración de acetato de sodio 0,299 	<ul style="list-style-type: none"> - Con 0,299 mg/L de acetato de sodio: Crecimiento celular de $2,0 \times 10^4$ cel/mL y concentración de astaxantina de 2,530 µg/mL en día 34. 	García L, 2018
Modelo Baranyi and Roberts (1994) Programa software DMfit	<ul style="list-style-type: none"> - Medio de cultivo RM y BBM. - pH 6,8 – 7,1. - Temperatura de 20 ± 1 °C. - Fotoperiodo 18/6 h de luz/oscuridad. - Agitación 180 rpm. - Aire filtrado. 	<p>Mejores resultados en el medio RM:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Crecimiento celular de $1,25 \times 10^5$ cel/mL. en el día 21 - Velocidad de crecimiento de 0,040 cel/día. 	Leiton, 2018
N/A	<ul style="list-style-type: none"> - Medios de cultivo RM y BBM. - Deficiencia de nitrógeno 4 %. - Luz roja y azul. 	<p>Mejores resultados en el medio BBM con luz roja:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Concentración de astaxantina de $7,24 \times 10^{-5}$ µg/cel. 	Ávila K et al., 2019
Modelo logístico	<ul style="list-style-type: none"> - Medios de cultivo RM y BBM suplementados con concentraciones de acetato de sodio de 0,248 mg/mL, 0,310 mg/mL, 0,372 mg/mL. - Luz blanca y azul. - pH 6,8. - Temperatura 20 °C \pm 2 °C. - Fotoperiodo 20:4 Luz / Oscuridad. - CO₂ al 5 %. - Irradiancia de 150 µE m⁻² s⁻¹, - Agitación con burbujeo. 	<p>Mejores resultados en el medio RM:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Concentración de astaxantina de 5.06µg/ml con 0,372 mg/mL de acetato de sodio, luz azul e irradiancia 150 µE m⁻² s⁻¹ - Concentración de clorofila de 29.45µg/mL con luz azul, alta irradiancia y 0.310mg/mL de acetato de sodio. 	Cuero K et al., 2019
Modelo logístico	<ul style="list-style-type: none"> - Medio de cultivo RM y BBM. - pH 6,8. - Temperatura de 20 ± 2 °C. - Fotoperiodo 18/6 h de luz/oscuridad. - Luz blanca, azul, roja con LEDS. - Irradiancia 180-210 lux. 	<p>Mejores resultados en el medio BBM:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Producción de biomasa de $2,88 \times 10^7$ cel/mL en el día 36 - Concentración de astaxantina de 3,1 µg/mL 	Manrique y Marín, 2019



MODELO Y PROGRAMA ESTADÍSTICO APLICADO	PARÁMETROS	RESULTADOS	AUTOR (ES)
N/A	<ul style="list-style-type: none"> - Agitación 100 rpm. - Aire filtrado con velocidad de 1,7 L /min. - Medio de cultivo RM. - pH 5,7 a 6,3. - Fotoperiodo 20/4 h de luz/oscuridad. - Agitación constante. - Deficiencia de nitrógeno 5 % - Aire filtrado con velocidad de 1,7 L /min. 	<ul style="list-style-type: none"> - Crecimiento celular de $3,19 \times 10^5$ cel/mL - Concentración de astaxantina de 1,1 µg/ml en el día 28 	Ayala y Pérez, 2019
Modelo logístico	<ul style="list-style-type: none"> - Medio de cultivo OHM y KOBAYASHI. - pH 6,8. - Temperatura de 20 ± 2 °C. - Fotoperiodo 18/6 h de luz/oscuridad. - Luz blanca. - Irradiancia 65 lux. - Agitación 100 rpm. - Aire filtrado con velocidad de 0,1vvm. 	<p>Mejores resultados en el medio OHM:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Crecimiento celular de $1,26 \times 10^6$ cel/mL en el día 14. 	Hernández, 2019
Modelo logístico	<ul style="list-style-type: none"> - Medio de cultivo RM. - pH 6,8. - Temperatura 20°C. - Fotoperiodo 20:4 Luz / Oscuridad. - Luz blanca. - Irradiancia de 280 lux con LED azul, rojo y blanco. - Deficiencia de nitratos 5 %. - Deficiencia de fosfatos 10 %. - Agitación 100 rpm. - Aire filtrado con velocidad de 1,7 L /min estéril. 	<ul style="list-style-type: none"> - Producción de biomasa de $8,62 \times 10^9$ cel/mL. - Concentración de astaxantina de 2,524 ug/mL. - Velocidad de crecimiento de 1,19 cel/día. 	Barreto y Ortiz, 2020



Determinación de condiciones de crecimiento y producción de astaxantina

MODELO Y PROGRAMA ESTADÍSTICO APLICADO	PARÁMETROS	RESULTADOS	AUTOR (ES)
Modelo logístico	<ul style="list-style-type: none"> - Medio de cultivo RM. - pH 6,8. - Temperatura 20±2 °C. - Iluminación con lámparas blancas con 20h luz/4h oscuridad. - Aire filtrado. - Irradiancia 70 $\mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$. - Concentración 1,6 g/L de acetato de sodio y 6,4 g/L de cloruro de sodio. 	<ul style="list-style-type: none"> - Crecimiento celular de $0,42 \times 10^5$ cel/mL en el día 36 Producción de astaxantina de 7,3 $\mu\text{g/ml}$ con 1,6 g/L de acetato de sodio y 6,4 g/L de cloruro de sodio. 	Rodríguez, 2020



Fases del estudio

1. Selección del Modelo

El modelo matemático seleccionado, para este estudio y para ajustar las curvas de crecimiento fue el de Gompertz debido a que ha producido el mejor ajuste en las curvas de crecimiento (Sancho, 2015; Chicata, 2015; Alborvoz, 2015; Delgado, 2019; Morales, 2017; Benavides, 2019) además, este modelo no ha sido aplicado anteriormente en el crecimiento de la microalga *Haematococcus pluvialis*.

2. Obtención de datos y parámetros experimentales de curvas de crecimiento

De los 12 trabajos identificados a 3 trabajos no se les pudo aplicar el modelo matemático, puesto que no estaban especificados los datos completos. Por lo tanto, los datos experimentales analizados correspondieron a 9 trabajos, donde se evaluaron las condiciones óptimas de crecimiento celular para la producción de astaxantina a partir de la microalga *H. pluvialis*. Se seleccionaron los 9 trabajos realizados en el periodo de 2015-2020 en la Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca en el semillero y grupo Bioprocesos y control.

3. Aplicación del Modelo Gompertz

A los resultados que mostraron el mayor crecimiento o producción celular se les aplicó el modelo Gompertz permitiendo comparar las biomásas calculadas frente a los resultados del conteo microbiano obtenidos experimentalmente.

4. Ajuste de cinéticas de crecimiento

A los resultados obtenidos en el trabajo mencionado se le ajustó el modelo de crecimiento Gompertz. Para el ajuste se empleó el software Excel y la calculadora.

$$P = \hat{A}e^{-B*e^{-Kt}} \quad (1)$$

(Gompertz, 1825)

Donde:

P= Biomasa obtenida experimentalmente con respecto al tiempo

\hat{A} = Biomasa máxima



B= Dispersión de los datos, que permiten que la curva se desplace a la izquierda o derecha.

K= Tasa de crecimiento de la curva de crecimiento.

t= tiempo.

5. Obtención de valores de la función de Gompertz con la calculadora y Excel

De la ecuación (1) se definen las siguientes variables

Variables

Variable independiente: t

Variable dependiente: P

La ecuación de Gompertz debe volverse una ecuación de recta:

$$Y = b + mx \quad (2)$$

Para esto se debe despejar la ecuación de Gompertz, Ecuación (1).

Se pasa a dividir \hat{A} , se pone $()^{-1}$ para eliminar el (-) de B

$$\frac{P^{-1}}{\hat{A}} = (e^{-B \cdot e^{-Kt}})^{-1} \quad (3)$$

Como se puso $()^{-1}$ cambia de posición $\frac{P}{\hat{A}}$ a $\frac{\hat{A}}{P}$, se saca LN con el fin de quitar el exponente de B

$$LN \left[\frac{\hat{A}}{P} \right] = LN[e^{B \cdot e^{-Kt}}] \quad (4)$$

Nuevamente se saca LN con el fin de quitar el exponente de -k

$$LN \left[LN \left[\frac{\hat{A}}{P} \right] \right] = LN[B e^{-Kt}] \quad (5)$$

Finalmente queda en forma de recta



$$LN \left[LN \left[\frac{\hat{A}}{P} \right] \right] = LN[B] - Kt \quad (6)$$

Con la siguiente igualdad

$$LN \left[LN \left[\frac{\hat{A}}{P} \right] \right] = LN[B] - Kt \quad Y = b + mx \quad Y = \hat{A} + BX \quad (7)$$

$$Y^* = LN \left[LN \left[\frac{\hat{A}}{P} \right] \right] \quad (8)$$

$$b = \hat{A} = LN[B] \quad (9)$$

$$mx = BX = -Kt \quad (10)$$

Por lo tanto, para obtener el valor de B y k, se deben obtener en la calculadora A y B que es igual a b y m, luego aplicar las ecuaciones:

$$\begin{aligned} \hat{A} &= LN[B] \\ B &= e^{\hat{A}} \\ m &= -K \\ K &= -m \\ K &= -B \end{aligned} \quad (11)$$

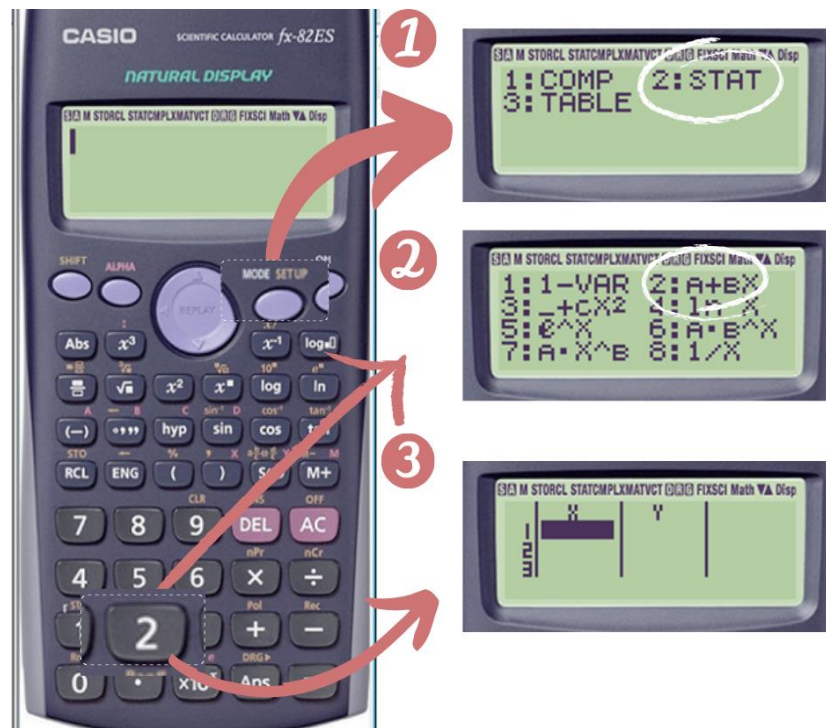
En la calculadora:

1. Se oprime MODE SETUP.
2. Se oprime 2 para escoger 2: STAT.
3. Se oprime 2 nuevamente, con el fin de escoger la opción 2: A+BX que es la función de recta, es importante aclarar que es lo mismo que b+mx, se deben introducir los datos en X que son igual al tiempo.



Figura 1

Proceso en la calculadora, pasos 1, 2 y 3



4. En Excel se pone la ecuación $LN \left[LN \left[\frac{\hat{A}}{P} \right] \right]$

A=Biomasa máxima.

P=Biomasa obtenida experimentalmente con respecto al tiempo.

Para fijar A se debe oprimir F4.



Figura 2

Proceso en Excel, paso 4

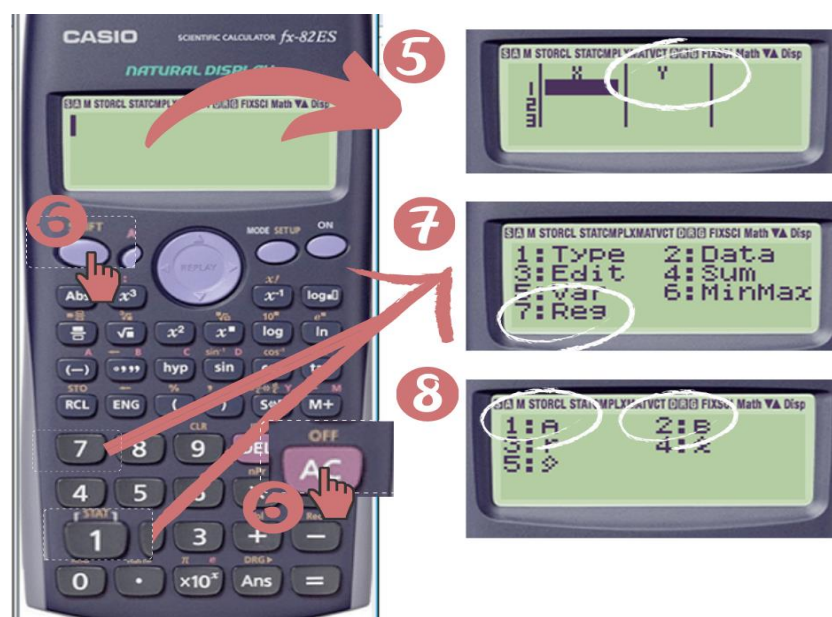
	A	B	C
1	TIEMPO (DÍAS)	Promedio Cel/ mL	Y
2	1	5800000	=LN(LN(\$B\$17/B2))
3	5	7800000	1 LN(número)
4	7	27300000	1,750262435
5	11	270000000	1,242590785
6	16	603000000	0,978733028
7	21	1430000000	0,586435787
8	28	2620000000	0,175691449
9	32	3150000000	0,007811463
10	35	2550000000	0,198154835
11	49	2770000000	0,127862894
12	56	8230000000	-3,047899836
13	73	8600000000	-5,660061757
14	79	8620000000	-6,759835037
15			
16			
17	A	8630000000	

5. De nuevo en la calculadora en Y se ponen los datos obtenidos en Excel con la ecuación $LN \left[LN \left[\frac{A}{P} \right] \right]$
6. Una vez digitados los datos, se debe oprimir AC/off, luego SHIFT.
7. Luego se debe oprimir 1 STAT, y el 7 para elegir 7: Reg.
8. Para obtener los datos de A se debe oprimir 1 y para los de B se debe volver a repetir el paso 6 y 7 y oprimir 2, recordar oprimir (=) en ambos casos para obtener los datos.



Figura 3

Proceso en la calculadora, pasos 5, 6, 7 y 8



9. Al obtener los datos de A y B se deben aplicar las ecuaciones en Excel y así obtener los datos de B y K de la Ecuación (11).
10. Se debe aplicar la ecuación de Gompertz una vez ya obtenida e identificadas las variables A, B y K de la Ecuación (1).

Figura 4

Proceso en Excel, pasos 9 y 10

SUMA X ✓ fx =\$B\$17*EXP(-\$B\$18*EXP(-\$B\$19*A2))			
A	B	C	D
TIEMPO (DÍAS)	Promedio Cel/ mL	Y	Promedio Cel/ mL Gompertz
1			
2	1	5800000	=B\$17*EXP(-B\$18*EXP(-B\$19*A2))
3	5	7800000	EXP(número) 3,571
4	7	27300000	2512533,66
5	11	270000000	40735222,13
6	16	603000000	361379419,8
7	21	1430000000	1317030315
8	28	2620000000	3497134797
9	32	3150000000	4763683165
10	35	2550000000	5591214011
11	49	2770000000	7807038955
12	56	8230000000	8224257720
13	73	8600000000	8560192489
14	79	8620000000	8592683564
15			
16			
17	A	8630000000	A= 2,8299
18	B	16,94376636	B= -0,1047
19	k	0,1047	
20			

6. Validación del modelo matemático

La validación de los modelos es uno de los pasos necesarios para realizar una comparación entre los mismos, siendo de gran importancia en el presente trabajo. Para ello, se utilizaron los parámetros obtenidos con cada uno de los modelos estudiados, para simular el crecimiento microbiano a través del tiempo y comparar dicho comportamiento con los puntos experimentales obtenidos. Estos datos obtenidos, se evalúan a partir del coeficiente de correlación obtenido (R^2) y el coeficiente de correlación ajustado (R^2_{ajs}).

7. Velocidad de crecimiento

La velocidad de crecimiento se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$\mu = \frac{\ln\left(\frac{Nt}{N0}\right)}{t - t0} \quad (12)$$

Wood et al. (2005)

Donde:

μ = Velocidad de crecimiento.

$t0$ = tiempo inicial.

t= tiempo final.

Nt=Número de células al inicio de un intervalo de tiempo.

N0= Número de células al final de un intervalo de tiempo.

8. *Tiempo de duplicación*

El tiempo de duplicación se obtiene una vez conseguida la velocidad de crecimiento mediante la siguiente fórmula:

$$td = \frac{\text{Ln}(2)}{\mu} \quad (12)$$

Wood et al. (2005)

Donde:

td= es el tiempo de duplicación.

Ln (2) es una constante=0.6931.

μ = Velocidad de crecimiento.

Resultados

A partir de los datos experimentales obtenidos de las investigaciones analizadas, se realizó un cuadro comparativo de los medios de cultivo y los mejores resultados (Tabla 2).



Tabla 2

Medios de cultivo utilizados en los diferentes trabajos de investigación

MEDIO DE CULTIVO	N° de trabajos en donde se utilizó	N° de trabajos en donde se comparó con otros medios de cultivo	N° de trabajos en donde se obtuvo el mejor resultado
RM	10	5	3
BBM	6	5	2
OHM	2	2	1
KOBAYASHI	1	1	0

Se presenta a continuación, las Figuras de las curvas de crecimiento de los 9 trabajos realizados por el grupo Bioprocesos y control, Título de la investigación y autores.

Los datos obtenidos en los diferentes trabajos de investigación, en donde se presenta un mayor crecimiento o producción celular, se muestran en las figuras desde la figura 5 a la figura 13, permitiendo comparar la biomasa calculada por el modelo Gompertz frente a los resultados del conteo microbiano obtenidos de forma experimental.

Se tuvo en cuenta las diferentes condiciones de cultivo entre las cuales se encontraban: pH, temperatura, irradiancia, fotoperiodo luz/oscuridad, agitación, deficiencia de nutrientes, % CO₂, tipo de luz, aireación y concentración de acetato en el medio.

Trabajos

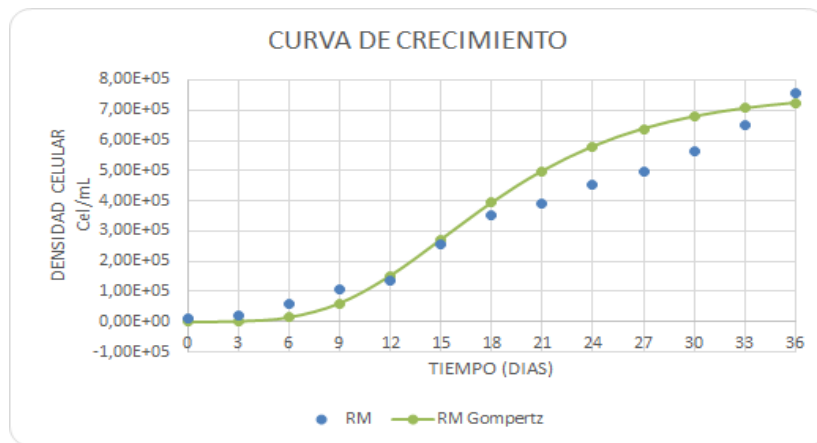


1. Evaluación de las condiciones de crecimiento celular para la producción de astaxantina a partir de la microalga *Haematococcus pluvialis*.

Niño Castillo Clara Milena, Rodríguez Rivera Francis Carolina, 2015

Figura 5

*Producción y crecimiento celular de *Haematococcus pluvialis* en medio de cultivo RM⁴*



En la Figura 6., se puede observar una comparación entre los datos obtenidos experimentalmente en el trabajo realizado por Niño, et al. (2015) y los datos calculados por los autores a través del modelo matemático Gompertz; expresados mediante una curva de crecimiento. En este trabajo, la mayor producción celular se obtuvo en el medio de cultivo RM con $7,5 \times 10^5$ cel/mL con una velocidad de crecimiento de 0,092 cél/día y producción de astaxantina de 8,3 $\mu\text{g/ml}$ de *H. pluvialis* en el día 36.

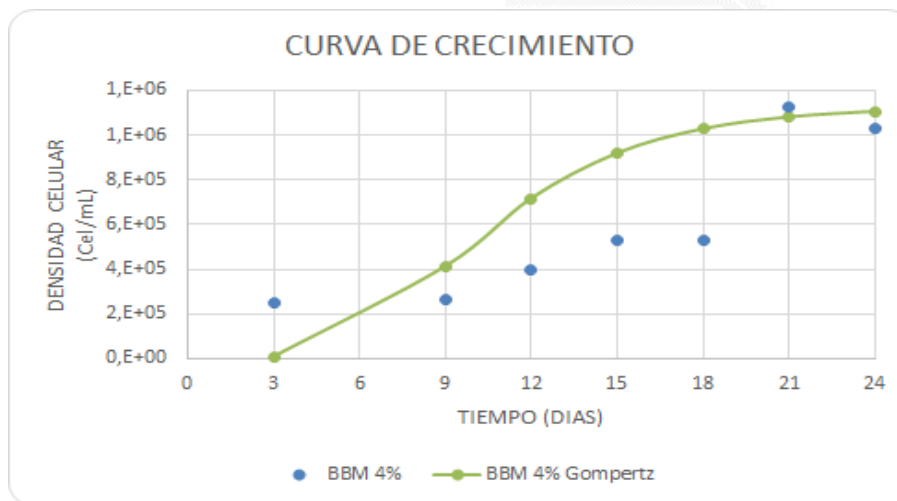


2. Producción de astaxantina y ácidos grasos bajo condiciones de estrés por deficiencia de nitrógeno y alta luminosidad en *Haematococcus pluvialis* usando medio BBM.

Ríos Alcántara Sthephany Lorena, Vargas Cruz Marian Elena, 2016

Figura 6

Producción y crecimiento celular de *Haematococcus pluvialis* en medio de cultivo BBM con deficiencia de nitrógeno al 4 %, utilizando el Método 1 (biorreactor con tapa)



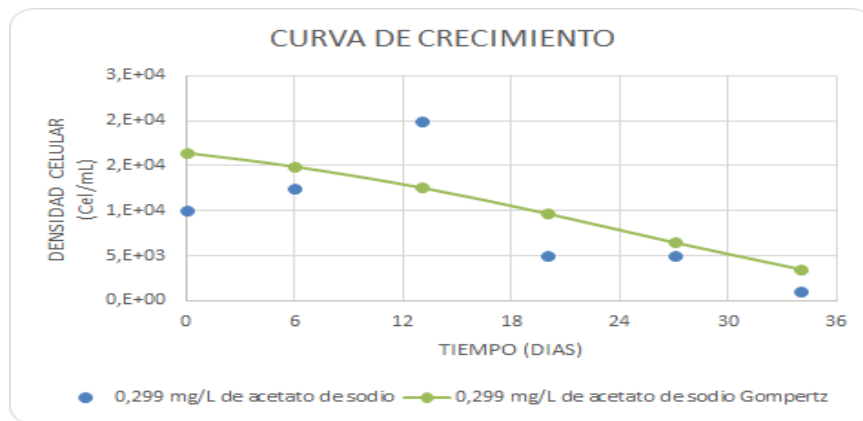
La Figura 6., muestra la comparación entre los datos obtenidos experimentalmente en el trabajo realizado por Ríos S, et al., (2016) y los datos calculados por los autores a través del modelo matemático Gompertz. Los resultados más representativos se obtuvieron con el método 1, utilizando un biorreactor con tapa y un tratamiento en el medio de cultivo BBM con deficiencia de nitrógeno al 4 %. Dichos resultados se ven reflejados en una curva de crecimiento, en donde la cepa control de *H. Pluvialis* alcanza su máximo crecimiento el día 21 con $1,12 \times 10^6$ cel/mL y una producción de astaxantina de 0,102 - 3,058 ug/ml.

3. Producción biotecnológica de astaxantina a partir de *Haematococcus pluvalis* en Biorreactor TEC-FERM de 5 litros.

García Martín Laura, 2018

Figura 7

Producción y crecimiento celular de *Haematococcus pluvalis* en medio de cultivo RM con 0,299 mg/L de acetato de sodio



La Figura 7., nos permite ver la comparación entre los datos obtenidos de forma experimental en el trabajo realizado por García (2018) y los datos calculados por los autores a través del modelo matemático Gompertz. El tratamiento con 0,299 mg/L de acetato de sodio determinó un crecimiento celular máximo de $2,0 \times 10^4$ cel/ mL y una concentración máxima de astaxantina de $2,530 \mu\text{g/mL}$ durante 34 días.

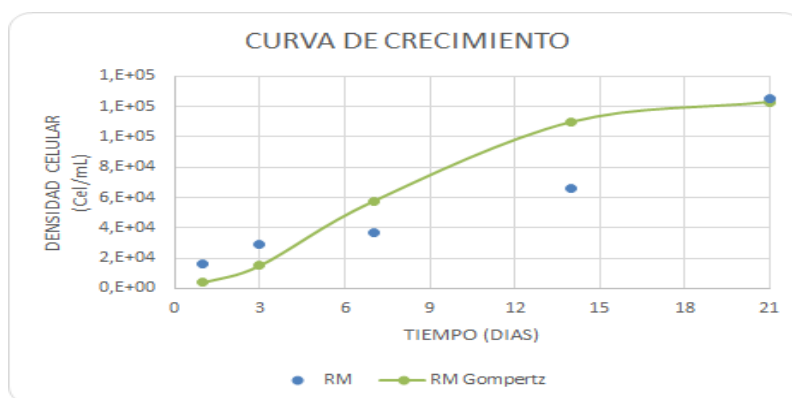


4. Producción de *Haematococcus pluvialis* en un biorreactor TERC-FERM de 5 litros en medios de cultivo RM y BBM.

Leiton Arcos Yeni Andrea, 2018

Figura 8.

Producción y crecimiento celular de Haematococcus pluvialis en medio de cultivo RM



La Figura 8, hace una comparación entre los datos de crecimiento observados experimentalmente en el trabajo realizado por Leiton (2018) y los datos calculados por los autores a través del modelo matemático Gompertz. El medio de cultivo con mayor crecimiento celular fue el medio RM con $1,25 \times 10^5$ cel/mL en el día 21 y una velocidad de crecimiento de 0,040 cel/día.

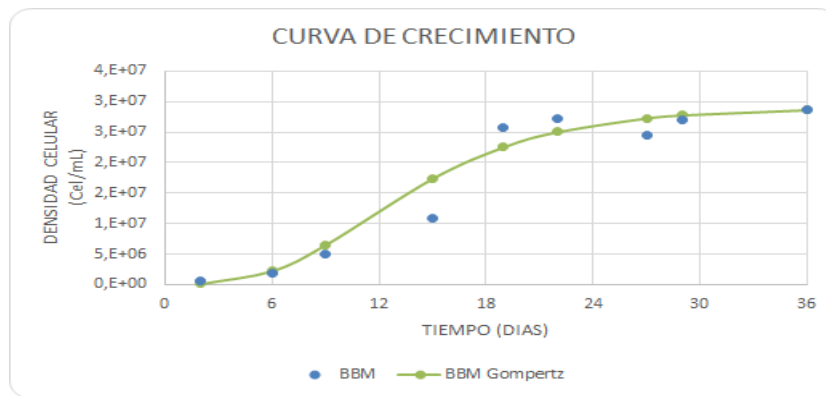


5. **Evaluación del efecto de la deficiencia de nitrógeno y alta irradiancia como factor de estrés para la producción de astaxantina en *Haematococcus pluvialis* por medio de cultivos realizados en el biorreactor Biostat A plus.**

Manrique Pinzón Mónica Alejandra, Marín Corredor David Leonardo, 2019

Figura 9

*Producción y crecimiento celular de *Haematococcus pluvialis* en medio de cultivo BBM*



En la Figura 9, se puede observar la comparación entre los datos obtenidos de forma experimental en el trabajo realizado por Manrique³¹ y los datos calculados por las autores a través del modelo matemático Gompertz. En esta investigación se obtuvo una producción de biomasa de $2,88 \times 10^7$ cel/mL y una concentración de astaxantina de $3,1 \mu\text{g/mL}$ en el medio de cultivo BBM a los 36 días de crecimiento.

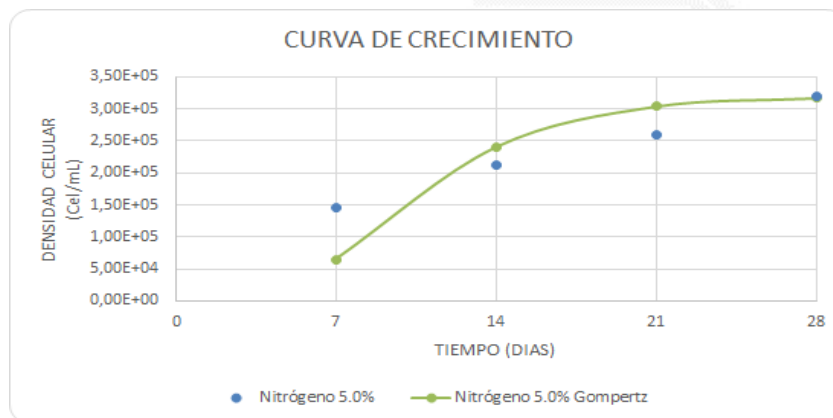


6. Producción de clorofila y astaxantina a partir de la microalga *Haematococcus pluviialis* bajo estrés inducido por deficiencia de nitrógeno en el biorreactor Biostat A plus de 5 litros

Ayala Agudelo Yazmin, Perez Zambrano Erika Tatiana, 2019

Figura 10

*Producción y crecimiento celular de *Haematococcus pluviialis* en medio de cultivo RM con deficiencia de nitrógeno 5%*



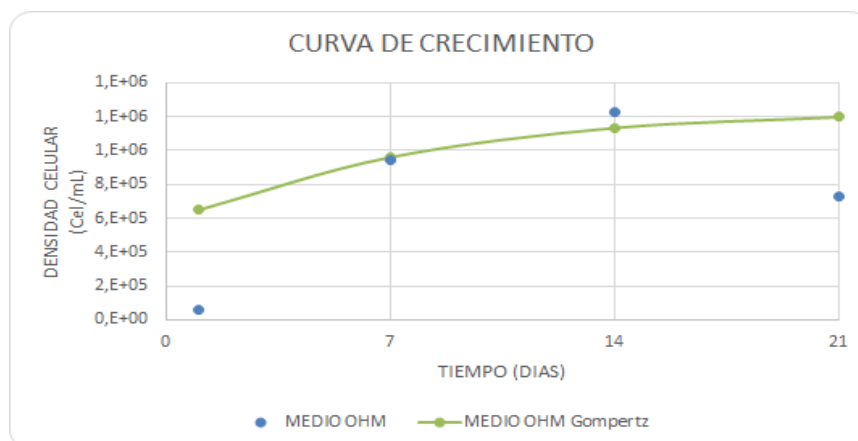
La Figura 10, muestra la comparación entre los datos obtenidos de forma experimental en el trabajo realizado por Ayala (2019) y los datos calculados por los autores a través del modelo matemático Gompertz. El tratamiento con deficiencia de nitrógeno al 5% permitió un crecimiento celular de $3,19 \times 10^5$ cel/mL, logrando una producción de $1,1 \mu\text{g/ml}$ de astaxantina en el día 28.

7. Realización del cultivo de *H. pluvialis* en biorreactor TEC-FERM de 5 litros.

Hernández Ángela, 2019

Figura 11

Producción y crecimiento celular de Haematococcus pluvialis en medio de cultivo OHM.



En la Figura 11, se hace una comparación entre los datos obtenidos de forma experimental en el trabajo realizado por Hernández (2019) y los datos calculados por los autores a través del modelo matemático Gompertz. Como resultado, se obtuvo un crecimiento y producción celular de $1,26 \times 10^6$ cel/mL en el medio de cultivo OHM en el día 14.

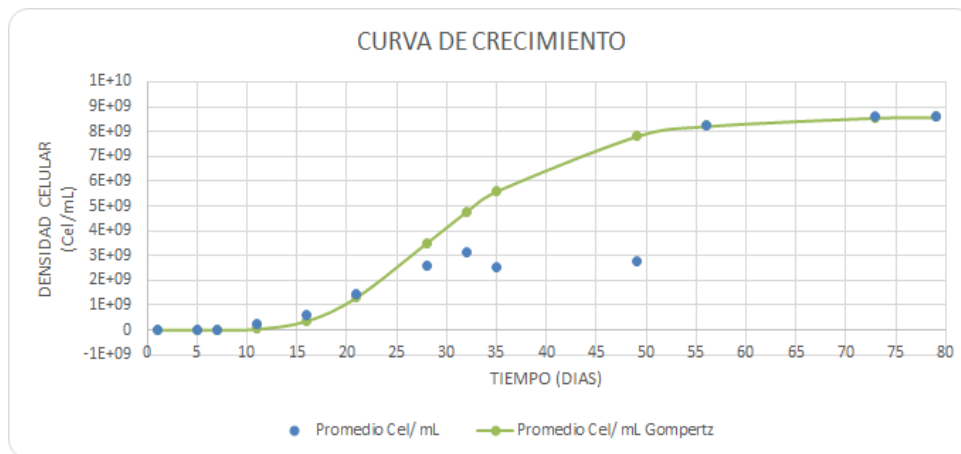


8. Producción de astaxantina en *Haematococcus pluvialis* bajo los factores de estrés deficiencia de fosfatos, deficiencia de nitratos y alta irradiancia utilizando el biorreactor Biostat A plus de 5 litros.

Barreto Forero Paula Andrea, Ortiz Basante Tatiana, 2020

Figura 12

*Producción y crecimiento celular de *Haematococcus pluvialis* en medio de cultivo RM*



En la Figura 12, se puede observar la comparación entre los datos obtenidos de forma experimental en el trabajo realizado por Barreto (2020) y los datos calculados por los autores a través del modelo matemático Gompertz. La producción de biomasa de la microalga fue de $8,62 \times 10^9$ cel/mL con una velocidad de crecimiento de 1,19 células/día y una concentración de astaxantina de 2,524 ug/ml para el día 79 de cultivo.

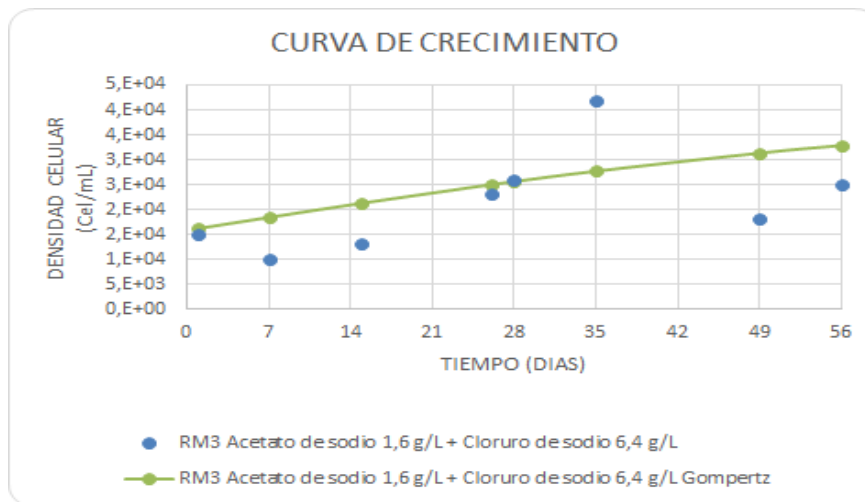


9. Producción de astaxantina en *Haematococcus pluvialis* bajo efecto de factores de estrés como acetato de sodio y cloruro de sodio.

Rodríguez Laura Johanna, 2020

Figura 13

Producción y crecimiento celular de *Haematococcus pluvialis* en medio de cultivo RM



En la Figura 13, se puede apreciar la comparación entre los datos obtenidos de forma experimental en el trabajo realizado por Rodríguez (2020) y los datos calculados por los autores a través del modelo matemático Gompertz. Con el tratamiento RM³ se obtuvo un crecimiento celular de $0,42 \times 10^5$ cel/mL en el día 35 y una concentración de astaxantina de 7,3 μ g/ml con 1,6 g/L de acetato de sodio y 6,4 g/L de cloruro de sodio.



Tabla 3

Variables obtenidas para aplicar la ecuación de Gompertz.

Variables obtenidas Gompertz	Trabajo 1	Trabajo 2	Trabajo 3	Trabajo 4	Trabajo 5	Trabajo 6	Trabajo 7	Trabajo 8	Trabajo 9
A	757 000	1 127 000	20 500	126 000	29 000 000	320 000	1 231 000	8 630 000 000	43 000
B	9,669 726 3	10,964 908	0,220 469	4,473 629 3	7,392 751 6	9,026 818 68	0,753 218 4	16,943 766 4	1,000 710 252
K	0,149 6	0,265 54	-0,061 2	0,248 8	0,178 2	0,246 7	0,158 8	0,104 7	0,023 5

Las variables obtenidas en cada trabajo para aplicar la ecuación de Gompertz se presentan en la tabla 3.

Tabla 4

Indicadores estadísticos.

Indicadores estadísticos	Trabajo 1	Trabajo 2	Trabajo 3	Trabajo 4	Trabajo 5	Trabajo 6	Trabajo 7	Trabajo 8	Trabajo 9
Coefficiente de correlación múltiple	0,982 669	0,973 264	0,997 922	0,999 827	0,981 981	0,950 759	0,998 917	0,955 705	0,997 263 911
Coefficiente de determinación R ²	0,965 639	0,947 243	0,995 848	0,999 655	0,964 286	0,903 942	0,997 835	0,913 371	0,994 535 308
R ² ajustado	0,958 767	0,920 865	0,993 08	0,999 31	0,952 381	0,711 827	0,993 505	0,896 046	0,992 349 431
Velocidad de crecimiento (cel/día)	0,092 3	0,133 4	-0,039 4	0,092 4	0,216 3	0,188 5	0,042 6	0,391 6	0,013 3
Tiempo de duplicación (td) (h)	7,509 720 27	5,196 005 851	-17,592	7,501 592 86	3,204 563 94	3,677 173 37	16,271 060 6	1,770 038 77	52,116 329 4
Observaciones	13	7	6	5	9	4	4	13	8



Los indicadores estadísticos para evaluar el ajuste del modelo Gompertz en cada trabajo se presentan en la Tabla 4.

A partir de los 9 estudios realizados por el grupo bioprocesos y control entre el 2015-2020 y los resultados obtenidos, se logró determinar que en el trabajo realizado por Barreto (2020), obtuvo la mayor producción celular ($8,62 \times 10^9$ cel/mL) con una velocidad de crecimiento de 0,39 cel/día, un bajo tiempo de duplicación de 1,77 días, coeficiente de determinación de 0,913 371 y una concentración de astaxantina de 2,524 ug/ml para el día 79 de cultivo; bajo ciertas condiciones de estrés como lo son: pH 6,8, temperatura 20 °C, fotoperiodo 20:4 h luz/oscuridad, luz blanca con una irradiancia de 280 lux con LED azul, rojo y blanco, deficiencia de nitratos del 5 % y fosfatos de 10 %, agitación a 100 rpm y aire filtrado con una velocidad de 1,7 L /min estéril en el medio de cultivo RM. Por otro lado, en el trabajo realizado por Rodríguez (2020), se obtuvo un crecimiento celular de $0,42 \times 10^5$ cel/mL en el día 36, con una velocidad de crecimiento de 0,013 3 cel/día, el tiempo de duplicación fue de 52,11 días, coeficiente de determinación de 0,992 3 y la mejor producción de astaxantina (7,3 µg/ml) con 1,6 g/L de acetato de sodio y 6,4 g/L de cloruro de sodio, pH 6.8, temperatura 20 ± 2 °C, iluminación con lámparas blancas con un fotoperiodo de 20:4 h luz/oscuridad, aire filtrado e irradiancia de $70 \mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$ utilizando el medio de cultivo RM.

Se determinó que bajo las condiciones descritas anteriormente, si se quiere obtener un mayor crecimiento celular se deben aplicar los parámetros utilizados por Barreto (Barreto y Ortiz, 2020) pero, por el contrario, si se quiere obtener una mayor concentración de astaxantina, los parámetros expuestos por Rodríguez (2020), son los más apropiados.

Se debe modificar la salinidad, debido a que se logra evidenciar una alta producción de astaxantina con 6,4 g/L de cloruro de sodio, aun cuando el crecimiento celular fue bajo. Por este motivo, y con lo documentado en antecedentes, se propone adicionar 1,28 g/L de cloruro de sodio, en vista de que este presentó el mayor crecimiento celular de $1,64 \times 10^5$ cel/mL.

Con base en lo anterior, se realizó una comparación de resultados en función de los 2 trabajos analizados, en donde, uno presentó mayor crecimiento celular, alta velocidad de crecimiento, bajo tiempo de duplicación, y el en otro se obtuvo alta concentración de astaxantina y coeficiente de determinación cercano a 1. Dicha comparación, permitió determinar y unificar los parámetros de estrés óptimos, mediante los cuales se busca obtener una mayor cantidad de astaxantina y un incremento en la producción y el crecimiento celular



a partir de la microalga *Haematococcus pluvialis*. Por lo tanto, el modelo primario Gompertz permitió establecer los siguientes parámetros propuestos por los autores (ver tabla 5):

Tabla 5

Parámetros de estrés determinados para la obtención de astaxantina, producción y crecimiento celular.

PARÁMETROS	CRITERIOS DE TRABAJO
pH	6,8
Temperatura	20±2 °C
Fotoperiodo luz/oscuridad	20 h luz/ 4 h oscuridad
Medio de cultivo	RM (Rudic's Medium)
Aireación	Aire filtrado
Irradiancia	70 - 140 $\mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$
Iluminación	Luz blanca
Deficiencia de nutrientes	Nitratos 5 % Fosfatos 10 %
Agitación	100 rpm
Cloruro de sodio	1,28 g/L
Acetato de sodio	1,6 g/L

Discusión

Las microalgas con el paso de los años, han adquirido gran importancia a nivel industrial debido a su utilidad y aplicabilidad. Estos microorganismos se han destacado por su capacidad de producción y acumulación del pigmento astaxantina, siendo el género *Haematococcus sp.*, el principal implicado. Varios autores han realizado diversas investigaciones con el fin de obtener la mayor tasa de crecimiento de *Haematococcus sp* aplicando diversos métodos, parámetros y condiciones de cultivo para lograr la optimización en producción de astaxantina.

Es así como, al obtener la velocidad de crecimiento y el tiempo de duplicación, se identifica, que son inversamente proporcionales lo que indica que entre más rápido sea el crecimiento, el tiempo de duplicación es menor (ver tabla 4) lo que permite la comparación, entre estos dos datos; se puede evidenciar, que un tiempo de duplicación corto permite una rápida y alta generación de biomasa, también reportado por Astocondor (2017).



De acuerdo a los resultados obtenidos por Li et al. (2019) se puede definir que a bajas intensidades de luz se puede generar una gran cantidad de biomasa con una supervivencia celular alta, lo que genera una mayor acumulación de astaxantina. En definitiva, se confirmó que cuanto mayor es la intensidad de luz, más rápido aparece la pigmentación roja y mayor es la cantidad de astaxantina acumulada en las células; lo que se confirma con un mayor tamaño de los quistes formados.

Shi et al. (2019) reporta la importancia de nutrientes, tales como el nitrógeno y el fósforo que favorecen el crecimiento de *H. pluvialis* sea por su aporte nutricional o su limitación. Los experimentos de factor único de nitrógeno en condiciones de crecimiento mostraron que el grupo con 0,2 g/L de NaNO_3 tenía una biomasa relativamente alta. Los experimentos de factor único de fósforo en las condiciones de crecimiento mostraron que el grupo con 0,06 g / $\text{LK}_2 \text{HPO}_4$ tenía una biomasa relativamente alta. El nivel de transcripción y la actividad enzimática del nitrato reductasa se detectaron a diferentes concentraciones de nitrato y fósforo. En ausencia de nitrógeno y fósforo en el medio, la actividad del nitrato reductasa es la más alta.

En la investigación de Niño (2015), se ha establecido que la microalga crece a un pH óptimo entre 7-9; aunque este varía constantemente debido a que este factor determina la solubilidad del CO_2 y de los minerales en los cultivos. En este proceso se puede emplear CO_2 para acidificar el medio y controlar el pH, mientras que los nitratos logran alcalinizar el medio. Por otro lado, en la investigación realizada por Wen et al. (2020), la concentración de CO_2 se evalúa como fuente de carbono, evidenciando que con una concentración del 1 al 5 % de volumen en el aire se optimiza el crecimiento de la microalga, y el uso de acetato de sodio permite un crecimiento óptimo de la microalga a una concentración de 30-38 mM e inhibición del crecimiento a altas concentraciones (>50 mM).

En el estudio realizado por Zhang et al. (2016) la aireación es considerada un factor indispensable para la biosíntesis de los carotenoides y el caudal de aire; esta es necesaria para poder asimilar el sustrato, incrementar la tasa de crecimiento, la masa molecular y la síntesis de carotenoides. La implementación de niveles bajos de aireación ayuda a reducir el estrés hidrodinámico, obteniendo resultados de 0,4 cm/s de velocidad superficial. En definitiva, las condiciones que presentaron el mejor crecimiento fueron el 1 % de CO_2 y 20 $\text{Pmol/m}^2 \text{ s}$ en relación con la aireación del medio.



La tasa de crecimiento de la microalga se ve influenciada por el factor de salinidad, en donde se evidencia la disminución de los procesos metabólicos y la replicación celular Nava (2017). Existe una relación inversa entre la salinidad y la densidad celular, por lo que es necesario establecer la cantidad exacta de sal que necesita el medio y el microorganismo para su desarrollo y reproducibilidad. Generalmente, se utiliza cloruro de sodio (NaCl) en una concentración mayor a 0,8 %; por lo que, para alcanzar una mayor producción del pigmento se estableció una longitud de onda azul con una concentración de sal de 0,45 % v/v con una productividad máxima de 9,72 $\mu\text{g} / \text{mL}$ Torres et al., (2017). Se observó también que, en diferentes ensayos, el uso de metronidazol ayudaba a mantener un cultivo axénico libre de agentes antibacterianos y antiparasitarios que puedan llegar a afectar el medio.

Esta investigación tuvo como propósito la identificación e implementación de un modelo matemático primario que fuera capaz de describir el comportamiento y el desarrollo de microorganismos, en este caso de la microalga *Haematococcus pluvialis*. Por medio de la literatura y antecedentes ya documentados, se pretendió examinar cuáles eran aquellos parámetros que propiciaban la obtención y el incremento del pigmento astaxantina como fuente natural.

Con base en la descripción de los 12 trabajos estudiados (*ver tabla 1*) se puede evidenciar que el diseño experimental propuesto fue distinto en cada estudio, así como, las condiciones de cultivo, el tipo de biorreactor y los factores de estrés. Gracias a estos resultados, se pudieron establecer los mejores parámetros para el crecimiento de *H. pluvialis* por medio del programa informático Excel en conjunto con operaciones matemáticas. Se ajustó el modelo primario Gompertz, logrando analizar el crecimiento celular en 9 trabajos de investigación en los cuales se evidenció con los resultados obtenidos, que el trabajo realizado por Barreto y Ortiz (2020) y Rodríguez (2020) suministra información precisa para el desarrollo de esta investigación.

En el trabajo de Barreto (2020) se determinaron las mejores condiciones de crecimiento para obtener mayor biomasa con alta velocidad de crecimiento y el menor tiempo de duplicación, mientras que en el trabajo de Rodríguez (2020) se determinaron las mejores condiciones para obtener mayor cantidad de astaxantina con un coeficiente de determinación (R^2) muy cercano a 1. De acuerdo con el R^2 y R^2_{aj} se obtuvo el mejor ajuste del modelo Gompertz en el trabajo realizado por Leiton (2018) con un R^2 de 0,999 6 y un R^2_{aj} de 0,999 3, seguido de Hernández (2019), García (2018) y Rodríguez (2020) con resultados también



muy cercanos a 1, presentando un R^2 de 0,99 y R^2_{ajs} de 0,99. Los resultados obtenidos del presente trabajo con respecto al ajuste logrado por el modelo primario Gompertz, coinciden con los obtenidos por Sancho (2015) con un R^2 de 0,769, Albornoz (2015) con 0,9973, Chicata (2015) con un valor de 0,9767 y González (2015) en donde el modelo de Gompertz mostró un buen ajuste de los datos con un R^2 de 0,994; todos cercanos a 1. Al respecto Benavides (2019) y Delgado et al., (2019) reportan que se obtiene una mejor correlación con el modelo de Gompertz con un R^2 de 0,99.

El empleo de diferentes medios de cultivo para mejorar el crecimiento de *H. pluvialis* se ve reflejado en los estudios realizados por diferentes autores. Se evaluó el crecimiento en los medios RM, BBM, OHM y KOBAYASHI (ver Tabla 2), destacando que el medio de cultivo RM por su composición nutricional favorece el crecimiento celular y genera una mayor acumulación de astaxantina. Así mismo, se utilizan diferentes parámetros como lo son evaluación de pH, temperatura, agitación, fotoperiodo de luz/oscuridad, aumento a la intensidad de luz (irradiancia), %CO₂, agitación, exposición a una luz determinada, adiciones sales o deficiencia de nutrientes.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los trabajos revisados y referenciados anteriormente, así como cada uno de los parámetros empleados, se observa que el medio de cultivo RM en la presente investigación obtuvo los mejores resultados y es el más representativo. Este medio de cultivo se empleó en 10 de los trabajos analizados; de los cuales 5 permitían hacer una comparación con otros medios, obteniendo mejores resultados en 3 de los trabajos en comparación con BBM que se utilizó en 2 ensayos y OHM con 1 trabajo (ver tabla 2.). En investigaciones anteriores, se analizaron los diferentes medios de cultivo para el crecimiento de la microalga *Haematococcus pluvialis*, por lo que en el trabajo realizado por Niño (2015) se encontró que el medio RM permite una mayor tasa y velocidad de crecimiento en comparación con el medio BBM y el medio OHM. Se determinó que el medio RM favorece el crecimiento y la producción celular, así como la producción de clorofila y la acumulación de astaxantina por su composición nutricional.

Teniendo en cuenta lo anterior y la aplicación del modelo matemático Gompertz, se logró establecer las condiciones estándar óptimas, para someter a la microalga a estrés y así poder obtener una gran cantidad de astaxantina junto con una alta producción y un crecimiento acelerado de la microalga *Haematococcus pluvialis*.



Conclusiones

El modelo primario Gompertz establece las condiciones de cultivo por medio de un ajuste estadístico que permitió un análisis e identificación de parámetros adecuados para alcanzar la mayor concentración de astaxantina, producción y crecimiento celular de la microalga *H. pluvialis*.

Gracias a los trabajos de Barreto y Rodríguez se lograron determinar las condiciones óptimas de crecimiento y producción de astaxantina. Los parámetros propuestos por los autores son: pH 6,8, temperatura 20 ± 2 °C, fotoperiodo 20 h luz/ 4 h oscuridad, aire filtrado, irradiancia de $70-140 \mu\text{E m}^{-2}\text{s}^{-1}$, luz blanca, agitación de 100 rpm, deficiencia de nutrientes como fosfatos del 10 % y nitratos de 5 %, adición de cloruro de sodio de 1,28 g/L y acetato de sodio de 1,6 g/L en el medio de cultivo RM. Así estos parámetros, favorecen el crecimiento celular.

Es posible realizar el ajuste del modelo primario Gompertz con el fin de evaluar el crecimiento y la reproducibilidad de la microalga para la obtención de astaxantina, lo que permitió realizar un análisis comparativo sobre los diferentes trabajos investigados.



Referencias bibliográficas

- Astocondor, M., Huatuco, E., Montoya, H., y Tarazona, R. (2017). Population growth and productivity of the native microalga *Chlorella peruviana* under different salinities. *Revista de investigación veterinaria de Perú*, 28(4), pp. 976-986.
<http://www.scielo.org.pe/pdf/rivep/v28n4/a23v28n4.pdf>
- Ávila, K., Rico, E., y Rivero, C. (2019). *Efecto del estrés producido por la variación del color de luz y la deficiencia de nitrógeno, sobre la expresión de genes y producción de astaxantina en Haematococcus pluvialis* [Trabajo de grado]. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca.
- Ayala, Y. y Pérez, E. (2019). *Producción de clorofila y astaxantina a partir de la microalga Haematococcus pluvialis bajo estrés inducido por deficiencia de nitrógeno en el biorreactor Biostat A Plus de 5 litros* [Trabajo de grado]. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca.
- Barreto, P., y Ortiz, T. (2020). *Producción de astaxantina en Haematococcus pluvialis bajo los factores de estrés deficiencia de fosfatos, deficiencia de nitratos y alta irradiancia utilizando el biorreactor Biostat A Plus de 5 litros* [Trabajo de grado]. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca.
- Chen, G., Wang, B., Han, D., Sommerfeld, M., Lu, Y., Chen, F., y Hu, Q. (2015). Molecular mechanisms of the coordination between astaxanthin and fatty acid biosynthesis in *Haematococcus pluvialis* (Chlorophyceae). *Plant J*, 81(1), pp. 95-107.
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25353310/>
- Chicata, M. (2015). *Formulación de un modelo matemático para determinar la vida útil de trucha (Oncorhynchus mykiss) refrigerada utilizando microbiología predictiva* [Trabajo de grado]. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Cruz, M. (2017). Cultivo masivo de la microalga *Haematococcus sp.* en fotobiorreactores planos para la producción de astaxantina bajo diferentes condiciones de estrés [Tesis de maestría]. *Baja California: Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.*
https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/1889/1/tesis_Cruz_jim%C3%A9nez_Marco_Antonio_06_dic_2017.pdf



- Cuero, K., Domínguez, J., Espitia, K., Fuentes, L. (2019). *Efecto de los factores de estrés acetato de sodio, alta irradianza y color de luz para la producción de astaxantina en Haematococcus Pluvialis* [Trabajo de grado]. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca.
- Delgado, J., Soler, J., y Peña, J. (2019). Aplicación de los modelos cinéticos Logístico Integrado y Gompertz Modificado para la producción de bioetanol en procesos fermentativos a partir de mucílago de cacao CCN-51. Jornada de Jóvenes Investigadores del I3A 7:2341-4790.
<https://papiro.unizar.es/ojs/index.php/jji3a/article/view/3527>
- Díaz, J., Gómez, L., Orozco, M., y Quiroga, N. (2016). *Efecto de la deficiencia de nitrógeno sobre la expresión de genes y la producción de astaxantina en Haematococcus pluvialis* [Trabajo de grado]. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca.
- Ding, W., Peng, J., Zhao, Y., Zhao, P., Xu, J., y Li, T. (2018). A strategy for boosting astaxanthin accumulation in green microalga *Haematococcus pluvialis* by using combined diethyl aminoethyl hexanoate and high light. *J Appl Phycol*, (31), pp.171–181. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10811-018-1561-8>
- García-Martin L. (2018). *Producción biotecnológica de astaxantina a partir de Haematococcus pluvialis en biorreactor TEC-FERM de 5 litros* [Trabajo de grado]. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca.
- Garre, A., Egea, J., y Fernández, P. (2016). Modelos matemáticos para la descripción del crecimiento de microorganismos patógenos en alimentos. *Anuario de Jóvenes Investigadores*, 9.
<https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/5909/mmd.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- González, KA. (2015). *Efecto de las condiciones ambientales en el contenido de pigmentos en la microalga Chlorella sp* [Trabajo de grado]. Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Orizaba.
http://repositorios.orizaba.tecnm.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/319/Kevin_%C3%81ngel_Gonz%C3%A1lez_Falf%C3%A1n.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Hernández, A. (2019). *Realización del cultivo de H. pluvialis en biorreactor Tecferm de 5 litros* [Trabajo de grado]. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca.



<http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/332/M-21337.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Kim, S. y Kim, H. (2018). Inhibitory Effect of Astaxanthin on Oxidative Stress-Induced Mitochondrial Dysfunction-A Mini-Review. *Nutrients* 2020, 10(9).

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6165470/>

Leiton, Y. (2018). *Producción de Haematococcus pluvialis en un biorreactor TECFERM de 5 litros en medios de cultivo RM y BBM* [Trabajo de grado]. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca.

Li, F., Cai, M., Lin, M., Huang, X., Wang, J., y Ke, H. (2019). Differences between Motile and Nonmotile Cells of *Haematococcus pluvialis* in the Production of Astaxanthin at Different Light Intensities. *Mar Drugs*, 17(1).

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6356902/>

Manrique, I., y Corzo, R. (2019). *Evaluación de carotenoides y lípidos en la microalga Scenedesmus dimorphus a escala laboratorio bajo condiciones de fotobiorreactor* [Trabajo de grado]. Fundación Universitaria de América.

<https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7392/1/6141292-2019-1-IQ.pdf>

Manrique, M., y Marín, D. (2019). *Evaluación del efecto de la deficiencia de nitrógeno y alta irradiancia como factor de estrés para la producción de astaxantina en Haematococcus pluvialis por medio de cultivos realizados en el biorreactor Biostat A Plus* [Trabajo de grado]. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca.

Morales, G., Llorente, I., Montesinos, E., Moragrega, C. (2017). A model for predicting *Xanthomonas arboricola* pv. *pruni* growth as a function of temperature. *PLoS One*, 12(5).

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5426779/>

Nava, B. (2017). *Optimización del crecimiento y producción del carotenoide astaxantina por la microalga Haematococcus sp. en diferentes condiciones de cultivo* [Tesis de maestría]. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.

https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/1278/1/Tesis_Nava_G%C3%B3mez_Beatriz_25-04-17.pdf



- Niño, C., y Rodríguez, F. (2015). *Evaluación de las condiciones de crecimiento celular para la producción de astaxantina a partir de la microalga Haematococcus pluvialis Microalgae* [Trabajo de grado]. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca.
- Ramírez, DM. (2013). *Evaluación del crecimiento y producción de astaxantina por Haematococcus pluvialis en un fotobiorreactor tipo airlift* [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional de Colombia. <https://core.ac.uk/download/pdf/19485152.pdf>
- Ríos, S., y Vargas, M. (2016). *Producción de astaxantina y ácidos grasos bajo condiciones de estrés por deficiencia de nitrógeno y alta luminosidad en Haematococcus pluvialis usando medio BBM* [Trabajo de grado]. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca.
- Rodríguez, L. (2020). *Producción de astaxantina en Haematococcus pluvialis bajo efecto de factores de estrés como acetato de sodio y cloruro de sodio* [Trabajo de grado]. Universidad Colegio Mayor de Cundinamarca.
- Sancho, R. (2015). *Ajuste de modelos matemáticos de crecimiento de bacterias lácticas en queso tipo paria en condiciones isotérmicas y no isotérmicas* [Trabajo de grado]. Universidad Nacional del Altiplano. [http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/3344/Sancho Mamani Ronald Fernando.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/3344/Sancho_Mamani_Ronald_Fernando.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Shah, M., Liang, Y., Cheng, J., y Daroch, M. (2016). Astaxanthin-Producing Green Microalga *Haematococcus pluvialis*: From Single Cell to High Value Commercial Products. *Front Plant Sci*, 7(531). <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4848535/>
- Shi, J., Zang, X., Cong, X., Hou, L., He, B., Ding, Y., Dong, M., Sun, D., Guo, Y., Zhang, .F, Wang, Z., Wei, X., y Zhang, X. (2019). Cloning of nitrite reductase gene from *Haematococcus pluvialis* and transcription and enzymatic activity analysis at different nitrate and phosphorus concentration. *Gene*, 697, pp. 123-130. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30794916/>
- Solano, M., y Vidaurre, J. (2017). Aplicación de modelos cinéticos no estructurados en el modelamiento de la fermentación láctica de subproductos de pesca. *Scientia Agropecuaria*, 8(4), pp. 367-375. <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2017.04.08>.



- Sosa, J., Rodas, L., Castillo, C., Rostro, M., de la Cruz, R., y Carrillo, D. (2019). Impacto de la intensidad de la luz y la concentración de nitrógeno en la producción de biomasa y ficoeritrina por *Porphyridium purpureum*. *Mar Drugs*, 17(460).
- Tjørve, K., y Tjørve, E. (2017). The use of Gompertz models in growth analyses, and new Gompertz-model approach: An addition to the Unified-Richards family. *PLoS One*: e0178691. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5459448/>
- Torres, L., González, A., Barajas, A., Suarez, J., y Urbina, N. (2017). Astaxanthin Production from *Haematococcus pluvialis*: Effects of Light Wavelength and Salinity. *Contemporary Engineering Sciences*, 10(35), pp. 1739- 1746. <http://www.m-hikari.com/ces/ces2017/ces33-36-2017/p/gonzalezCES33-36-2017-3.pdf>
- Trinidad, A. (2014). *Modelos de crecimiento en biología, su significado biológico y selección del modelo por su ajuste* [Trabajo de grado]. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa.
- Wen, X., Wang, Z., Ding, Y., Geng, Y., y Li, Y. (2020). Enhancing the production of astaxanthin by mixotrophic cultivation of *Haematococcus pluvialis* in open raceway ponds. *Aquacult Int*, 28, pp. 625–638. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10499-019-00483-2>
- Zhang, L., Su, F., Zhang, C., Gong, F., y Liu, J. (2016). Changes of Photosynthetic Behaviors and Photoprotection during Cell Transformation and Astaxanthin Accumulation in *Haematococcus pluvialis* Grown Outdoors in Tubular Photobioreactors. *Int J Mol Sci*, 18(1). <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5297668/>
- Zhao, X., Zhang, X., Liu, H., Zhu, H., y Zhu, Y. (2019). Enzyme-assisted extraction of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis* and its stability and antioxidant activity. *Food Sci Biotechnol*, 28, pp. 1637–1647. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6859130/>



Efecto del Campo Magnético en la Electro-descontaminación de suelos arcillosos contaminados con Plomo*Effect of the Magnetic Field in the Electro-decontamination of clayey soils contaminated with Lead*Miguel Ángel Ferreira ²⁰
Nelson Geovani Serrano Ibarra ²¹
Gabriel Peña Rodríguez ²²**Resumen**

Los suelos son entornos esenciales para la supervivencia, los cuales debido a la falta de conciencia antropogénica en cuanto a la protección y cuidado se han visto afectados. Por lo tanto, se pretende conocer el efecto del campo magnético externo aplicado durante la electro-descontaminación de muestras de suelos arcillosos caoliníticos contaminados con plomo a nivel de laboratorio. Para lo cual se utilizaron muestras de suelo contaminadas con un estándar de plomo a 1000 ppm, a 100 ppm y 200 ppm respectivamente obteniendo una humedad del 30 %. En la electro-descontaminación, se utilizó una celda con solución salina de cloruro de sodio al 0,09 % y ácido acético al 0,01 M como electrolito y electrodos de malla de titanio conectados a una fuente de poder a 20 V, a la cual se le aplicó un campo magnético externo de 0,0241 Teslas dado por una bobina. Para el análisis del tratamiento se tomaron en cuenta diversos parámetros cada 30 minutos durante 24 horas de tratamiento. Después de transcurridas las 24 horas del proceso las muestras tratadas se analizaron mediante Espectrofotometría de Absorción Atómica (AAS) y Espectrofotometría Ultravioleta-Visible (UV-VIS) para determinar la concentración de Plomo antes y después del tratamiento con el fin de conocer la eficiencia del campo magnético. Los resultados muestran porcentajes de remoción con la presencia de un campo magnético de 71,5 % por AAS y de 86,3 % y 69,6 % por AAS y de 94,9 % para muestras contaminadas a 100 ppm y 200 ppm respectivamente, resaltando que la presencia del campo magnético externo mejora notablemente el tratamiento del suelo.

Palabras clave: remoción, contaminante, concentración de Plomo, eficiencia, tratamiento

²⁰ Estudiante. Facultad De Ciencia Agrarias y del Medio Ambiente. Ingeniería Ambiental, Universidad Francisco De Paula Santander. Cúcuta, Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-5212-4473>. angelfm@ufps.edu.co

²¹ Estudiante. Facultad De Ciencia Agrarias y del Medio Ambiente. Ingeniería Ambiental, Universidad Francisco De Paula Santander. Cúcuta, Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-6046-0637>. nelsongeovanisi@ufps.edu.co

²² Doctor en ingeniería de Materiales y Tecnologías Avanzadas. Semillero de Investigación en Física e Instrumentación de la Materia Condensada (SIFIMAC), Universidad Francisco De Paula Santander. Cúcuta, Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-7114-9174>. gabrielpr@ufps.edu.co



Abstract

Soils are essential environments for survival, which due to the lack of anthropogenic awareness regarding protection and care have been affected. Therefore, it is intended to know the effect of the external magnetic field applied during the electro-decontamination of lead-contaminated kaolinitic clay soil samples at the laboratory level. For which soil samples contaminated with a lead standard at 1000 ppm, 100 ppm and 200 ppm respectively were used, obtaining a humidity of 30%. In the electro-decontamination, a cell with 0.09% sodium chloride saline solution and 0.01 M acetic acid as electrolyte and titanium mesh electrodes connected to a 20 V power source were used, at the which an external magnetic field of 0.0241 Teslas given by a coil was applied. For the analysis of the treatment, various parameters were taken into account every 30 minutes during 24 hours of treatment. After the 24 hours of the process, the treated samples were analyzed by Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) and Ultraviolet-Visible Spectrophotometry (UV-VIS) to determine the concentration of Lead before and after treatment in order to know the efficiency of the treatment. magnetic field. The results show removal percentages with the presence of a magnetic field of 71.5% for AAS and 86.3% and 69.6% for AAS and 94.9% for samples contaminated at 100 ppm and 200 ppm, respectively. highlighting that the presence of the external magnetic field significantly improves the treatment of the soil.

Keywords: removal, contaminant, lead concentration, efficiency, treatment.



Introducción

El acelerado crecimiento de la población humana ha llevado que grandes extensiones de suelos sean utilizadas como base para el desarrollo de la sociedad lo que ha generado que cada vez más ocurran diversos impactos ambientales, como la pérdida de biodiversidad, alteración en los ecosistemas presentes, emisión de contaminantes a la atmósfera, entre otros. Estas problemáticas son consecuencia del poco interés y falta de eficacia en las técnicas de control y manejo, lo cual han provocado el deterioro de los suelos (Wuana y Okieimen, 2011).

Una de las afectaciones que ha ido creciendo con el tiempo, es la acumulación de metales pesados en el suelo ya que “constituyen uno de los grupos de contaminantes ambientales sujetos a una mayor investigación y preocupación, fundamentalmente debido a su movilidad y a las bajas concentraciones a las que comienzan a manifestar sus efectos tóxicos” (A.I. Roca Fernandez, 2010). Esto debido a la falta de conciencia en el consumismo de productos que pueden contener estos contaminantes, como en el caso del Plomo que se logra encontrar en la naturaleza formando una gran variedad de minerales, entre los que se encuentran principalmente la galena (PbS), la anglesita ($PbSO_4$) y la cerusita ($PbCO$). (Lenntech y Purificación del Aire Holding B.V, 2007). Siendo este metal clasificado como uno de los 10 productos químicos de mayor preocupación para la salud (OMS, 2020), logrando encontrarlo desde una lata de pintura hasta en una simple batería (Muñoz Guerrero y O'Farril Delis, 2018), donde este metal es perjudicial tanto para la salud humana especialmente donde este metal es perjudicial tanto para la salud humana especialmente en niños de corta edad provocando consecuencias graves en el desarrollo del cerebro y el sistema nervioso (Congreso de la República de Colombia, 2015), además la exposición a este metal causa en adultos hipertensión arterial y lesiones renales, además en las mujeres embarazadas puede causar el aborto natural, muerte fetal, parto prematuro y malformaciones leves en el feto. (OMS, 2019), y en el caso del suelo presenta igualmente un gran peligro puesto que la distribución química del plomo depende del pH y del contenido de materia orgánica, por lo que puede ocasionar la limitación en la síntesis clorofílica de las plantas perjudicando su crecimiento e introduciéndose en la cadena alimenticia (Oyarzun, Higuera, y Lillo, 2011).

Con base a lo anterior, la presente investigación tiene como propósito contribuir en la búsqueda de alternativas para la descontaminación del suelo ayudando en la disminución de



futuras afectaciones, avanzando en la búsqueda de herramientas que permitan reformar los tratamientos para la remediación de los suelos con alto contenido de Plomo que sean efectivos, innovadores, económicamente viables, mediante la aplicación de celdas electrolíticas con muestras representativas de suelo contaminadas en concentraciones media y alta, en las cuales las especies iónicas (Plomo), migran por la acción del campo eléctrico y un campo magnético externo constante (Carbonell, Flórez, Martínez, y Álvarez, 2017).

Con el propósito de hallar alternativas para la solución de las problemáticas que surgen a partir de los suelos contaminados, en las últimas décadas se ha incursionado en la búsqueda de nuevas tecnologías para la remediación de suelos *in situ*, en las cuales la electro-remediación se presenta como una de las más apta para expulsar contaminantes tanto orgánicos como inorgánicos (De la Rosa Pérez, Teutli León, y Ramírez Islas, 2007), teniendo en cuenta que durante el proceso es importante asegurar la migración del OH^- , para así obtener un aumento de la eficiencia en la eliminación del contaminante. (Fansheng, Lingli, Juling y Yeyao, 2013)

De esta forma Alcivar Perez (2018), evaluó la técnica de electro-remediación para la remoción de metales pesados de suelos, obteniendo una eficiencia del 99,9 % de remoción del contaminante en un lapso de 24 horas a 40 V; igualmente, Alcántara, Gómez, Pazos, y Sanromán (2011), realizaron el estudio de la remediación electrocinética en suelos arcillosos y arenosos contaminados con plomo y fenantreno, aplicando un campo magnético dando como resultado una remoción de más del 90 % y 70 % de los contaminantes después de 30 días.

El presente documento tiene como objetivo presentar el estudio de remediación de una muestra de suelo contaminada a nivel de laboratorio con plomo, evaluando así mismo el porcentaje de eficiencia de la técnica de electro-descontaminación cuando se le aplica un campo magnético. Teniendo en cuenta parámetros fijos que pueden afectar la eficiencia de la misma como lo son la intensidad de corriente aplicada, tiempo de remediación, tipo de electrolito y sustancia electrolítica.



Metodología

Tipo de Investigación

El tipo de investigación de este trabajo es de carácter exploratorio aplicado, ya que se estudian los efectos de un campo magnético exterior constante en una celda de electroremediación usando barras de electrodos de grafito a fin de determinar la eficiencia en los procesos de remoción del Plomo en suelos arcillosos contaminados.

Población y Muestra

Población

La población utilizada para esta investigación son los suelos arcillosos caoliniticos representativos de la región (Norte de Santander- Colombia) los cuales provienen principalmente de la formaciones León y Guayabo que han sido contaminados con plomo, producto de la utilización de pinturas, gasolina, baterías entre otros y que son empleados por la población en su cotidianidad.

Muestra

Las muestras de suelos utilizados para esta investigación son preparadas a nivel de laboratorio en concentraciones media y alta.

Delimitación Espacial

Los espacios utilizados para el desarrollo de esta investigación se describen a continuación:

- ***Laboratorios del grupo de investigación en instrumentación y física de la materia condensada GIFIMAC-UFPS***

El punto de investigación de este proyecto tiene inicio en este laboratorio ya que este es el lugar donde se realiza la preparación de las muestras de suelos a diferentes concentraciones de Plomo, así como también de la elaboración del diseño experimental.

- ***Laboratorios de calidad ambiental campos elíseos***

Este laboratorio queda ubicado en el municipio de los patios y es sede de la Universidad Francisco de Paula Santander; es el espacio destinado para el complemento de la investigación ya que en él se desarrolla el análisis de UV-VIS.



- ***Laboratorios de análisis instrumental de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín***

En este laboratorio se desarrolló el análisis de espectrofotometría de absorción atómica (AAS).

Etapas del Proyecto

El desarrollo de las etapas se expone a continuación:

Preparación de las Muestras

En esta etapa se realizó la preparación de las muestras de suelo a nivel de laboratorio, para lo cual se consiguieron muestras de suelos arcillosos caoliniticos de la región los cuales fueron suministrados por caolines Santander. Posteriormente se preparó una solución líquida de agua destilada-plomo, para lo cual se usó un patrón de plomo a 1000 ppm (Sidoli O'Connor, Lepp, Edwards, y Sunderland, 2003), y realizando una disolución obtener una concentración media de 100 ppm y alta de 200 ppm en agua, la cual se aplicó en una relación 1:0,5 (suelo/disolución) al suelo, y se homogenizo usando agitación mecánica. Paso seguido, se dispuso en la celda de electro-remediación.

Diseño de la Celda de Electro-Remediación y/o Electro-Descontaminación

En la figura 1, se presenta el diseño de la celda de electro-remediación sin la presencia del campo magnético externo que se utilizó a nivel de laboratorio, en ésta se aprecian las diferentes partes o elementos, donde se utilizó electrodos de malla de titanio, y como electrolitos una solución salina de cloruro de sodio al 0,09 % y ácido acético al 0,01 M. La configuración con la presencia del campo magnético se puede ver en la figura 2, aquí la celda se ubica en el centro de la bobina tipo solenoide, la cual se conecta a una fuente de poder de 30 Voltios, que induce el campo magnético equivalente a 0,0241 T durante el proceso de electro-remediación 0,1 M (Faiqun Ni'am, Othman, Sohaili y Fauzia, 2006).



Figura 1

Esquema de la celda de electro-remediación de suelos, sin la presencia del campo magnético externo.

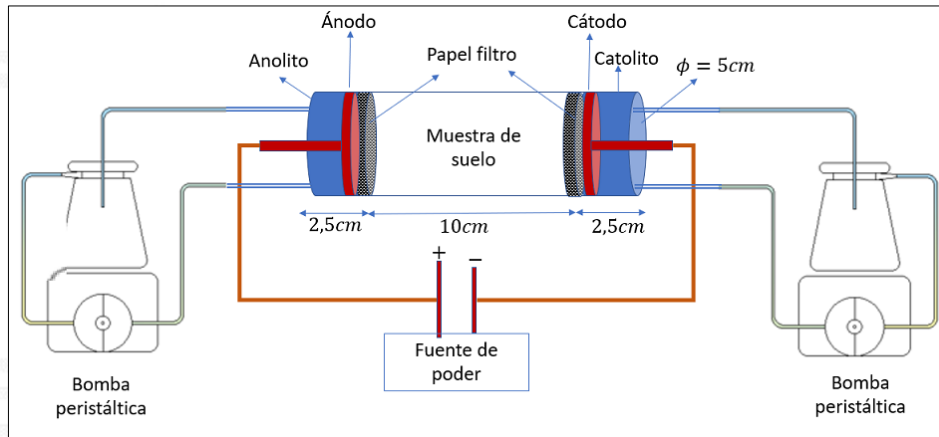
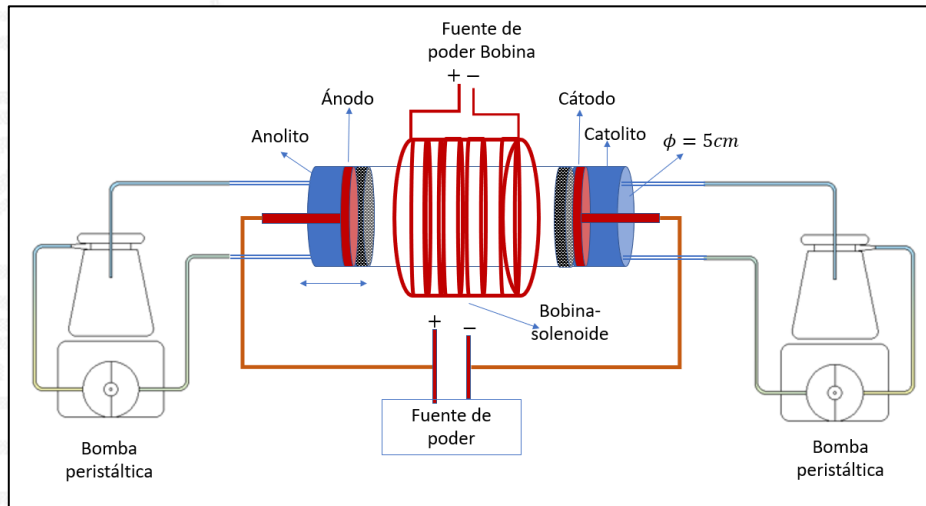


Figura 2

Esquema de la celda de electro-remediación de suelos, con la presencia del campo magnético externo.



El proceso de electro-descontaminación de la muestra de suelo con y sin la aplicación del campo magnético externo, se realizará por 24 horas, durante este lapso, se monitoreó el pH tanto del anolito como de catolito cada 30 min.



Medición de Parámetros Previamente Establecidos

Se determinaron los parámetros de pH, conductividad eléctrica, resistividad, salinidad, sólidos disueltos totales y temperatura al electrolito durante el tratamiento y composición química por AAS y FRX, a las muestras de suelo antes y después del tratamiento con y sin la presencia de campo magnético con el fin de estudiar la eficiencia que ejerce el campo magnético en las muestras de suelos arcillosos contaminados con Plomo. Estas medidas experimentales se realizaron en los laboratorios del grupo de Instrumentación y Física de la materia (GIFIMAC), así como en el laboratorio de suelos y calidad ambiental de la UFPS y en los laboratorios de análisis instrumental de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

Resultados

En la figura 3 se presenta una fotografía del proceso de electro-descontaminación del suelo con plomo sin la presencia del campo magnético, en esta se aprecian los diferentes componentes del proceso de electro-remediación, por otra parte, la figura 4 presenta una imagen del mismo sistema donde la diferencia de la figura 3, se aprecia la bobina de cobre usada para aplicar el campo magnético externo, la cual se dispuso de forma tal que las líneas de campo magnético estuvieran en la misma dirección de las líneas de campo eléctrico producido entre los electrodos con el objeto que ayudó al proceso de electro-migración de los iones de Plomo dentro de la muestra de suelo y así descontaminar el suelo de estos iones, lo anterior es bien conocido dado que los iones del metal pesado en este caso Pb, al estar en presencia de un campo eléctrico ($E \vec{}$) y magnético ($B \vec{}$) adquieren una velocidad o movilidad que es proporcional a la fuerza electro-magnética aplicada ($F \vec{}=qE \vec{}+qv \vec{}\times B \vec{}$) (Ng, Gupta, y Hashim, 2016).



Figura 3

Montaje de la celda de electro-remediación de suelos, sin la presencia del campo magnético externo

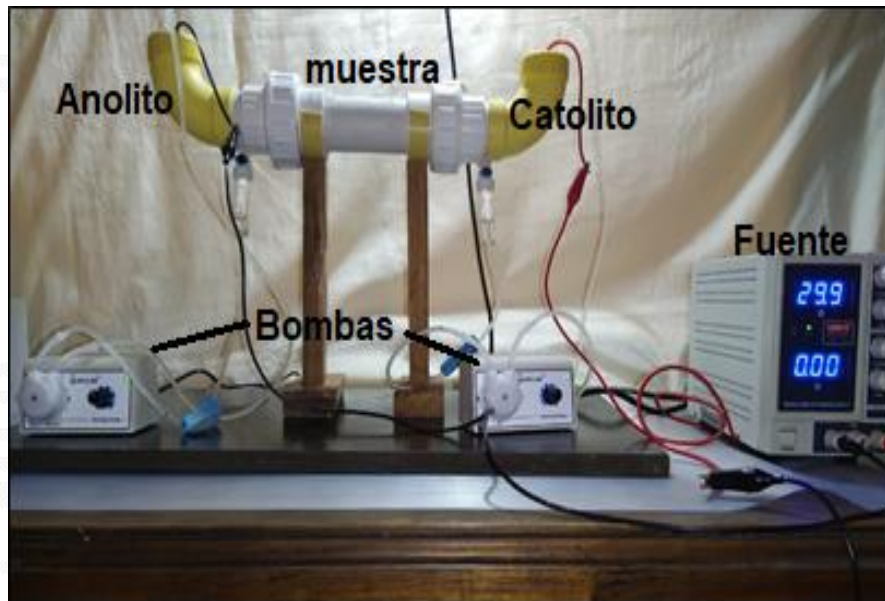
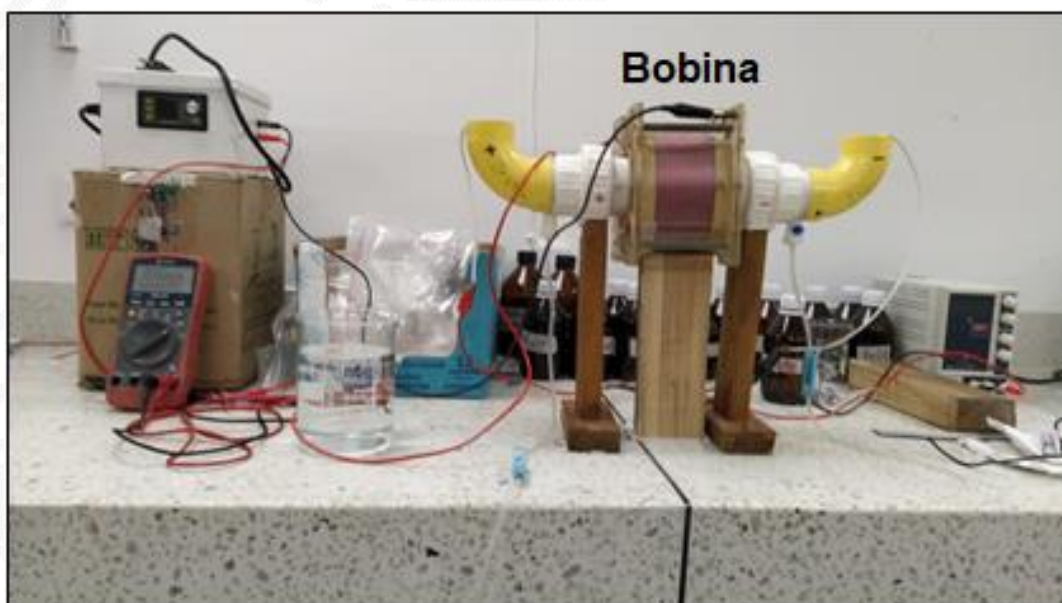


Figura 4

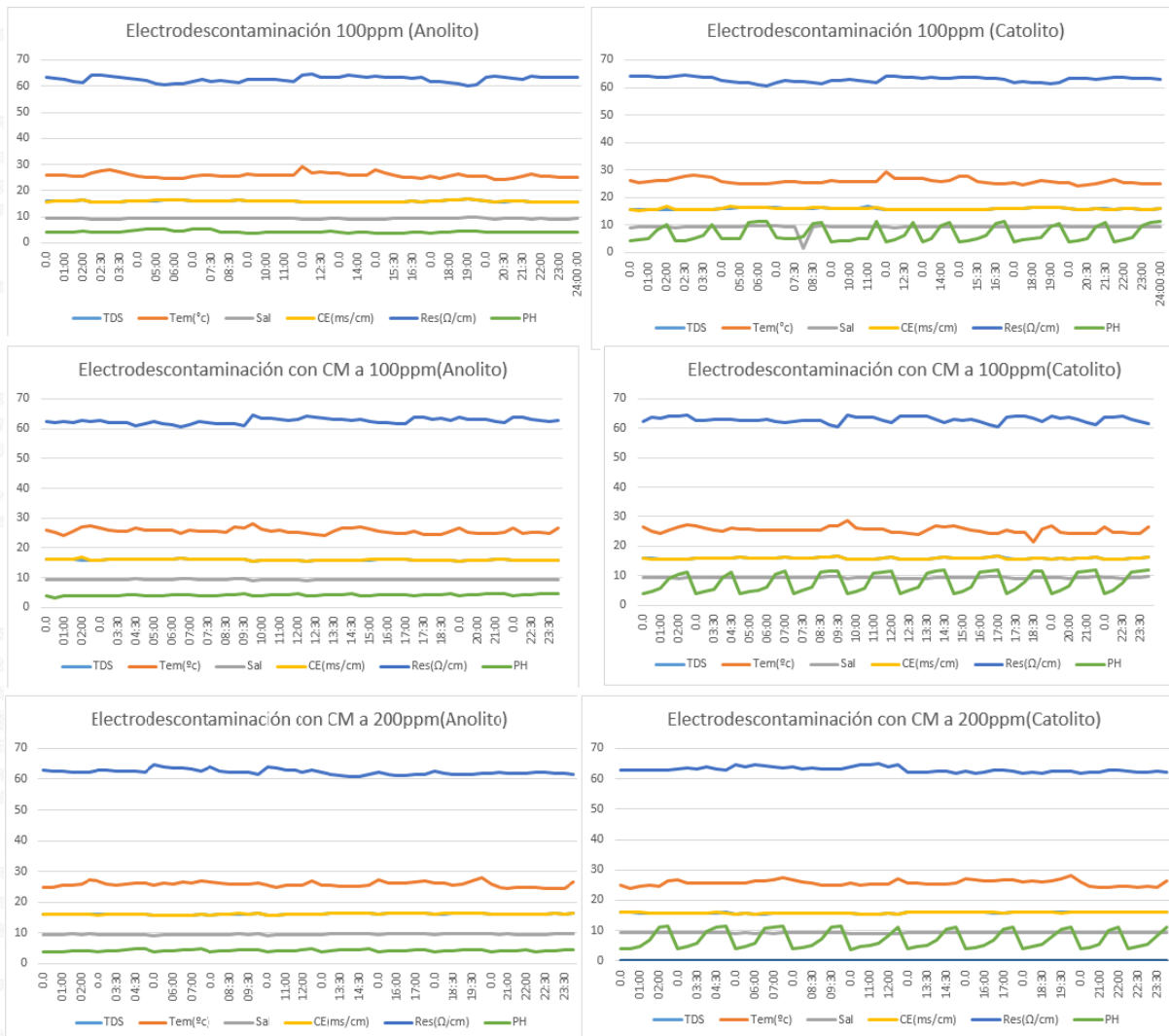
Montaje de la celda de electro-remediación de suelos, con la presencia del campo magnético externo.



Variabilidad de los Parámetros en los Electrolitos Durante el Tratamiento

Figura 5

El comportamiento de los parámetros TDS, temperatura, salinidad (Sal), conductividad eléctrica (CE), resistividad eléctrica (Res) y pH del anolito y catolito durante la electro-descontaminación de la muestra de suelo caolinítico contaminado con plomo tanto para la concentración media (100 ppm) como alta (200 ppm)



Nota. La figura representa el comportamiento del electrolito en el ánodo y en el cátodo, en el cual se evalúan los parámetros de: sólidos disueltos totales, temperatura, salinidad, conductividad eléctrica, resistividad eléctrica y pH. En intervalos de 30 minutos durante 24 horas.



De la Figura 5 se puede observar que el comportamiento del pH durante el tratamiento del anolito fue disminuyendo gradualmente, mientras que en el catolito el nivel del pH fue aumentando de manera significativa en el transcurso del proceso, lo anterior es acorde con lo reportado por De la Rosa Pérez, Teutli León, y Ramírez Islas (2007); García Hernández, Vargas Ramírez, y Reyes Cruz (2011); Alcántara, Gómez, Pazos, y Sanromán (2011); entre otros. Así mismo, debido a que el electrolito se renovaba periódicamente, se aprecia que el pH del catolito se incrementa hasta saturarse, mientras que para el anolito permanecía prácticamente constante. Por otra parte, los demás parámetros no presentaron cambios notables, sin embargo, la salinidad, conductividad y sólidos totales disueltos (TDS) aumentan de manera leve por la extracción de la muestra de la celda y seguramente la extracción de plomo, de igual forma la resistividad del electrolito disminuye en la misma proporción.

Concentración de Plomo Mediante Espectrofotometría de Absorción Atómica (AAS)

En esta parte se realizó el análisis de la concentración de plomo en mg/Kg o ppm presente en las muestras de suelo caolinítico.

La técnica utilizada de AAS, se realizó mediante el equipo marca GBC modelo AVANTA Σ (*ver figura 6*), acoplado a una Lámparas de cátodo hueco de Pb. La preparación de la muestra se llevó a cabo mediante procedimiento para lectura de metales (digestión ácida). Todo lo anterior fue realizado en los laboratorios de análisis instrumental de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.



Figura 6

Espectrómetro de absorción atómica.



Nota. Espectrómetro GBC modelo AVANTA Σ. Fuente: Laboratorios de análisis instrumental de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín 2021.

En la tabla 1, se presentan los resultados para cada una de las muestras, en esta se puede apreciar que la concentración de plomo en la muestra inicial suministradas por caolines Santander reportó un valor de 21 ppm, dato que fue utilizado para calcular las eficiencias de remoción tanto por el tratamiento de electro-remediación como electro-remediación y campo magnético, para lo cual se usó la expresión (1):

$$\%eff = \frac{C_o - C_f}{C_o} \times 100 \quad (1)$$

Donde C_f representa la concentración de Pb final o después del tratamiento, y C_o la concentración de Pb inicial o antes del tratamiento.



Tabla 1

Concentraciones de plomo para cada una de las muestras por espectrofotometría de absorción atómica (AAS).

Muestra	Descripción	Concentración de plomo (ppm)
M1	Suelo caolinítico inicial	21
M2	Suelo caolinítico con 100 ppm de Pb sin ningún tratamiento	91,4
M3	Suelo caolinítico con 200 ppm de Pb sin ningún tratamiento	148,4
M4	Suelo caolinítico con 100 ppm de Pb tratado con electro-remediación	53,4
M5	Suelo caolinítico con 100 ppm de Pb tratado con electro-remediación y campo magnético	26
M6	Suelo caolinítico con 200 ppm de Pb tratado con electro-remediación y campo magnético	45,1

De los resultados de la tabla 1, se aprecia el efecto del tratamiento de electro-remediación el cual disminuye considerablemente la concentración de Pb presente en la muestra, por ejemplo, la muestra M2 reportó concentración de Pb de 91,4 ppm antes del tratamiento, y después del tratamiento con solo electro-remediación dicha concentración disminuyó a 53,4 ppm encontrándose una eficiencia del 41,6 %. Por otra parte, también se observa el efecto del campo magnético aplicado durante el proceso de electro-remediación, pues esta misma muestra M2 después de dicho tratamiento con el campo magnético reportó una concentración de 26 ppm, lográndose una eficiencia 71,5%. Por otra parte, al comparar los resultados entre las muestras M3 y M6 que corresponden a la concentración de 200 ppm, se aprecia que la eficiencia es del orden de 69,6 % mostrando una vez más el efecto del campo magnético externo aplicado durante el tratamiento del suelo caolinítico mediante electro-remediación.

Concentración de Plomo Mediante Espectroscopia UV-VIS

En esta parte se realizó el análisis de la concentración de plomo teniendo en cuenta la absorbancia medida en las muestras de suelo caolinitico.

La técnica utilizada fue Espectroscopia UV-VIS, mediante el equipo marca THERMO FISHER SCIENTIFIC modelo GENESYS 10S UV-Vis (*ver figura 7*), que dispone de una lámpara de Xenon de alta intensidad que capta datos de toda la zona Ultravioleta/Visible. La preparación de la muestra se llevó a cabo mediante procedimiento para dilución de muestras



1:2,5 (muestra de suelo - agua destilada). Todo lo anterior fue realizado en los laboratorios de Calidad Ambiental de la UFPS sede Campos Elíseos.

Figura 7

Espectrómetro ultravioleta/visible



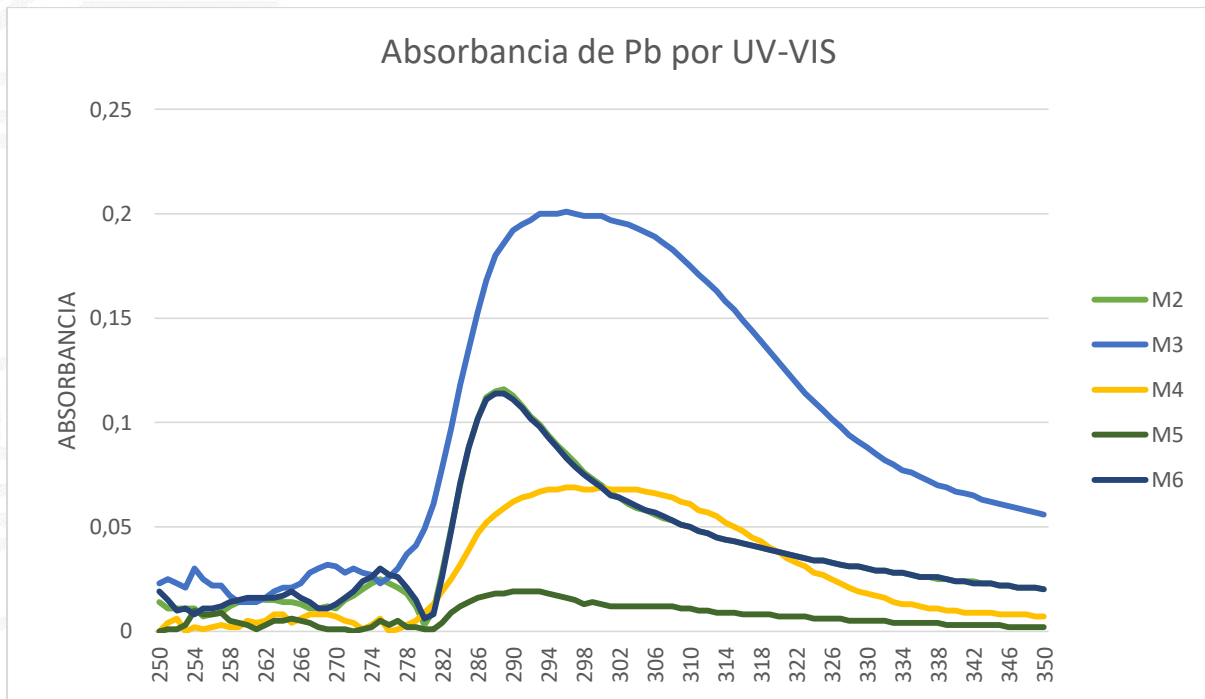
Nota. Espectrómetro GENESYS 10S UV-VIS. Fuente: laboratorio de calidad ambiental Campos Elíseos.

En la figura 8, se presenta los resultados para cada una de las muestras, en esta se puede apreciar la absorbancia que tuvo cada una de las muestras en el rango de los 250 nm hasta los 350 nm.



Figura 8

Absorbancia de las muestras por espectrofotometría ultravioleta / visible (UV - Vis)



En la tabla 2, se presentan los resultados para cada una de las muestras, en esta se puede apreciar la absorbancia máxima en las muestras iniciales contaminadas en solución a 100 ppm y 200 ppm, datos que serán utilizados para calcular las eficiencias de remoción tanto por el tratamiento de electro-remediación como electro-remediación y campo magnético, utilizando nuevamente la expresión (1).



Tabla 2

Absorbancia máxima de plomo para cada una de las muestras por espectrofotometría ultravioleta / visible (UV-Vis)

Muestra	Descripción	Absorbancia de plomo
M2	Suelo caolinítico con 100 ppm de Pb sin ningún tratamiento	0,116
M3	Suelo caolinítico con 200 ppm de Pb sin ningún tratamiento	0,201
M4	Suelo caolinítico con 100 ppm de Pb tratado con electro-remediación	0,069
M5	Suelo caolinítico con 100 ppm de Pb tratado con electro-remediación y campo magnético	0,019
M6	Suelo caolinítico con 200 ppm de Pb tratado con electro-remediación y campo magnético	0,114

De los resultados de la tabla 2, se observa el efecto del tratamiento de electro-remediación donde disminuyó la concentración de plomo en la muestra, ya que se observa que la muestra M2 señaló una absorbancia de 0,116 y cuando se trata solo con electro-remediación disminuye a 0,069 dándose una eficiencia del 40,52%. En el mismo sentido, también se advierte el efecto del campo magnético que se emplea en conjunto con el proceso de electro-remediación, puesto que para la misma muestra M2 con dicho tratamiento (electro-remediación junto con campo magnético) reporta una concentración de 0,019, obteniéndose una eficiencia del 83,62%. Ahora bien, teniendo en cuenta las muestras de 200 ppm en solución se tiene que M3 muestra una absorbancia de 0,201 y M6 de 0,114, donde se aprecia que la eficiencia es del 43,28% señalando el efecto del campo magnético.

Discusión

Al momento de realizar el proceso de electro-descontaminación en el lado del ánodo el pH no disminuyó, esto pudo haberse dado por la oxidación del alambre conductor que tiene contacto con el electrodo, aunque de igual forma esto se logró observar en otros procesos ya realizados con anterioridad, por ejemplo el realizado por Kim et al. (2005), donde el pH del suelo que estaba tratando cercano al ánodo, en el transcurso del proceso se comportó bajo, el cual después de un mes de remediación arrojó un pH alrededor de 3,5, demostrando así que el proceso de remoción se lleva a cabo en gran parte en el lado del cátodo, logrando apreciarlo



en este proyecto como y de igual forma en los diferentes procesos que se han hecho con anterioridad por otros investigadores.

Respecto a la eficiencia del tratamiento es importante recalcar la naturaleza del suelo, el cual fue llevado a estudio, siendo en este caso un tipo de suelo arcilloso por lo tanto estos ofrecen mayor superficie de contacto, por lo que los metales y sustancias iónicas pueden ser adsorbidos con mayor facilidad en sus superficies (Emenike et al., 2018). A diferencia de los suelos arenosos que debe existir un horizonte impermeable debajo del suelo contaminado, el cual impedirá que el electrolito drene a estratos más profundos para que así haya una mejor remoción (Pazos Currás et al., 2007), esto se logró evidenciar en el proceso realizado por García Hernández et al. (2011), ya que el suelo tratado fue de naturaleza arenosa evitando que el proceso se llevara a cabo de una forma más eficiente, donde al final del tratamiento arrojó que el porcentaje de remoción dio solamente un 12 % de eficiencia.

Alcivar Perez (2018), menciona en su artículo, que la distancia es la que influye en la disminución de la concentración de plomo en las muestras ya que es inversamente proporcional a mayor distancia, menor concentración de plomo en las muestras contaminadas, por lo cual al tener una distancia de 15 cm entre electrodos y una fuente constante de 40 V obtuvieron un 99,9 % de eficiencia, donde al compararlo con este proyecto se logra apreciar esto ya que al tener una distancia similar a la que ellos utilizaron y una fuente de 30 V los resultados de este proyecto también fueron satisfactorios en cuanto a la eficiencia esperada, dando fe a lo que ellos ya habían mencionado.

Cabe mencionar que en el proceso de electro-descontaminación influyen muchos factores que hacen que el porcentaje de eficiencia aumente o disminuya, entre estos puede estar el reactivo que se utilice como electrolito y también el material con el que está elaborado el electrodo, ya que esto dependerá del investigador, de cuáles son los que va a utilizar, para que sea mayor el porcentaje de remoción en el proceso a realizar.



Conclusiones

Se logra apreciar la efectividad del proceso de electro-descontaminación logrando extraer en gran proporción el plomo en cada una de las muestras, demostrando que es una tecnología que ayuda a la restauración de los suelos contaminados con metales pesados y es de fácil acceso debido al bajo costo de los reactivos utilizados.

El efecto del campo magnético externo en el proceso de electro-descontaminación genera que la eficiencia aumente en gran proporción logrando que la muestra contaminada con 100 ppm de plomo pase de un 41,6 % de eficiencia a un 71,5 %. Por lo tanto, comparada con la muestra inicial llega a un porcentaje de eficiencia del 93 % y, de igual forma con la muestra de 200 ppm el porcentaje de efectividad aumenta considerablemente. Esto se logró apreciar gracias al análisis de AAS.

De igual forma que al análisis por AAS, por medio de la espectrofotometría UV-Vis se logró apreciar un aumento en la eficiencia de la extracción del plomo en cada una de las muestras tratadas, evidenciándose el efecto del campo magnético en la electro-remediación de las muestras con plomo.

Se logra inferir que el campo magnético externo aplicado orientado con las líneas de campo en la misma dirección que las líneas de campo eléctrico producido entre los electrodos, mejora notablemente el tratamiento del suelo, permitiendo que los iones del metal pesado (Pb) migren hacia la zona donde están dirigidas dichas líneas de campo, ayudando a una mejor extracción del contaminante.



Referencias

- Alcántara, M., Gómez, J., Pazos, M., y Sanromán, M. (2011). *Electrokinetic remediation of lead and phenanthrene polluted soils*. Vigo, España: Elseiver.
- Alcivar Perez, E. (2018). *Evaluación de la técnica de electrorremediación para la recuperación de suelos contaminados con metales pesados (Cd, Ni, Pb)*. Riobamba, Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Carbonell, M., Flórez, M., Martínez, E., y Álvarez, J. (julio - diciembre de 2017). Aportaciones sobre el campo magnético: historia e influencia en sistemas biológicos. *Rev. Intropica*, 12(2), pp. 143 - 159. <http://dx.doi.org/2010.21676/23897864.2282>
- Congreso de la República de Colombia. (2015). *Proyecto de Ley n° 148*. Bogota, Colombia.
- De la Rosa Perez, D., Teutli León, M., y Ramirez Islas, M. (2007). *Electrorremediación de suelos contaminados, una revisión técnica para su aplicación en campo*. Puebla, México.
- Emenike, C., Jayanthi, B., Agamuthu, p., y Fauziah, S. (2018). Biotransformation and removal of heavy metals: a review of phytoremediation and microbial remediation assessment on contaminated soil. *Envirometal Reviews. Canadian Science Publishing*, pp. 156-168. Doi: 10.1139/er-2017-0045
- Faiqun Ni'am, M., Othman, F., Sohaili, J., y Fauzia, Z. (2006). Combined Magnetic Field and Electrocoagulation for Suspended Solid Renoval from Wastewater. *Proceedings of the 1st International Conference on Natural Resources Engineering y Technology 2006*, pp. 384-393. Putrajaya. <https://core.ac.uk/download/pdf/11777165.pdf>
- Fansheng, M., Lingli, L., Juling, W., y Yeyao, W. (2013). Effect of pH Control at the Catode for the Electrokinetic Remediation Efficiency. *Third International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications*, pp. 646-650.
- Garcia Hernández, L., Vargas Ramirez, M., y Reyes Cruz, V. (2011). *Electrorremediación de suelos arenosos contaminados por Pb, Cd y As provenientes de*. Hidalgo, México: Sociedad Mexicana de Ciencia y Tecnología de Superficies y Materiales.
- Kim, S. O., Kim, W. S., y Kim, K. W. (2005). *Evaluation of electrokinetic remediation of arsenic contaminated soils*. Environmental Geochemistry and health.



- Lenntech y Purificación del Aire Holding B.V. (2007). *Propiedades químicas del plomo- Efectos sobre la salud del plomo - efectos ambientales del plomo*. Lenntech.
- Muñoz Guerrero, M., y O'Farril Delis, G. (2018). *Pinturas del Hogar con Plomo: un riesgo silencioso para nuestros niños*. Colombia: Minsalud.
- Ng, Y., Gupta, B., y Hashim, M. (2016). Remediation of Pb/Cr co-contaminated soil using electrokinetic process and approaching electrode technique. *Environmental Science and Pollution Research*, pp. 546-555. Doi: 10.1007/s11356-015-5290-0
- OMS. (2019). *Intoxicación por Plomo y Salud*.
- OMS. (2020). *Programa Internacional de Seguridad de las Sustancias Químicas*.
https://www.who.int/ipcs/assessment/public_health/gaelp/es/
- Oyarzun, R., Higuera, P., y Lillo, J. (2011). *Minería ambiental una introducción a los impactos y su remediación*. Madrid, España: GEMM.
- Pazos Currás, M. M., Cameselle Fernandez, C., y Sanroman Braga, A. (2007). *Aplicación de técnicas electrocinéticas en el tratamiento de suelos contaminados*. Vigo. España: Universidad de Vigo.
- Roca Fernandez, A. (s.f.). *Contaminación de suelos por metales pesados*. Galicia, España: Infoagro.
- Sidoli O'Connor, C., Lepp, N. W., Edwards, R., y Sunderland, G. (2003). The Combined Use of Electrokinetic Remediation and Phytoremediation to Decontaminate Metal-Polluted Soils: A Laboratory-Scale Feasibility Study. *Environmental Monitoring and Assessment*, 84, pp. 141-158. <https://doi.org/10.1023/A:1022851501118>
- Wuana, R., y Okieimen, F. (24 de octubre de 2011). *Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation*. Hindawi: <https://www.hindawi.com/journals/isrn/2011/402647/>



CAPÍTULO VIII

Evaluación de tres variedades de arroz irradiado en Colombia sometido a estrés abiótico

Evaluation of three varieties of irradiated rice in Colombia under abiotic stress

Rodolfo Elías Arce Lozano²³
Cindy Johanna Martínez Saavedra²⁴
Luis Francisco Becerra Galindo²⁵
Jenniffer Paola Aguilera Rocha²⁶
Nixon Oscar Rodríguez Parra²⁷
Luis Armando Quevedo Cárdenas²⁸

Resumen

Las plantas han desarrollado un grupo de proteínas aportando tolerancia frente al estrés generado por la variación de temperatura. Por tal razón, el objetivo de esta investigación fue evaluar los perfiles proteicos en tres variedades de arroz (*Oryza sativa* L.) Fedearroz 473, Fedearroz Mocarí, Línea Avanzada Lv 1645 irradiadas con ⁶⁰Co en su primera generación. Para tal fin, se realizaron cultivos hidropónicos y en el estadio de plántula fueron sometidas a estrés térmico durante un día: tratamiento control a 28 °C, un tratamiento de estrés moderado a 35 °C y un tratamiento de estrés alto a 42 °C. Durante cada tratamiento se realizaron tres extracciones de proteínas totales para cada variedad en tres momentos diferentes. Se cuantificaron las proteínas totales por el método de Bradford y se realizaron geles de poliacrilamida con dodecilsulfato de sodio. Como resultados se obtuvo que los tres genotipos no presentan diferencias significativas en el crecimiento de las plántulas durante el estrés térmico, a nivel de proteínas las que presentan mayor intensidad corresponde a 50 kDa, asociadas a proteínas glutelínicas. Por otro lado, las variedades presentaron la mayor cantidad de proteínas a las 2 horas de estrés a 35 °C, pero disminuyeron al aumentar la temperatura. En conclusión, la expresión de proteínas en los tres genotipos incrementa a medida que aumenta la temperatura como mecanismo de protección de la plántula evitando que se comprometa el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo, pero esta expresión disminuye a un estrés alto debido al gasto energético de la planta en el estrés intermedio.

Palabras clave: Poliacrilamida, termotolerancia, proteómica, arroz.

²³ Biólogo. Docente investigador: Grupo BIOMA (Biotecnología y Medio Ambiente), Facultad de Ciencias, Universidad Incca de Colombia, Investigador: Grupo BiomolC, Facultad de Ciencias y Educación, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. <https://orcid.org/0000-0003-2441-5000>. rearcel@uincca.edu.co

²⁴ Licenciada en Química. Grupo BiomolC, Facultad de Ciencias y Educación, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. <https://orcid.org/0000-0003-2453-3111>. cindymartinez474@gmail.com

²⁵ Biólogo. Docente investigador: Grupo BIOMA (Biotecnología y Medio Ambiente), Facultad de Ciencias, Universidad Incca de Colombia, Investigador: Grupo BiomolC, Facultad de Ciencias y Educación, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-9093-7213>. lfbecerra@udistrital.edu.co

²⁶ Biólogo. Investigador: Grupo BiomolC, Facultad de Ciencias y Educación, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Docente investigador: Grupo BIOMA (Biotecnología y Medio Ambiente), Facultad de Ciencias, Universidad Incca de Colombia. Bogotá, Colombia. <https://orcid.org/0000-0003-0559-420X>. jpaguilera@uincca.edu.co

²⁷ Biólogo. Investigador: Grupo BiomolC, Facultad de Ciencias y Educación, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Docente investigador: Grupo BIOMA (Biotecnología y Medio Ambiente), Facultad de Ciencias, Universidad Incca de Colombia. Bogotá, Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-3613-0339>. noparrar@uincca.edu.co

²⁸ Ciencias agrarias. Grupo BiomolC, Facultad de Ciencias y Educación, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia. <https://orcid.org/0000-0003-2714-4947>. laquevedo@udistrital.edu.co



Abstract

Plants have developed a group of proteins providing tolerance to stress generated by temperature variation. For this reason, the objective of this research was to evaluate the protein profiles in three rice varieties (*Oryza sativa L.*) Fedearroz 473, Fedearroz Mocarí, Línea Avanzada Lv 1645 irradiated with ^{60}Co in their first generation. For this purpose, hydroponic cultures were carried out and at the seedling stage they were subjected to heat stress for one day: a control treatment at 28 °C, a moderate stress treatment at 35 °C and a high stress treatment at 42 °C. During each treatment, three total protein extractions were performed for each variety at three different times. Total proteins were quantified by the Bradford method and polyacrylamide gels were run with sodium dodecylsulphate. The results showed that the three genotypes did not show significant differences in the growth of the seedlings during heat stress. The highest protein intensity corresponds to 50 kDa, associated to glutelinic proteins. On the other hand, the varieties presented the highest number of proteins at 2 hours of stress at 35 °C but decreased with increasing temperature. In conclusion, the expression of proteins in the three genotypes increases as the temperature increases as a mechanism to protect the seedling from compromising the growth, development, and yield of the crop, but this expression decreases at high stress due to the energy expenditure of the plant in the intermediate stress.

Keywords: Polyacrylamide, thermotolerance, proteomics, rice.



Introducción

Las plantas en la naturaleza están constantemente expuestas a estrés abiótico o ambiental, este se define como todo factor externo que afecte negativamente el crecimiento, productividad y capacidad reproductiva o de supervivencia de las plantas (Chandel et al., 2013; Prado et al., 2010; Taiz y Ziger, 2006). Durante los últimos siglos se ha observado una serie de cambios en las condiciones climáticas generales del planeta, este fenómeno denominado "cambio climático global" ha sido de gran importancia en estudios en el aumento en la temperatura del planeta, Osborn, et al., (2021) reportan que la temperatura media del planeta ha aumentado aproximadamente 1,18 °C. Según el Informe sobre la Brecha de Emisiones 2021 de la ONU Medio Ambiente el planeta asistirá a un aumento de la temperatura global de 2,7 °C aproximadamente en este siglo. Si bien, este aumento global de la temperatura afectará a todos los ecosistemas del planeta, el calentamiento global es uno de los problemas ambientales más preocupantes de este siglo, en función de sus aspectos e impactos sobre los ecosistemas, biodiversidad, recursos hídricos, procesos productivos y en proceso de desarrollo (Olmos et al., 2013). El calentamiento global ejerce un impacto considerable sobre la gran mayoría de sectores productivos. En las últimas décadas, este ha afectado más del 70 % de la superficie terrestre (IPCC, 2019) y tiene graves consecuencias biológicas (Emanuel et al., 1985; Peters y Darling, 1985; Solomon, 1986; Jurado et al., 1998; Luna et al., 2021).

Para el año 2017 la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA) reporta 434 variedades de arroz obtenidas mediante técnicas exposición a radiación gamma, para mejorar características como la calidad del grano, la altura de la planta, el potencial de rendimiento, calidad culinaria, tolerancia al frío, resistencia a *Pyricularia*, entre otros. Las principales fuentes de rayos gamma son los isótopos ^{60}Co , y ^{137}Cs , utilizados ampliamente en radiobiología (FEDEARROZ, 2010; Contreras et al., 2006). Las radiaciones provenientes de estos isótopos rompen las moléculas de agua, produciendo iones (H^+ , H^- , OH^+ , OH^-), radicales libres (H^\bullet , OH^\bullet) y peróxidos (O_2^{2-}) que atacan las moléculas de ADN y ARN, los cromosomas y las enzimas; de este modo, se presentan cambios permanentes y heredables en el genoma del tejido tratado (Contreras et al., 2006).

Durante la germinación y crecimiento de la plántula de arroz la temperatura de 45 °C provoca la aparición de punta blanca, bandas cloróticas y manchas sobre la lámina de las hojas; cuando la temperatura es de 35 °C el macollamiento es reducido. En la fase



reproductiva un estrés de alta temperatura a 38 °C o más da lugar a una reducción del número de espiguillas (Chaudhary et al., 2003). Varios estudios han mostrado que las espiguillas en anthesis que son expuestas a temperaturas superiores a 35 °C por cerca de 5 días durante la etapa de floración resultan estériles, la cual es causada por una pobre dehiscencia y una baja producción de polen, y de allí que se presenta un bajo número de granos de polen que germinan en el estigma (Yoshida 1978; FEDEARROZ 2010; Chaudhary et al., 2003). Así mismo, se ha encontrado que menos de una hora de exposición a altas temperaturas es suficiente para inducir esterilidad en arroz (Chaves y Gutiérrez, 2017). Además, la fotosíntesis en el cultivo del arroz es severamente afectada por temperaturas superiores a los 40 °C, y se encuentra relacionada directamente con el contenido de clorofila de la hoja (FEDEARROZ, 2010). Cuando se exceden los límites de temperatura óptimos se presentan alteraciones fisiológicas importantes, como desnaturalización de proteínas, alteraciones de la fluidez de membranas, inhibición en el transporte de electrones, entre otras, afectando el crecimiento, desarrollo y el rendimiento final del cultivo (FEDEARROZ, 2010; Sayed, 2003).

Con relación a las proteínas de choque térmico existen diversas investigaciones (Zou et al., 2009; Sarkar et al., 2013; Chandel et al., 2013; Xinhai et al., 2014; Zhang et al., 2015; Chong et al., 2014; Mulaudzi-Masuku et al., 2015; Company et al., 2014; Kaur et al., 2015; Meena et al., 2017) que han demostrado que los organismos vivos sintetizan un grupo de proteínas como respuesta al estrés térmico conocidas como Proteínas de Choque Térmico (HSP), que están relacionadas con la defensa frente a los efectos del estrés por alta temperatura siendo muy conservadas evolutivamente.

En los cultivos de arroz el estrés abiótico afecta la planta por dos vías, la primera perjudica directamente los procesos fisiológicos involucrados en la producción del grano, tales como crecimiento vegetativo, desarrollo de espiguillas y llenado de grano y la segunda vía afecta indirectamente los rendimientos a través de la incidencia de enfermedades e insectos fitófagos (Castro, 2010). Estudios realizados por Castilla et al., 2010 mostraron que la variedad Fedearroz 473 y Fedearroz Mocarí presentaron mayor adaptación a altas temperaturas (34 °C) en Ambalema y el Espinal, municipios del Tolima; la variedad de mayor rendimiento fue Fedearroz 473. Junto a ello, se encontró que la variedad Fedearroz Lv1645 presenta bajos rendimientos ante este tipo de estrés. A partir de esto se escogieron para esta investigación las variedades Fedearroz 473 (resistente), Fedearroz Mocarí (tolerante) y Lv 1645 (susceptible) a estrés por altas temperaturas, las cuales han sido



irradiadas con ^{60}Co con el fin de evaluar los perfiles proteicos en tres variedades de arroz (*Oryza sativa* L.) irradiadas con ^{60}Co en su primera generación.

Por tal razón, el propósito del proyecto de investigación fue evaluar el perfil proteico de plántulas de arroz sometidas a estrés por altas temperaturas en tres variedades de arroz (*Oryza Sativa* L.), Fedearroz 473, Fedearroz Mocarí, Línea Avanzada Lv 1645 irradiadas con ^{60}Co las cuales se desarrollaron en cultivo hidropónico y fueron sometidas a diferentes tratamientos en el estadio de plántula con el fin de inducir la expresión de proteínas de protección y se realizó un perfil analítico de la expresión por geles de poliacrilamida con dodecilsulfato de sodio (SDS-PAGE) para separar las proteínas expresadas durante el estrés de acuerdo a su relación carga-masa. Como resultado la expresión de proteínas en los tres genotipos incrementa a medida que aumenta la temperatura como mecanismo de protección de la plántula y la expresión de estos genes está relacionada con la tolerancia a altas temperaturas, siendo Fedearroz 473 tolerante, Mocarí resistente y Línea avanzada 1645 susceptible a altas temperaturas.

Método

Material vegetal

Para la evaluación de proteínas se utilizaron tres genotipos de *Oryza sativa* var. indica: Fedearroz 473, Fedearroz Mocarí y Línea Avanzada Lv 1645, proporcionadas por la Federación Nacional de Arroceros FEDEARROZ. Los genotipos se irradiaron en su primera generación con el isótopo de cobalto 60 (^{60}Co) y se utilizó la sexta generación para esta investigación.

Pre y germinación de material vegetal

Para la pre-germinación se modificó el protocolo reportado por Pérez-Bernal, M. et al., 2013 donde se dispusieron 30 semillas con una réplica de cada genotipo, en cajas de Petri con papel absorbente humedecido, para obtener un total de 180 individuos. Estas semillas se dispusieron en una cámara de crecimiento Fitotrón marca BINDER® a una temperatura de 28 °C y humedad relativa de 70 % durante 7 días o hasta que se evidenció el desarrollo de la radícula. Una vez pre-germinadas, cada uno de los genotipos se trasladó a placas, sobre una solución nutritiva de medio hidropónico enriquecido nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, manganeso, molibdato, boro, zinc, cobre y hierro, manteniendo el pH entre 5,60 a



6,00, y sumergiendo únicamente las radículas. Las semillas germinadas se mantuvieron con condiciones de crecimiento de 8 horas de oscuridad a una temperatura de 20 °C y 16 horas de luz a 28 °C con una humedad relativa del 70 % en condiciones controladas por cuatro semanas donde alcanzaron el estadio de plántula (Contreras et al., 2006). El material de la plántula evaluado es tejido foliar debido a que Alejos Velázquez et al., 2014 recomienda coleccionar tejido joven porque posee más células por unidad de peso que el tejido viejo; además, posee menos polisacáridos y polifenoles que pueden llegar a dificultar la extracción.

Estrés térmico

Los tres genotipos en estadio de plántula fueron sometidos a estrés térmico durante un día entre las 11:00 am y las 3:00 pm, se sometieron a tres tratamientos térmicos: control (TC), estrés moderado (T1) y estrés alto (T2) y se realizaron dos extracciones E1 a los 10 minutos y a los 240 minutos (4 horas) de iniciado el estrés térmico (*ver tabla 1*).

Tabla 1

Cronograma de extracción de proteínas totales para un día. Cada tratamiento simuló las condiciones de un día con aproximaciones a lo real, con los respectivos cambios de temperatura e intensidad lumínica en relación con el tiempo, según datos tomados en Saldaña-Tolima.

Tratamiento	Temperatura	Extracción
Control	28 °C	E1: 11:10 – E2: 3:10 – E3: 4:10
Estrés Moderado	35 °C	E1: 11:10 – E2: 3:10 – E3: 4:10
Estrés Alto	42 °C	E1: 11:10 – E2: 3:10 – E3: 4:10

Extracción de proteínas totales.

Se extrajeron proteínas totales de cada uno de los genotipos durante cada tratamiento, para ello se tomaron 0,5 g de tejido vegetal y se realizó la lisis celular con nitrógeno líquido, posteriormente se adicionó buffer de glicina (glicina, 2-mercaptoetanol, glicerol, NaOH) a 4 °C para la extracción de proteínas, se homogeneizó y se incubó durante 1 hora a 4 °C, luego se centrifugó a 4 °C durante 30 minutos con 14 000 rpm, finalmente se separó el sobrenadante y se almacenó a 4 °C. La extracción de proteínas totales se realizó entre las



11:10 am hasta las 4:10 pm, por lo cual se obtuvieron 3 muestras de proteínas totales para cada tratamiento y genotipo (Correa et al., 2017).

Cuantificación de Proteína Total

La cuantificación de proteínas totales se hizo por el método de Bradford, utilizando como patrón Albumina Sérica Bovina (BSA). Para la cuantificación por Bradford se realizó una curva patrón a partir de Albúmina sérica bovina (BSA), la curva y las muestras se prepararon de acuerdo con la tabla 2, una vez preparados los patrones, se dejó a temperatura ambiente y se midió la absorbancia a 595 nm frente al blanco, el color es estable 1 hora (Correa et al., 2017).

Tabla 2

Concentraciones para la preparación de la curva de calibración con BSA y las muestras.

	Buffer Glicina	Blanco	Patrón 20 mg/dL	Patrón 40 mg/dL	Patrón 60 mg/dL	Patrón 80 mg/dL	Patrón 100 mg/dL	Patrón 120 mg/dL	Muestra
Agua	100 µL	100 µL	840 µL	670 µL	500 µL	340 µL	170 µL	0 µL	
Patrón 120 mg/dL			160 µL	330 µL	500 µL	660 µL	830 µL	100 µL	
Muestra Reactivo Bradford	1 mL	1 mL	1 mL	1 mL	1 mL	1 mL	1 mL	1 mL	100 µL 1 mL

SDS-PAGE

Para observar el perfil electroforético en cada uno de los tratamientos en las tres variedades, se usaron geles de poliacrilamida usando como desnaturizante sodiododecilsulfato (SDS); dichos geles fueron preparados a una concentración de 12,5 % con la finalidad de separar proteínas con peso molecular de un rango de 10 a 200 kDa (Colás y Yenush, 2021). Se utilizó el marcador de peso molecular Dual Color Standards de Bio-Rad #1610374, que presenta un rango de 10 a 250 kDa. Para la visualización del gel se utilizó la tinción con azul de Coomassie (Aminiam et al., 2013).

Análisis

Se realizó una cuantificación de proteínas totales, haciendo uso del método colorimétrico de Bradford. Con los datos obtenidos se procedió a realizar una regresión lineal, donde se representa la curva estándar realizada a partir de 6 soluciones, presentando un



coeficiente de correlación con un R^2 de 0,997 1 acercándose al 1, de acuerdo con los datos obtenidos en la cuantificación por el método de Bradford, se normalizaron las diferentes muestras a 25 mg/dL para poder comparar las bandas proteicas entre las variedades en cada uno de los tratamientos (Likittrakulwong et al., 2021).

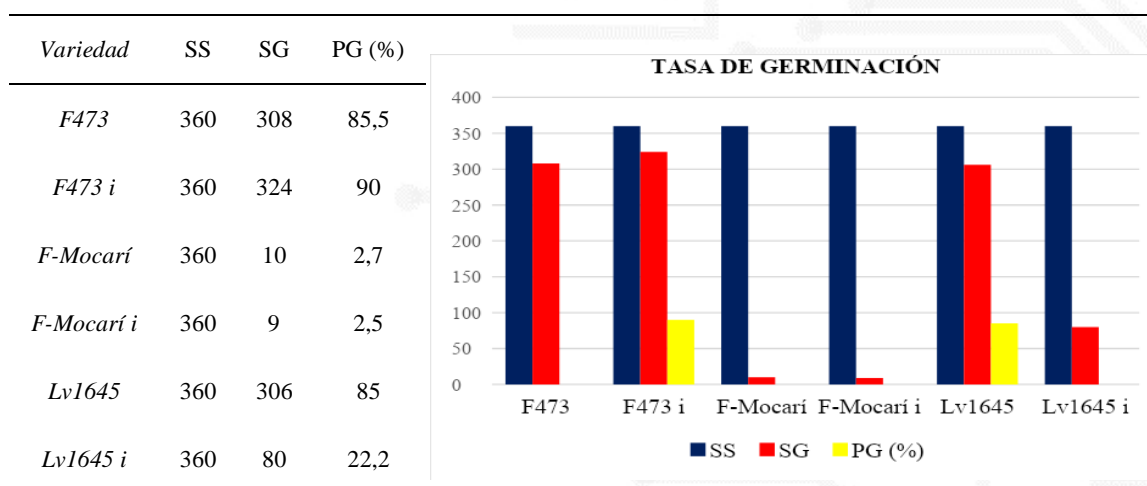
Resultados

Tasa de germinación

Para la finalidad del trabajo las semillas se dejaron en agua durante 2 días, y no se sometieron a tratamiento térmico ni químico debido a que se estaría induciendo un estrés a la semilla desde su germinación. Los porcentajes de germinación (Figura 1) de cada genotipo tuvieron una variación importante siendo la variedad Fedearroz 473 Irradiada la que presentó mayor porcentaje con un 90 %, seguida de Fedearroz 473 sin irradiar y Línea avanzada 1645 con un 85,5 % y 85 % respectivamente. Las variedades Mocarí y Mocarí irradiada tienen la menor tasa de germinación con 2,7 % y 2,5 % respectivamente.

Figura 1

Porcentaje de germinación de las tres variedades de arroz



Nota. F (Fedearroz), Lv (Línea Avanzada), i (Irradiadas), SS (Semillas sembradas), SG (Semillas Germinadas), PG (Porcentaje de germinación).

Las características fenotípicas evaluadas durante los tratamientos en las tres extracciones de proteínas no presentaron diferencias en cuanto a la altura de la planta, Mocarí y Lv1645 irradiadas y control fueron más altas que F473 irradiada y control con una diferencia entre ± 1 y 2 cm.

En el tratamiento control (TC) a 28 °C durante las cuatro horas no se observaron alteraciones a nivel morfológico con relación al color de la hoja y el tamaño. En las variedades de Mocarí y Lv1645 irradiadas se evidenció despigmentación en las hojas, Mocarí irradiada (*ver tabla 3 fotografía b*) durante todo el proceso de crecimiento presentó despigmentación a lo largo de la lámina de la hoja y Lv1645 irradiada (*ver tabla 3 fotografía c*) presenta necrosis apical y líneas blancas longitudinales.

Durante el tratamiento 1 (T1) a 35 °C no se presentaron cambios a nivel morfológico en cada una de las variedades; transcurridas dos horas de estrés del mismo tratamiento se observó en F473 algunas de las hojas laterales comenzaron a presentar necrosis la cual aumentó a las 4 horas del estrés (*ver tabla 3 fotografía d*); en la variedad Mocarí las hojas laterales presentaron necrosis apical y deshidratación, tomando una apariencia sin rigidez y seca lo cual aumentó al prolongar el estrés (Tabla 3 fotografía e), por último, Lv 1645 presentó necrosis apical en mayor proporción que las otras variedades, el cual aumentó a las 4 horas de tratamiento (*ver tabla 3 fotografía f*).

En el tratamiento (T2) a los 42 °C no se observan cambios morfológicos considerables en F473 y Lv 1645 al comienzo del estrés, por otro lado, la variedad Mocarí las hojas laterales se doblan y tomaron una coloración naranja en la punta de la hoja. A las dos horas de estrés en la variedad F473 se evidenció necrosis apical y las hojas laterales se comienzan a quemar; prolongado el estrés a las 4 horas las plantas generan mayor quema de las hojas laterales (*ver tabla 3 fotografía g*); en Lv 1645 se evidenció necrosis apical a mayor proporción y manchas en las hojas producto de la temperatura. Al finalizar el tratamiento, no varía de manera relevante las condiciones de cada una de las variedades de estudio (*ver tabla 3 fotografía i*). Las hojas de Mocarí presentan una deshidratación significativa al punto de necrosis foliar y a las 4 horas de estrés las hojas laterales se quemaron en su totalidad (*ver tabla 3 fotografía h*).

Las mediciones de las características morfológicas de la hoja bandera, órgano vegetativo del cual se extrajo proteínas, se midieron en el momento de finalizado el estrés para cada extracción. De acuerdo con las mediciones realizadas (*ver figura 2*), no se

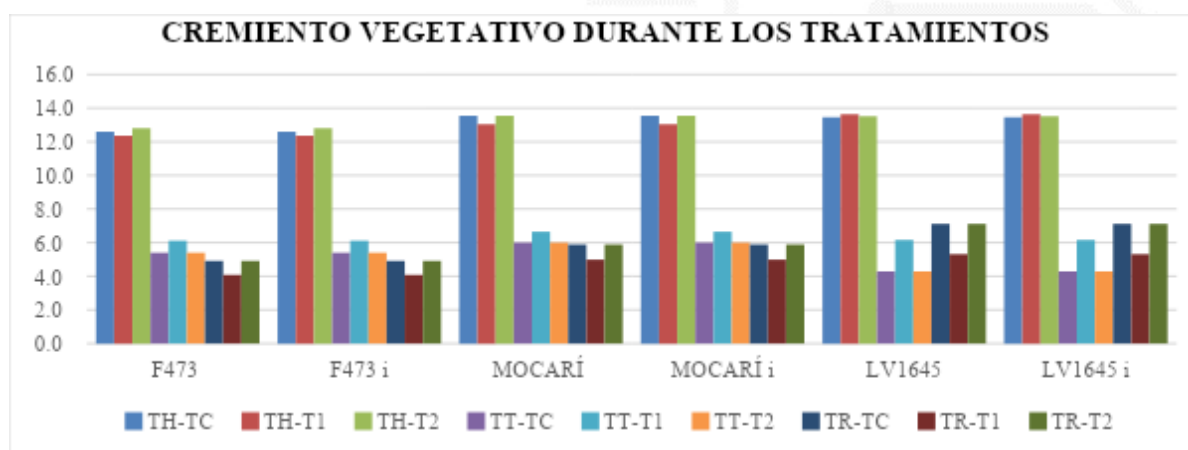


observaron diferencias entre los tamaños de las hojas de las plántulas irradiadas, con relación a las no irradiadas las variedades no presentan cambios en el crecimiento, estas están en un rango de 12 a 14 cm de largo, lo que permite inferir que el tiempo de estrés (4 horas) al que fueron sometidas las plantas no influyó en el tamaño de estas. Además, Fedearroz es una planta de porte bajo en comparación con las otras dos, durante todos los tratamientos es la que menor tamaño presenta siendo este entre 11,5 y 13,2 cm; Mocarí y Lv1645 oscilan entre 12,7 y 14 cm, cerca de 2 cm por encima del tamaño de F473.

De igual manera, se realizó la medición en cm (*ver figura 2*) del tallo y la raíz de las tres variedades, con el fin de determinar si el estrés por altas temperaturas infería en el crecimiento de estos órganos vegetativos, dio como resultados que ninguno de las tres temperaturas infiere en el desarrollo del órgano vegetativo o genera cambios en estos en las cuatro horas de estrés. Por otro lado, al compararlas plántulas irradiadas con ⁶⁰Co y sin irradiar no se presentan diferencias en los hábitos de crecimiento de estos órganos vegetativos.

Figura 2










Comparación de los hábitos de crecimiento en diferentes órganos vegetativos entre las variedades sin irradiadas y sin irradiar



Nota. TH - Tamaño de la Hoja. TT- Tamaño del Tallo. TR – Tamaño de la Raiz. TC- Tratamiento Control. T1 – Tratamiento 1. T2 – Tratamiento 2.

Tabla 3

Fotografías de las tres variedades a las cuatro horas de estrés por cada tratamiento.

		VARIEDAD		
		F473 irradiada	Mocarí irradiada	Lv1645 irradiada
TRATAMIENTO	TC			
		a.	b.	c.
	T1			
	d.	e.	f.	
T2				
	g.	h.	i.	

Nota. (a) Fedearroz 473 a las 4 horas de estar a 28 °C. (b) Fedearroz Mocarí a las 4 horas de estar a 28 °C, se muestra la despigmentación de la hoja (mácula). (c) Línea avanzada lv1645 a las 4 horas de estar a 28 °C, se muestra línea longitudinal blanca (estriata). (d) Fedearroz 473 a las 4 horas de estar a 35 °C. (e) Fedearroz Mocarí a las 4 horas de estar a 35 °C. (f) Línea avanzada lv1645 a las 4 horas de estar a 35 °C. (g) Fedearroz 473 a las 4 horas de estar a 42 °C. (h) Fedearroz Mocarí a las 4 horas de estar a 42 °C. (i) Línea avanzada lv1645 a las 4 horas de estar a 42 °C.

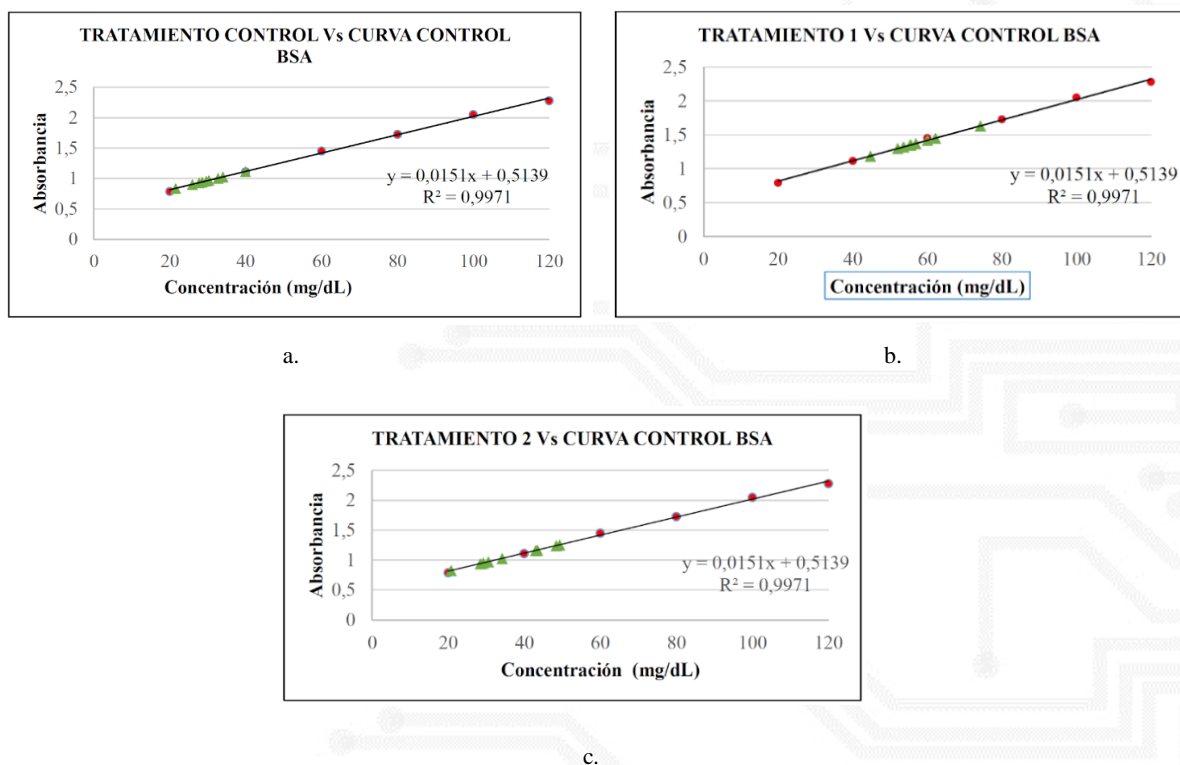


Análisis Proteico

Se contrastaron los valores obtenidos de proteínas totales en el tratamiento control en la curva patrón (ver figura 3-a). Todos los valores se ajustaron a la curva, presentando una concentración entre 20 y 40 mg/dL. Se cuantificó el contenido de proteínas totales en cada muestra para el T1 (ver figura 3-b), de acuerdo con los datos obtenidos las muestras en este tratamiento tienen una concentración entre 40 y 70 mg/dL, siendo F473 la de menos valor con 44,76 mg/dL y Lv 1645 la de mayor concentración con 74,22 mg/dL. Para el T2, las muestras disminuyeron su concentración con respecto al T1, acercando algunas de las muestras a los valores obtenidos en el TC (ver figura 3-c). El rango de concentración está entre 20 y 50 mg/dL. Mocarí a 42 °C es la variedad que presentó el menor y mayor valor, siendo de 20,80 mg/dL y 49,33 mg/dL.

Figura 3

Valores de la extracción de proteínas de cada tratamiento relacionado con la curva estándar.



Nota. mg: miligramo; dL: decilitro; R^2 : Coeficiente de determinación.

En la figura 4a se presenta el perfil proteico para el tratamiento control, de las variedades Fedearroz 473, Mocarí y Línea avanzada 1645 en los tres momentos de extracción. En las tres variedades se evidencia una alta concentración de proteínas con un peso molecular de 50 kDa; las tres variedades presentan un perfil similar, pero con diferencias en la intensidad en cada una de las bandas, siendo Mocarí la que menor cantidad de proteínas presentó con respecto a F473 y Lv1645. En las tres variedades se logra percibir 2 bandas entre 25 y 27 kDa. La variedad F473 presenta mayor intensidad en las bandas en la extracción 2 y 3 es decir a la 1:10 pm y 3:10 pm. Por otro lado, Mocarí presentó menor cantidad de proteínas en la última extracción; a diferencia de Lv1645 que presenta una intensidad similar en los diferentes momentos de extracción.

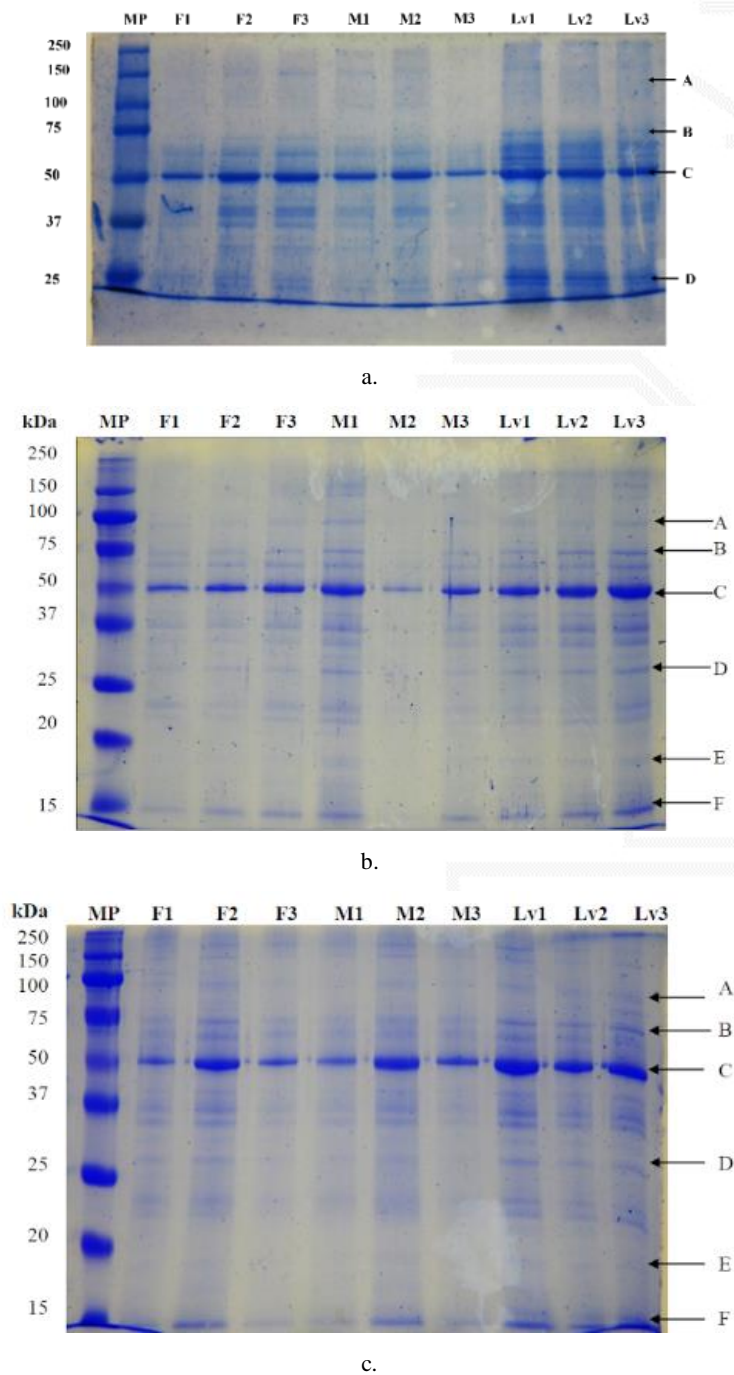
Se realizó un perfil proteico de las tres variedades para el tratamiento 1 (T1:35 °C) (Figura 4b), al igual que en el Tratamiento control, en el tratamiento 1 se presenta una fuerte concentración de proteínas con un peso molecular de 50 kD (C). Las variedades F473, Mocarí, Lv 1645 presentan un perfil proteico similar, la intensidad de las bandas cambia de una variedad a otra y de los momentos de extracción. Se logra observar bandas cercanas a 90 kDa, (A) 75 kDa (B), 26 kDa (D) y 18 kDa (E) y 16 kDa (F), que pueden estar relacionadas con los pesos moleculares de las proteínas de interés.

Se realizó un perfil proteico para el tratamiento 2 (T2: 42 °C) para las tres variedades (Figura 4c), F473, Mocarí y Lv1645 presentan un perfil proteico similar, junto a ello tienen el mismo patrón que el Tratamiento 1, pero con una intensidad mayor en cada una de las bandas. Al igual que en el TC y T1, T2 presenta la banda característica de 50 kDa (C) Lv 1645 es la variedad que presenta mayor intensidad, seguido de F473 y siendo Mocarí la que menor visibilidad presenta. En las tres variedades se logran apreciar las bandas de interés, siendo de 90 kDa (A), 70 kDa (B), 26 kDa (D), 18 kDa (E) y 16 kDa (F). La variedad F473 y Mocarí presentan la mayor cantidad de proteínas en la extracción 2, al contrario de Lv 1645 que presenta una cantidad similar en las tres extracciones.



Figura 4

Visualización de los geles de poliacrilamida SDS-PAGE con tinción azul de Comassie.



Nota. TH - Tamaño de la Hoja. TT- Tamaño del Tallo. TR – Tamaño de la Raiz. TC- Tratamiento Control. T1 – Tratamiento 1. T2 – Tratamiento 2.



Discusión

El aumento de temperatura en el planeta en los últimos años ha afectado directamente la productividad de la agricultura, principalmente del arroz. El estrés que sufre las plantas por aumento en la temperatura está relacionado con la tolerancia al mismo, siendo esta la capacidad que tienen las plantas para hacer frente a las condiciones desfavorables, aumentando la producción de proteínas para su protección que están relacionados con el crecimiento y rendimiento (Prado et al., 2010; Taiz y Ziger, 2006). Es claro que los cultivos de arroz expuesto a estrés por altas temperaturas afectan la planta perjudicando directamente los procesos fisiológicos, tales como crecimiento vegetativo, desarrollo de espiguillas y llenado de grano y afecta indirectamente los rendimientos a través de la incidencia de enfermedades e insectos fitófagos (Castro, 2010; Reynolds et al. 2010; Bheemanahalli et al. 2017 citados en López et al., 2018).

La evaluación de los porcentajes de germinación por semillas para cada genotipo en la variedad dio como resultados que la variedad Fedearroz 473 irradiada fue de un 90 %, seguida de Fedearroz 473 y Línea Avanzada 1645 sin irradiar con un 85,5 % y 85 % respectivamente. Mocarí y Mocarí Irradiada tienen la menor tasa de germinación con 2,7 % y 2,5 %. Las semillas de Mocarí y Mocarí irradiada estuvieron durante cinco años en el banco de semillas de Saldaña – Tolima, y esto puede afectar la calidad de la semilla si las condiciones de almacenamiento no son las adecuadas. No obstante, la latencia puede ser generada por procesos metabólicos lentos, originados por una baja humedad o alteración de la temperatura interna necesaria para el desarrollo óptimo de los procesos fisiológicos, o por presencia de sustancias inhibitoras en la envoltura de la semilla como compuestos fenólicos (Willan, 1991; Wei et al., 2013 citados en Xu et al., 2021). Con el fin de tener una buena tasa de germinación de arroz se deben tener en cuenta diferentes variables, para romper latencia de semillas se recomienda realizar diferentes procesos, por ejemplo, dejar las semillas durante una hora en agua, someterlas a temperatura de 45 °C a 50 °C por cinco días o sumergirlas en ácido nítrico (Willan, 1991; Jagadish et al., 2015).

Las características fenotípicas evaluadas durante los tratamientos en las tres extracciones de proteínas no presentaron diferencias en cuanto a la altura de la planta, pero Mocarí y Lv1645 irradiadas y control fueron más altas que F473 irradiada y control puesto que esta última es una variedad que se caracteriza por presentar porte bajo (Castilla et al., 2010; Garces G. y Castilla L. 2015). En el TC no se observaron alteraciones a nivel



morfológico, debido a que esta temperatura es la apropiada para el crecimiento normal de la planta. En las variedades de Mocarí y Lv1645 irradiadas se evidenció despigmentación en las hojas, Mocarí irradiada durante todo el proceso de crecimiento presentó despigmentación a lo largo de la lámina de la hoja lo que se conoce como mácula y Lv1645 irradiada presentó despigmentación en las puntas de las hojas, y líneas blancas longitudinales conocido como estriata (Contreras et al., 2006).

Durante el T1 no se presentaron cambios a nivel morfológico; transcurridas dos horas de estrés se observó necrosis apical en F473 la cual aumentó a las 4 horas de estrés; en la variedad Mocarí las hojas laterales presentaron necrosis apical, tomando una apariencia sin rigidez y seca lo cual aumentó al prolongar el estrés, por último, Lv 1645 presentó necrosis apical en mayor proporción que las otras variedades, el cual aumentó a las 4 horas de tratamiento. En el T2 no se observan cambios morfológicos considerables en F473 y Lv 1645 al comienzo del estrés, por otro lado, la variedad Mocarí las hojas laterales presentaron necrosis de manera considerable, a las dos horas de estrés la variedad F473 evidenció necrosis apical junto a ello las hojas laterales se comienzan a quemar como mecanismo de protección de la hoja bandera en mayor cantidad, a las 4 horas de estrés las plantas generan mayor necrosis en las hojas laterales, en Lv 1645 presenta necrosis apical en mayor cantidad, y manchas en las hojas producto de la alta temperatura. Al finalizar el tratamiento no varía de manera relevante las condiciones de cada una de las variedades de estudio. Las hojas de Mocarí presentan una deshidratación significativa al punto de necrosis foliar y a las 4 horas de estrés las hojas laterales se quemaron en su totalidad (Contreras et al., 2006; Garces y Castilla, 2015).

El estrés que sufre la planta está relacionado con la tolerancia al mismo, siendo esta la capacidad que tiene la planta para hacer frente a las condiciones desfavorables y se mide mediante el rendimiento del cultivo, el crecimiento, o los procesos de asimilación primaria (incorporación de CO₂ y minerales) que están relacionados con el crecimiento (Prado et al., 2010; Taiz y Ziger, 2006). Gran cantidad de proteínas se acumulan rápidamente en las células de las plantas cuando son sometidas a altas temperaturas y la eliminación de proteínas para la recuperación de la misma se reduce (Puig et al., 2021). En las tres variedades evaluadas se logran apreciar las bandas de 90 kDa, 70 kDa, 26 kDa, 18 kDa y 16 kDa. La variedad F473 y Mocarí presentan la mayor cantidad de proteínas, al contrario de Lv 1645 que presenta una cantidad similar en las tres extracciones asociadas a las variaciones en los patrones de producción de las HSPs; por ejemplo, cuando plántulas de maíz, trigo y centeno fueron



expuestas a estrés por calor (42 °C), en maíz se produjeron cinco tipos de smHSPs mitocondriales (19, 20, 22, 23 y 28 kDa), mientras que en trigo y centeno solo un tipo (20 kDa), lo que fue asociado a la mayor tolerancia mostrada por el maíz (Wahid et al., 2007), por lo que las variedades al ser sometidas al estrés presentan una respuesta a la termotolerancia.

En los tres tratamientos se observa que la banda de mayor intensidad corresponde a 50 kDa con relación al marcador de peso, siendo está correspondiente a proteínas glutelínicas que constituyen entre el 70 y 90 % de proteínas totales en arroz. Actualmente se han identificado seis genes que las codifican y permiten establecer una clasificación en dos subfamilias: GluA y GluB de acuerdo con la secuencia de nucleótidos que generan. Estas diferencias se trasladan a sus propiedades nutricionales ya que GluB contiene mayor cantidad del aminoácido esencial lisina y a sus propiedades estructurales ya que presentan diferencias en su grado de polimerización (Pincioli, 2010; Puig et al., 2021).

Conclusiones

En conclusión, los tres genotipos F473, Mocarí Lv 1645 no presentan diferencias significativas en el crecimiento de las plántulas durante las cuatro horas de exposición al estrés térmico por altas temperaturas (28, 35 y 42 °C). De igual manera, se generan alteraciones físicas en las variedades Mocarí y Lv 1645, en la primera se produce despigmentación conocido como maculata y en la segunda se originan líneas blancas longitudinales y despigmentación en las puntas de las hojas conocido como estriata.

Las variedades F473, Mocarí, Lv 1645 presentan un perfil proteico donde se puede correlacionar el cambio en la posición de las bandas de una variedad a otra en cada uno de los momentos de la extracción. Se logra observar bandas cercanas a 90 kDa, 75 kDa, 26 kDa y 18 kDa y 16 kDa, que pueden estar relacionadas con los pesos moleculares de las Proteínas de Choque Térmico (HSP).

La variedad que presenta mayor expresión de proteínas es Lv1645 seguida de MOCARÍ y por último F473. La expresión de proteínas en los tres genotipos incrementa a medida que aumenta la temperatura como mecanismo de protección de la plántula frente alteraciones que se puedan originar a nivel bioquímico, fisiológico y morfológico evitando que comprometan el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo, pero esta expresión



disminuye a un estrés alto debido a el gasto energético de la planta en el estrés intermedio, evitando que comprometan el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo.

Agradecimientos

El presente trabajo fue apoyado por la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA) bajo el proyecto *Internacional arcal fase II improvement of yield and commercial potential of crops of economic importance of latinoamerica col 5023-col 5024 cooperación técnica AIA mutagénesis y biotecnología aplicada al mejoramiento del arroz.*



Referencias bibliográficas

- Aminian, M., Nabatchian, F., Vaisi-Raygani, A., y Torabi, M. (2013). Mechanism of coomassie brilliant blue G-250 binding to cetyltrimethylammonium bromide: an interference with the Bradford assay. *Analytical Biochemistry*, 434, pp. 287-291. <https://DOI:10.1016/j.ab.2012.11.014>
- Castilla, L., Pineda, D., Ospina, J., Echeverry, J., Perafan, R., Garces, G., Sierra, J., y Díaz, A. (2010). Cambio climático y producción de arroz. *Revista FEDEARROZ, fondo nacional del arroz-Tolima*, 58(489). ISSN 120-1441. https://fedearroz.com.co/documents/205/Revista_489.pdf
- Castro, E. (2010). Selección de la variedad, factor clave en el sector arrocero. *Revista Arroz-Fedearroz*, 52, pp. 14-21. ISSN 120-1441. https://fedearroz.com.co/documents/201/REVISTA_486.pdf
- Chandel, G., Dubey, M. y Meena, R. (2013). Differential expression of heat shock proteins and heat stress transcription factor genes in rice exposed to different levels of heat stress. *J. Plant Biochem. Biotechnol.* 22, pp. 277–285. <https://doi.org/10.1007/s13562-012-0156-8>.
- Chaudhary, R., Nanda, J., y Tran, D. (2003). Guía para Identificar las Limitaciones de Campo en la Producción de Arroz. Comisión Internacional del Arroz Organización De Las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Roma. Vol 1. pp. 19-62. ISBN 92-5-304684-8. <https://www.fao.org/3/y2778s/y2778s00.htm>
- Chaves, N., y Gutiérrez, M. (2017). Respuestas al Estrés por Calor en los Cultivos. I. Aspectos Moleculares, Bioquímicos y Fisiológicos. *Agron. Mesoam*, 28(1), pp. 237-253. <https://doi:10.15517/am.v28i1.21903>
- Chong, L., Wang, Y., Gad, N., Anderson, N., Shah, B., y Zhao, R. (2014). A highly charged region in the middle domain of plant endoplasmic reticulum (ER)-localized heat-shock protein 90 is required for resistance to tunicamycin or high calcium-induced ER stresses. *J of Exp Bot*, 66(1), pp.113–124. <http://doi.org/10.1093/jxb/eru403>
- Colás, N., y Yenush, L. (2021). *Electroforesis en gel de poliacrilamida*. <http://hdl.handle.net/10251/167244>



- Company, N., Nadal, A., Ruiz, C., y Pla, M. (2014). Production of Phytotoxic Cationic α -Helical Antimicrobial Peptides in Plant Cells Using Inducible Promoters. *PLoS One*, 9(11), e109990. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0109990>
- Contreras, A., Quevedo, L., y Caro, Y. (2006). *Guía para la inducción de mutagenesis en el mejoramiento genético del arroz (Oryza sativa L.)*. (1ª ed.). Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Emanuel, W., Shugart, H., y Stevenson, M. (1985). Climatic change and the broad-scale distribution of terrestrial ecosystem complexes. *Climatic Change*, 7(1), pp. 29–43. <https://doi.org/10.1007/BF00139439>.
- FEDEARROZ, (2010). Manejo integrado del cultivo de arroz. (1 ed.). PRODUMDIOS.
- Garcés, G., y Castilla, L. (2015). Uso del clorofilometro (índice de verdor) como estrategia en la fertilización nitrogenada en el cultivo de arroz. *Revista Arroz*, 63(517), pp. 38-43. ISSN 0120-1441. https://fedearroz.com.co/documents/246/Revista_517_F4dAKTE.pdf
- Hartree, E. (1972). Determination of protein: a modification of the Lowry method that gives a linear photometric response. *Anal Biochem*, 48(2), pp. 422-437.
- IAEA, (2017): Informe Anual del OIEA de 2017. Composición de la Junta de Gobernadores (2017-2018). Informe abarca el período comprendido entre el 1 de enero y el 31 de diciembre de 2017. En prensa: https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/reports/2017/gc62-3_sp.pdf
- IPCC, (2019). Resumen para responsables de políticas. En: *El cambio climático y la tierra: Informe especial del IPCC sobre el cambio climático, la desertificación, la degradación de las tierras, la gestión sostenible de las tierras, la seguridad alimentaria y los flujos de gases de efecto invernadero en los ecosistemas terrestres*. ISBN: 978-92-9169-354-2.
- Jagadish SVK, Murty MVR, Quick WP (2015) Rice response to rising temperatures? challenges, perspectives and future directions. *Plant, Cell and Environment*, 38, pp. 1686-1698. <https://doi.org/10.1111/pce.12430>
- Jurado, E., Jiménez, J., y Treviño, E. (1998). Biodiversidad en peligro. *CIENCIA UANL*, 1, pp. 43–47.



- Kaur, H., Petla, B., Kamble, N., Singh, A., Rao, V., Salvi, P., y Majee, M. (2015). Differentially expressed seed aging responsive heat shock protein OsHSP18.2 implicates in seed vigor, longevity and improves germination and seedling establishment under abiotic stress. *Front in Plant Sci*, 14(6). <http://doi.org/10.3389/fpls.2015.00713>
- López-Hernández, M., López-Castañeda, C., Kohashi-Shibata, J. K.-S., Miranda-Colín, S., Barrios-Gómez, E., y Martínez-Rueda, C. (2018). Tolerancia a sequía y calor en arroz (*Oryza sativa*). *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 5(15), pp. 373-385. <https://doi.org/10.19136/era.a5n15.1558>
- Luna, D., Torres, C., Gómez, L., Moreno, H., y Sánchez, A. (2021). Intensidad de Emisiones por Unidad de Producto para la Producción de Arroz en Colombia: Boletín técnico: N° 4 – Junio. Grupo Cambio Global – Subdirección de estudios Ambientales-IDEAM.
- Meena, K., Sorty, A., Bitla, U., Choudhary, K., Gupta, P., Pareek, A., Singh, D., Prabha, R., Sahu, P., Gupta, V., Singh, H., Krishanani, K., y Minhas, P. (2017). Abiotic Stress Responses and Microbe-Mediated Mitigation in Plants: The Omics Strategies. *Front. Plant Sci*, 8(172). <http://doi.org/10.3389/fpls.2017.00172>
- Mulaudzi-Masuku, T., Mutepe, R., Mukhoru, C., Faro, A. y Ndimba, B. (2015). Identification and characterization of a heat-inducible Hsp70 gene from *Sorghum bicolor* which confers tolerance to thermal stress. *Cell Stress y Chaperones*, 20(5), pp. 793–804. <http://doi.org/10.1007/s12192-015-0591-2>
- Navarro, Y., Salazar, L., Giraldo, J., González, J., y Osorio, J. (2017). Optimización del protocolo para la extracción y la cuantificación de proteínas totales en semillas germinadas de maíz (*Zea mays* L.). *Revista Facultad De Ciencias Básicas*, 13(1), pp. 65-68. <https://doi.org/10.18359/rfcb.2756>.
- Olmos, E., González, M., y Contreras, M. (2013). Percepción de la población frente al cambio climático en áreas naturales protegidas de Baja California Sur, México. *Polis (Santiago)*, 12(35), pp. 459-481. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-65682013000200020>
- Osborn, T., Jones, P., Lister, D., Morice, C., Simpson, I., Winn, J., Hogan, E., y Harris, I. (2021). Variaciones de la temperatura del aire en la superficie terrestre en todo el



- mundo actualizadas a 2019: CRUTEM5 conjunto de datos Revista de Investigación Geofísica. *Atmósferas*, 126, e2019JD032352. <https://doi.org/10.1029/2019JD032352>
- Pérez-Bernal, M., Lorenzo Salinas, D., y Delgado Rigo, M. (2013). Viabilidad de semillas de arroz provenientes de plantas obtenidas in vitro. *Acta Agronómica*, 62(2), pp. 114-119. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-28122013000200004&lng=en&lng=es.
- Peters, R., y Darling, J. (1985). The greenhouse effect and nature reserves. Global warming would diminish biological diversity by causing extinctions among reserve species. *BioScience*. <https://doi.org/10.2307/1310052>
- Pincioli, M. (2010). PROTEÍNAS DE ARROZ Propiedades estructurales y funcionales. CIDCA.
- Prado, F., Rosa, M., y Hilal, M. (2010). Las especies C4 y el estrés ambiental. En: C4 y CAM. Características generales y uso en programas de desarrollo de tierras áridas y semiáridas. Homenaje al Dr. Julio López Gorgé. Madrid; Consejo Superior de Investigaciones Científicas: Fundación Ramón Areces, pp. 31-39. ISBN: 978-84-00-09213-9.
- Puig, M., Rodríguez, A., Vidal, A., Bezus, R., y Maiale, S. (2021). Patterns of physiological parameters and nitrogen partitioning in flag leaf explain differential grain protein content in rice. *Plant Physiology and Biochemistry*, 168, pp. 457-464, ISSN 0981-9428, <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.10.034>.
- Sarkar, N., Kundnani, P., y Grover, A. (2013). Functional analysis of Hsp70 superfamily proteins of rice (*Oryza sativa*). *Cell Stress and Chaperones*, 18, pp. 427-437. <https://doi.org/10.1007/s12192-012-0395-6>
- Sayed, O. (2003). Chlorophyll Fluorescence as a Tool in Cereal Crop Research. *Photosynthetica*, 41, pp. 321-330. <https://doi.org/10.1023/B:PHOT.0000015454.36367.e2>
- Solomon, A. (1986). Transient response of forests to CO₂-induced climate change: simulation modeling experiments in eastern North America. *Oecologia*. <https://doi.org/10.1007/BF00378773>



- Taiz, L., y Ziger, E. (2006). Fisiología vegetal. (3 ed). *Castellon de la plana: Publicacions de la Universitat Jaume I, D. L.* ISBN 978-84-8021-601.
- Wahid, A., Gelani, S., Ashraf, M., y Foolad, M. (2007). Heat tolerance in plants: An overview. *Environmental and Experimental Botany*, 61(3), pp. 199-223.
<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2007.05.011>
- Wei, H., Liu, J., Wang, Y., Huang, N., Zhang, X., Wang, L., Zhang, J., Tu, J., y Zhong, X. (2013). A dominant major locus in chromosome 9 of rice (*Oryza sativa* L.) confers tolerance to 48°C high temperature at seedling stage. *J Hered*, 104(2), pp. 287-94. doi: 10.1093/jhered/ess103. Epub 2012 Dec 20. PMID: 23258571.
- Willan, R. (1991). Guía para la manipulación de semillas forestales con especial referencia a los trópicos. Roma, Italia: FAO.
- Xinhai, C., Shoukai, L., Qiulin, L., Jian, H., Wenfeng, Z., Jun, L., Yongfei, W., Yuqin, K., y Huaqin, H. (2014). Expression and interaction of small heat shock proteins (sHsps) in rice in response to heat stress. *Biochim. Biophys. Acta* 1844: pp. 818-828.
<https://doi.org/10.1016/j.bbapap.2014.02.010>.
- Xu, Y., Chu, C., y Yao, S. (2021). The impact of high-temperature stress on rice: Challenges and solutions. *The Crop Journal*, 9(5), pp. 963-976, ISSN 2214-5141,
<https://doi.org/10.1016/j.cj.2021.02.011>.
- Yoshida, S. (1978). Tropical Climate and it's Influence on rice. 1 ed. Manila: IRRI; pp. 6- 8. ARC: 633.18.Y65.
- Zhang, K., Ezemaduka, A., Wang, Z., Hu, H., Shi, X., Liu, C., y Yin, C. (2015). A Novel Mechanism for Small Heat Shock Proteins to Function as Molecular Chaperones. *Sci Repo*. 5:8811. <http://doi.org/10.1038/srep08811>
- Zou, J., Liu, A., Chen, X., Zhou, X., Gao, G., Wang, W., y Zhang, X. (2009). Expression analysis of nine rice heat shock protein genes under abiotic stresses and ABA treatment. *J Plant Physiol*, 166(8), pp. 851-61.
<https://doi.org/10.1016/j.jplph.2008.11.007>



Identificación de variantes genéticas en exón 27 del gen *BRCA2* en caninos con neoplasias de glándula mamaria

Identification of genetic variants in exon 27 of the BRCA2 gene in canines with mammary gland neoplasms

Amanda Margarita Hernández Segovia²⁹
 Angie I. Escobar Vargas³⁰
 Daisy A. Gómez Ruiz³¹
 Cristina Úsuga Monroy³²
 Gustavo A. Mendoza Fandiño³³
 Gloria Y. Sánchez Zapata³⁴

Resumen

El gen *BRCA2* es un gen altamente conservado en mamíferos y codifica residuos que son fosforilados para la unión con otras proteínas, entre ellos RAD51. Mutaciones del *BRCA2* se han relacionado con el desarrollo de neoplasias mamarias en caninos. La presente investigación se ocupó de identificar variantes genéticas en el exón 27 de *BRCA2*, para ello se utilizaron 75 muestras de DNA de hembras caninas colectadas en un estudio previo. Las muestras fueron divididas en diferentes grupos, en cada uno se analizó la región del exón 27 de *BRCA2* mediante PCR. Las muestras positivas fueron secuenciadas y fueron alineadas manualmente en el programa MEGA V11. Se construyó un *dataset* donde se analizaron los sitios de mutación más frecuentes para el exón 27, los electroferogramas y los cambios aminoacídicos. Al evaluar la región entre 9914 a 10 549 pb del exón 27 no se encontraron mutaciones en las posiciones: 10 180 C>T, 10 398 A>G y 10 421 A>C. Sin embargo, se encontró una inserción de AAA en la posición 10 204 en 7 caninos. Esta inserción causa la sustitución de una metionina por una isoleucina y lisina. Los caninos afectados con la mutación presentaron carcinoma mamario mixto de grado 2, con una edad superior a los 8 años y con mayor afección para la raza Pinscher. Es necesario continuar con el desarrollo y aplicación de metodologías moleculares que permitan la detección de variantes genéticas del gen *BRCA2* en los caninos con el fin fortalecer el diagnóstico temprano de neoplasias.

Palabras clave: Inserción, delección, cáncer, mutación.

²⁹ Médica Veterinaria. Grupo GINVER, Facultad de Medicina Veterinaria, Corporación Universitaria Remington. Medellín, Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-1941-2916>. amanda.hernandez.2150@miremington.edu.co

³⁰ Médica Veterinaria. Grupo GINVER, Facultad de Medicina Veterinaria, Corporación Universitaria Remington. Medellín, Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-4838-9882>. angie.escobar.4558@miremington.edu.co

³¹ Bióloga. Grupo GINVER, Facultad de Medicina Veterinaria, Corporación Universitaria Remington. Medellín, Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-5046-2989>. daisy.gomez@uniremington.edu.co

³² Zootecnista. Grupo GINVER, Facultad de Medicina Veterinaria, Corporación Universitaria Remington. Medellín, Colombia. <https://orcid.org/0000-0001-6101-2994>. cristina.usuga@uniremington.edu.co

³³ Biólogo. Fractal Labs DNA. Medellín, Colombia. <https://orcid.org/0000-0001-8259-4006>. gustavom@usc.edu.co

³⁴ Zootecnista. Grupo GINVER, Facultad de Medicina Veterinaria, Corporación Universitaria Remington. Medellín, Colombia. <https://orcid.org/0000-0001-6886-6941>. gloria.sanchez@uniremington.edu.co



Abstract

The BRCA2 gene is a highly conserved gene in mammals and encodes residues that are phosphorylated for binding to other proteins, including RAD51. BRCA2 mutations have been related to the development of mammary neoplasms in canines. The present investigation dealt with identifying genetic variants in exon 27 of BRCA2, for which 75 DNA samples from female canines collected in a previous study were used. The samples were divided into different groups, in each one the region of exon 27 of BRCA2 was analyzed by PCR. Positive samples were sequenced and manually aligned in the MEGA V11 program. A dataset was built where the most frequent mutation sites for exon 27, the electropherograms and the amino acid changes were analyzed. When evaluating the region between 9,914 and 10,549 bp of exon 27, no mutations were found at positions: 10,180 C>T, 10,398 A>G, and 10,421 A>C. However, AAA insertion at position 10 204 was found in 7 canines. This insertion causes the substitution of a methionine for an isoleucine and lysine. The canines affected with the mutation presented grade 2 mixed mammary carcinoma, with an age greater than 8 years and with greater affection for the Pinscher breed. It is necessary to continue with the development and application of molecular methodologies that allow the detection of genetic variants of the BRCA2 gene in canines in order to strengthen the early diagnosis of neoplasm.

Keywords: insertion, deletion, cancer, mutation.



Introducción

El interés de la sociedad frente al cuidado de los animales de compañía está en franco crecimiento, lo que implica además una mayor preocupación de los veterinarios y propietarios entorno al diagnóstico y determinación de factores predisponentes para patologías como las neoplasias mamarias. Pero ¿qué es lo que lleva a desarrollar este tipo de enfermedad? y ¿por qué cada vez es más común ver una perra con este tipo de neoplasias? Se define como neoplasia a la proliferación excesiva, incontrolada, autónoma e irreversible de células, con características morfológicas y funcionales que se alejan de sus precursoras (Briones y Escárte, 2002). El perro doméstico (*Canis lupus familiaris*) es la especie reconocida como modelo de estudio en el caso de cáncer de mama en humanos, debido a lo anterior se han desarrollado varios estudios sobre el desarrollo de neoplasias en caninos (Cruz y Salinas, 1997; Tamaso y Guerra, 2002; Vargas et al., 2009). La etiología para muchas neoplasias se desconoce, sin embargo, varios factores se han asociado a ellos, estos se dividen en factores intrínsecos como lo son: la edad, especie, raza, sexo, pigmentación de la piel, factores inmunológicos, factores hormonales y genéticos, y factores exógenos en los que se encuentran: la radiación, agentes químicos y virales (Andrade et al., 2010; Elgue et al., 2012). Respecto a la raza, se ha demostrado que ciertas razas tienen una tendencia genética a desarrollar esta patología, por ejemplo, caniches miniaturas, Dachshunds, malteses, Yorkshire Terriers, Springer Spaniel y Pastores Alemanes son ms susceptibles (Beauvais et al., 2012).

Distintos genes han sido relacionados con el desarrollo de neoplasias mamarias debido a sus funciones dentro del proceso de reparación de DNA, control de ciclo celular y a su intervención en mecanismos o procesos celulares como apoptosis, proliferación, diferenciación, supervivencia celular y migración celular, los cuales resultan relevantes en el desarrollo de neoplasia (Enginler et al., 2014). Los genes *BRCA1* y *BRCA2* han sido evaluados en caninos (Rivera et al., 2009), y se ha encontrado evidencia entre la asociación de variantes genéticas con el desarrollo de neoplasias mamarias en caninos (Enginler et al., 2014). El gen *BRCA2* se ha caracterizado como uno de los genes con mayor número de mutaciones en caninos y especialmente relacionado con la neoplasia en glándula mamaria. La prevalencia de aparición de neoplasias en la glándula mamaria es del 60,37 %, seguido de cáncer de piel (17 %) y gastrointestinal (7,2 %); además, el 88,13 % de estas neoplasias son de carácter maligno (Pastor et al., 2015). Las neoplasias de mama en caninos son más frecuentes en animales no castrados y se presentan con mayor frecuencia en hembras (99 %)



comparadas con los machos (1 %); respecto a la edad de aparición de las neoplasias estas son más comunes entre los 8 y los 11 años (Ežerskytė et al., 2011).

Los genes *BRCA1* y *BRCA2* son supresores tumorales y su función es central para la regulación de la proliferación celular, control del ciclo celular y el mantenimiento de la estabilidad genómica a través del reconocimiento y reparación del daño en la doble cadena del DNA por recombinación homóloga (Rebbeck et al., 2011). El gen *BRCA2* es un gen altamente conservado en los mamíferos, está ubicado en el cromosoma 25, tiene 63 402 nucleótidos y 27 exones. Este gen está involucrado junto con la proteína RAD51 en la reparación del DNA por la vía de recombinación homóloga en roturas de doble hebra, manteniendo así la integridad del material genético (Ozmen et al., 2017).

El gen *BRCA2* contiene 8 repeticiones BRC (BRC1-BRC8), que codifican 39 secuencias de aminoácidos, que desempeñan un papel crucial en la unión a RAD51. El extremo C de *BRCA2*, que corresponde al exón 27, contiene un sitio de fosforilación de la quinasa dependiente de ciclina (CDK) que también se une a RAD51 (Ozmen et al., 2017). Los cambios genéticos en el exón 27 del gen *BRCA2* generan cambios en la secuencia de aminoácidos de la proteína, lo que conlleva a la producción de proteínas disfuncionales (Enginler, 2014; Ozmen, 2017). Para el exón 27 han sido descritas previamente varias mutaciones como: 10204ins/delAAA, 10398A > G (Y3397C) 10421A > C (T3405P) en la región NLS2 y NLS3 (señal de localización nuclear) (Thumser-Henner et al., 2020). La región del exón 27 es una de las regiones de las cuales hay poca información en la región por lo cual investigar sobre las posibles variantes nos permite ampliar la información que se conoce sobre las mutaciones genéticas del gen *BRCA2*.

En el presente trabajo se identificaron las variantes genéticas en el exón 27 del gen *BRCA2* en 75 caninos con neoplasias de glándula mamaria en la ciudad de Medellín (Colombia), comparando los resultados con las mutaciones previamente reportadas para el gen y correlacionando los hallazgos con información histopatológica de las neoplasias presentadas por cada canino y factores intrínsecos como la edad y raza.



Método

1. Animales y muestras

Se realizó un estudio de tipo descriptivo trasversal en el cual se evaluaron 75 muestras de DNA de hembras caninas que presentaban neoplasias de glándula mamaria. Las muestras de DNA y los datos asociados a ellas fueron proporcionadas por Arango (2021). Las muestras seleccionadas contaban con la información asociada a variables clínicas como: edad, raza, sexo condición reproductiva y edad de esterilización; además, se contaba con la caracterización del tipo de neoplasia, la edad de aparición y edad de retiro de neoplasia. Los registros y las muestras fueron colectados entre noviembre de 2018 y diciembre de 2019 de varias instituciones médicas veterinarias ubicadas en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, en el departamento de Antioquia.

2. PCR convencional para identificar las variantes genéticas exón 27 del gen *BRCA2*

Para la amplificación de las muestras de DNA por PCR se utilizó la técnica reportada por Borge (2011), en la cual las muestras de DNA fueron agrupadas y amplificadas a partir de mezclas de DNA. Inicialmente se hicieron 5 grupos cada uno con 15 muestras de DNA, se realizó un mix de DNA para cada uno de los grupos y se amplificó el exón 27 del gen *BRCA2*. Los productos de amplificación fueron secuenciados y aquellos en los cuales se detectaron variantes génicas fueron amplificados nuevamente. Este proceso se realizó hasta obtener las muestras con amplificación positiva para las variantes genéticas del exón 27 del gen *BRCA2*.

Las secuencias para la amplificación de las variantes del exón 27 del gen *BRCA2* fueron diseñados de *novo*. A partir de la secuencia del exón 27 del gen *BRCA2* y utilizando el programa Primers3plus® se diseñaron las secuencias FW (AGTCTGTCCCCATACCTGGA) y RV (GACTGCAGAGGCAACAAACA) generando un fragmento de 528 pb que contenía las 4 variantes genéticas 10180C>T, 10204ins/delAAA, 10398A>G y 10421A>C.

Para la PCR convencional se realizó en un volumen final de 50 μ l, para cada reacción se utilizó 100 ng de DNA, 25 μ l de PCR Master Mix (2X) (Thermo scientific ®) y 1.0 μ M de oligonucleótidos de *novo*. Las condiciones para la amplificación fueron: fueron: 95 °C por 5 minutos, seguido de 36 ciclos de: 95 °C por 30 segundos; 59 °C por 30 segundos; 72 °C por



30 segundos y una extensión final a 72 °C por 10 minutos. Los productos de PCR fueron visualizados en gel de agarosa al 2 %.

3. Análisis de secuencias

Los productos de PCR fueron secuenciados a través de la tecnología Sanger en una casa comercial (Macrogen ®). Se construyó un *dataset* con las secuencias obtenidas y las secuencias de referencia: AB043895.5 que pertenece a un canino sin mutaciones genéticas, y las secuencias AB210823.1 y AB622997.1 que pertenecen a caninos con la inserción AAA en el sitio 10 204. Las secuencias fueron alineadas manualmente en el programa MEGA V11 empleando el algoritmo ClustalW, además se evaluaron con el software nucleotide BLAST del National Library of Medicine. Se analizaron los sitios de mutación más frecuentes para el exón 27 basados en los reportes de Yoshikawa (2005a; 2005b) y Engiler (2014), se realizó la verificación de las variantes genéticas contrastando los alineamientos obtenidos con los electroferogramas. Las secuencias aminoacídicas fueron analizadas en el programa MEGA V11.

Resultados

Se obtuvieron 7 secuencias que presentaban variantes genéticas, las secuencias obtenidas fueron contrastadas con las variantes reportadas por Yoshikawa (2005a; 2005b) y Engiler (2014) que se presentan en la tabla 1.



Tabla 1

Variaciones encontradas en el gen BRCA2 de caninos.

Tipo de variación	Nombre	Localización	Tipo de muestra estudiada	Referencia
1 inserción/delección	10204ins/delAAA	NLS2 (exón 27)	Sangre	Yoshikawa et al., 2005a
2 SNP	10398A > G (Y3397C)	NLS3 (exón 27)	Sangre Tejido	Yoshikawa et al., 2005b
	10421A > C (T3405P)			
1 SNP	ss748770620	Exón 27	Sangre	Enginler et al., 2014

Nota. Fuente: Modificada de Thumser-Henner et al. (2020).

Las secuencias obtenidas fueron contrastadas con la secuencia AB210823.1 a través de la herramienta de alineamiento local nucleotide BLAST, de acuerdo con los resultados obtenidos estos son similares a los generados por el algoritmo ClustalW del programa MEGA V11 en donde se puede observar que todas las secuencias tienen un porcentaje de identidad del 100%; de otra parte, el porcentaje de cobertura fue del 100% para los 595 pares de bases de todas las secuencias (*ver tabla 2*).

Tabla 2

Valores del alineamiento de las secuencias respecto a la secuencia de mRNA del gen BRCA2 de un canino con cáncer de mama (AB210823.1)

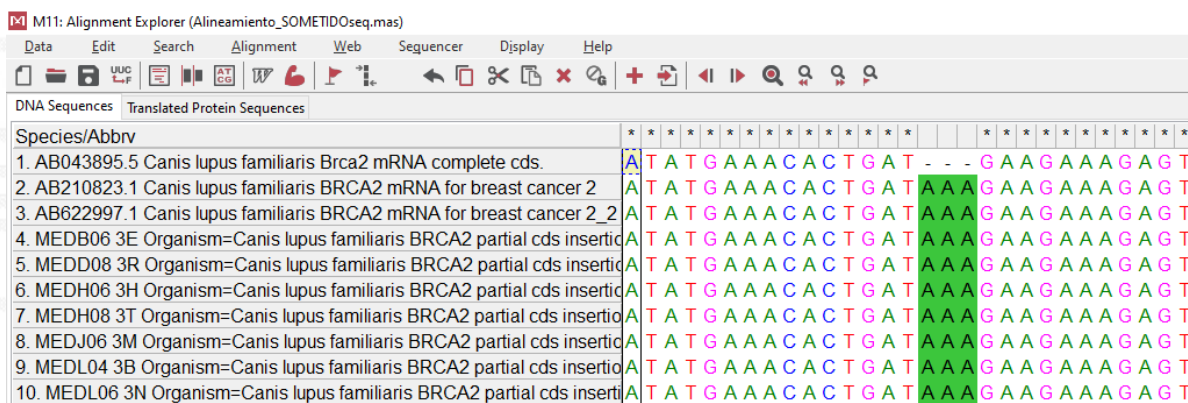
Secuencia	Max Score	Total Score	Query Cover	E value	Per. Ident	Acc. Len
MEDB06 3E	1060	1060	100%	0,0	100,00%	595
MEDB06 3R	1018	1018	100%	0,0	100,00%	595
MEDB06 3H	1018	1018	100%	0,0	100,00%	595
MEDB06 3T	1018	1018	100%	0,0	100,00%	595
MEDB06 3M	1018	1018	100%	0,0	100,00%	595
MEDB06 3B	1018	1018	100%	0,0	100,00%	595
MEDB06 3N	1018	1018	100%	0,0	100,00%	595



Al analizar las posiciones: 10180, 10398 y 10421 no se encontraron variantes genéticas en ninguna de las 7 secuencias obtenidas. Sin embargo, se identificó una inserción de AAA en la posición 10 204 en las 7 muestras como se presenta en la figura 1.

Figura 1

Alineamiento manual de las secuencias e identificación de la inserción AAA en la posición 10204



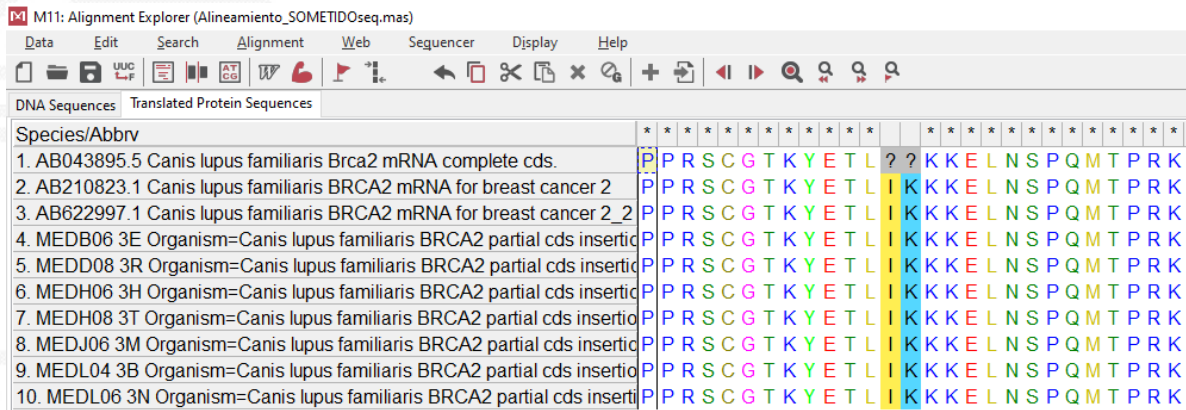
Nota. La secuencia de referencia AB043895.5 pertenece a un canino sin mutaciones genéticas, y las secuencias AB210823.1 y AB622997.1 pertenecen a caninos con la inserción AAA en el sitio 10 204. En los recuadros rojos se presenta el sitio de inserción de la tripleta AAA para cada uno de los 7 caninos analizados en este estudio. La sección presentada corresponde a los nucleótidos de 210 a 240. El alineamiento completo se presenta en el Anexo A.

La inserción AAA en la posición 10 204 en los caninos evaluados conlleva a que se presente un cambio grave en el marco de lectura de la proteína BRCA2. Esta inserción produce la eliminación de una metionina y su cambio por los aminoácidos: isoleucina (I) y lisina (K) como se muestra en la figura 2.



Figura 2

Alineamiento aminoacídico e identificación de la inserción isoleucina (I) y lisina (K)



Nota. La secuencia de referencias AB210823.1 y AB622997.1 pertenecen a caninos con la inserción AAA en el sitio 10 204. En el recuadro rojo se marca la presencia de los residuos IK para cada uno de los caninos evaluados. El alineamiento completo se presenta en el Anexo B.

Al relacionar la información obtenida de cada muestra se identificó que: los 7 caninos son mayores de 8 años, 5 de 7 caninos fueron diagnosticados con carcinoma mixto mamario grado 2, 4 de 7 caninos no estaban esterilizados y 4 de 7 eran raza Pinscher como se muestra en la Tabla 3.



Tabla 3

Variables asociadas a caninos con neoplasia mamaria y que presentan mutación en el exón 27 del gen *BRCA2*

ID	Edad (años)	Raza	1020ins/delAAA	Tipo de neoplasia	GN	R	RR(años)	EAN(años)	ERN(años)
MEDB063E	10	Springer Spaniel	AAA	Carcinoma mixto mamario	2	No	10	8	10
MEDD3083R	8	Pinscher	AAA	Carcinoma mixto mamario	2	Si	3	8	8
MEDH063H	8	Pinscher	AAA	Carcinoma mixto mamario	2	Si	99	6,5	8
MEDH083T	10	Pinscher	AAA	Carcinoma mamario tubulopapilar	2	No	10	9	10
MEDJ063M	8	Pinscher	AAA	Carcinoma mixto mamario	2	No	8	6,5	8
MEDL043B	15	Dalmata	AAA	Carcinoma mixto mamario	2	No	15	13,5	15
MEDL063N	9	Labrador	AAA	Adenoma	2	Si	6	7	7

Nota. ID: identificación; 1020ins/delAAA: variante genética; GN: grado de neoplasia; E: esterilizado; EE: edad de la esterilización; EAN: edad de aparición de las neoplasias; ERN: edad de retiro de la neoplasia.

Discusión

La detección de las variantes genéticas relacionadas con el gen *BRCA2* es necesaria para fortalecer el diagnóstico clínico temprano de los individuos que pueden estar afectados por el desarrollo de neoplasias. Las mutaciones que se presentan en el gen *BRCA2* están relacionadas con un mayor riesgo para la presentación de cáncer en caninos (Engiler et al., 2014; Yoshikawa et al., 2015). Actualmente se han reportado 4 mutaciones (1020ins/delAAA, 10398A > G (Y3397C), 10421A > C (T3405P), ss748770620) dentro del exón 27 que están relacionadas con el desarrollo de neoplasias en caninos (Yoshikawa et al., 2005a; Yoshikawa et al., 2005b; Enginler et al., 2014).

El exón 27 codifica para la región NLS de la proteína *BRCA2*. La región NLS esta correlacionada con la funcionalidad directa de la proteína *BRCA2*, debido a que la proteína



debe ser translocada desde el citoplasma hacia el núcleo para cumplir con su función de reparación de daños en el DNA (Spain et al., 1999; Yano et al., 2000) los cambios en el número o tipo de residuos en la proteína pueden afectar la funcionalidad de la misma (Yoshikawa et al., 2005a). En este trabajo se evaluaron las variantes genéticas del exón 27 del gen *BRCA2* en caninos con tumor de glándula mamaria, no se encontraron cambios en las posiciones 10180C>T, 10398A>G y 10421A>C en ninguno de los caninos evaluados; sin embargo, sólo en siete de 75 caninos estudiados se detectó una variante genética, correspondiendo a una inserción de la tripleta AAA en la posición 10 204. Esta inserción causa que la proteína resultante tenga dos residuos más, una isoleucina y una lisina que sustituyen la metionina original, siendo clasificados como caninos con alelo tipo A de acuerdo con Yoshikawa et al. (2005b). Los cambios a nivel nucleotídico pueden afectar los niveles de transcripción del RNAm, pueden reducir la expresión del gen *BRCA2* (Liu et al., 2014), o incluso afectar la localización celular de la proteína BRCA2. Se ha descrito que la mutación genera una mala localización de la proteína BRCA2 al interior del núcleo celular afectando la reparación del DNA, además se ha reportado que la localización errada de la proteína BRCA2 está relacionada con tumorigénesis en humanos (Yano et al., 2000; Phatania et al., 2018).

Diferentes factores intrínsecos de los individuos los predisponen a la presentación de tumores mamarios, patrón que se corroboró con los datos de esta investigación. La edad de los caninos representa un factor predisponente para adquirir esta patología, ya que, según este análisis, se pudo determinar que el 100 % de los caninos de objeto de estudio, presentaba un rango de edad igual o superior a los 8 años, lo cual, permite concordar con Ežerskytė et al. (2011) el cual, establece una edad de aparición promedio de neoplasias de glándula mamaria entre los 5 y los 10 años de edad. Con relación a las razas, en esta investigación se pudo identificar que la raza Pinscher tienen una prevalencia del 57 % entre todas las demás, lo que permite establecer una relación con Beauvais et al. (2012) quien reporta diferentes razas con predisposición genética más alta y con énfasis en razas puras como las de esta investigación. De acuerdo con la condición reproductiva cuatro de siete hembras con la mutación 10204ins/delAAA no estaban esterilizadas; aunque, se desconoce la edad de la esterilización de las otras tres, tener una OVH (ovariohisterectomía) es un factor protector se ha reportado que debe hacerse antes del primer estro (Hellmen et al., 1993; Nunes et al., 2019).

De acuerdo con el tipo de neoplasia reportada para cada paciente, el carcinoma mamario mixto fue el más frecuente (62,5 %), el cual es uno de los tipos de neoplasia de tipo



maligno más comunes en caninos (Maués et al., 2018). Esta neoplasia involucra dos tipos de células diferentes de la glándula mamaria, las epiteliales y las mesenquimales (Arango, 2021). Aunque la variante genética reportada se ha descrito hasta en un 87 % de los individuos con neoplasias de glándula mamaria, sobre todo en individuos con condición homocigota (Yoshikawa et al., 2005b), no se ha reportado una asociación con un tipo de neoplasia específica. Debido a la importancia de esta patología en caninos es necesario desarrollar estudios genéticos orientados a la detección de polimorfismos con poblaciones sanas y enfermas de la misma raza que permitirían asociar la raza, el polimorfismo y las neoplasias mamarias, los cuáles en la actualidad son limitados (Arango, 2021). En este caso para la raza Pinscher que presentó mayor frecuencia la variante genética 10204ins/delAAA se hace necesario coleccionar más datos para establecer una correlación entre las variantes y el desarrollo de neoplasias. Por otro lado, la estandarización de una prueba para detectar variantes genéticas del gen *BRCA2*, representa una oportunidad de disminuir la frecuencia del gen en la población canina a través de su detección temprana en criaderos y dar un mejor manejo clínico en aquellos individuos que presenten alguna variante; ya que, a través del control de factores de riesgo como la castración temprana, se podría disminuir la manifestación de la enfermedad y los costos asociados a tratamientos de la misma.

Conclusiones

En este trabajo se reporte por primera vez la variante 10204ins/delAAA en el exón 27 del gen *BRCA2* en 7 caninos con neoplasia de glándula mamaria en el Valle de Aburrá, Antioquia. Todas las variantes alélicas reportadas corresponden al tipo A donde no se encuentran otras variaciones en los nucleótidos. Los caninos afectados con la mutación presentaban carcinoma mamario mixto de grado 2, con una edad superior a los 8 años y con mayor afección para la raza Pinscher. La detección temprana de variaciones genéticas en el gen *BRCA2* permite el manejo de animales susceptibles a la presentación de neoplasias de la glándula mamaria, mejorando la calidad de vida de estos y reduciendo los costos asociados a tratamientos por estas patologías.

Agradecimientos

A la Corporación Universitaria Remington por financiar mediante la “Convocatoria de Financiación de Proyectos de Semilleros de investigación” el presente trabajo.



Al médico veterinario Luigi Mateo Arango Vásquez por suministrar las muestras e información para el desarrollo del proyecto de investigación.



Referencias bibliográficas

- Andrade, F., Figueiroa, F., Bersano, P., Bissacot, D., y Rocha, N. (2010). Malignant mammary tumor in female dogs: environmental contaminants. *Diagnostic pathology*, 5(1), pp. 1-5. <https://doi.org/10.1186/1746-1596-5-45>
- Arango, L. (2021). Detección de variantes genéticas en los genes *BRCA1* y *BRCA2* en caninos con neoplasias mamarias en el Área metropolitana – Antioquia, Colombia y su correlación con el tipo histológico [Tesis de maestría]. Corporación de Ciencias Básicas Biomédicas. Universidad de Antioquia.
https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/18552/6/ArangoLuiggi_2021_Gen%C3%A9ticaC%C3%A1ncerCanino.pdf
- Beauvais, W., Cardwell, J, y Brodbelt, D. (2012). The effect of neutering on the risk of mammary tumours in dogs—a systematic review. *Journal of Small Animal Practice*, 53(6), pp. 314-322. <https://doi.org/10.1111/j.1748-5827.2011.01220.x>
- Borge, K., Børresen-Dale, A., y Lingaas, F. (2011). Identification of genetic variation in 11 candidate genes of canine mammary tumour. *Veterinary and comparative oncology*, 9(4), pp. 241-250. <https://doi.org/10.1111/j.1476-5829.2010.00250.x>
- Briones F. Escárte P. (2002). Neoplasias en pequeños animales [Archivo PDF].
https://www.academia.edu/33218193/Neoplasias_en_Pequeños_Animales
- Cruz, G., y Salinas, E. (1997). Estudio comparativo de neoplasias testiculares en el hombre y el perro. *Veterinaria México*, 28(2), pp. 169-174.
<https://www.medigraphic.com/pdfs/vetmex/vm-1997/vm9721.pdf>
- Elgue, V., Piaggio, J., Amaral, C., y Pessina, P. (2012). Factores asociados a la presentación del tipo de cáncer en caninos atendidos en el Hospital de la Facultad de Veterinaria de Uruguay. *Veterinaria (Montevideo)*, 48(187), pp. 25-30.
<https://www.revistasmvu.com.uy/index.php/smvu/article/view/202/132>
- Enginler, S., Akış, I., Toydemir, T., Oztabak, K., Haktanir, D., Gündüz, M., y Fırat, I. (2014). Genetic variations of *BRCA1* and *BRCA2* genes in dogs with mammary tumours. *Veterinary research communications*, 38(1), pp. 21-27.
<https://doi.org/10.1007/s11259-013-9577-7>



- Ežerskytė, A., Zamokas, G., Grigonis, A., y Juodžiukynienė, N. (2011). The retrospective analysis of mammary tumors in dogs. *Vet Med Zoot*, 53(75), pp. 3-8.
<https://vetzoo.lsmuni.lt/data/vols/2011/53/pdf/ezerskyte.pdf>
- Hellmén, E., Bergström, R., Holmberg, L., Spångberg, I. B., Hansson, K., y Lindgren, A. (1993). Prognostic factors in canine mammary tumors: a multivariate study of 202 consecutive cases. *Veterinary Pathology*, 30(1), pp. 20-27.
<https://doi.org/10.1177/030098589303000103>
- Liu, L., Fang, Y., Fan, J., Hu, J., Xu, X., y Jin, X. (2014). BRCA2 promoter polymorphism is associated with breast cancer prognosis in Chinese women. *Chinese Medical Journal*, 127(11), pp. 2012–5.
https://journals.lww.com/cmj/Fulltext/2014/06050/BRCA2promoter_polymorphism_is_associated_with.3.aspx
- Maués, T., El-Jaick, K., Costa, F., Araujo, G., Soares, M., Moreira, A., y Ferreira, A. (2018). Common germline haplotypes and genotypes identified in BRCA2 exon 11 of dogs with mammary tumours and histopathological analyses. *Veterinary and comparative oncology*, 16(3), pp. 379-384. <https://doi.org/10.1111/vco.12389>
- Martins, A.M., Tamaso, E., y Guerra, J. (2002). Retrospective review and systematic study of mammary tumors in dogs and characteristics of the extracellular matrix. *Brazilian Journal of Veterinary Research and Animal Science*, 39(1), pp. 38-42.
<https://doi.org/10.1590/S1413-95962002000100007>
- Nunes, F., Damasceno, K., de Campos, C., Bertagnolli, A., Lavallo, G., y Cassali, G. (2019). Mixed tumors of the canine mammary glands: Evaluation of prognostic factors, treatment, and overall survival. *Veterinary and animal science*, 7, 100039.
- Ozmen, O., Kul, S., Risvanli, A., Ozalp, G., Sabuncu, A., y Kul, O. (2017). Somatic SNPs of the BRCA2 gene at the fragments encoding RAD51 binding sites of canine mammary tumors. *Veterinary and comparative oncology*, 15(4), pp. 1479-1486.
<https://doi.org/10.1111/vco.12293>
- Pastor, N., Caballé, N., Santella, M., Ezquerro, L., Tarazona, R., y Duran, E. (2018). Epidemiological study of canine mammary tumors: age, breed, size and malignancy. *Austral journal of veterinary sciences*, 50(3), pp. 143-147.
<http://dx.doi.org/10.4067/S0719-81322018000300143>



- Pathania, S., y Garber, J. (2018). Mixing Mutation Location With Carcinogen Exposure: A Recipe for Tissue Specificity in BRCA2-Associated Cancers? *Journal of the National Cancer Institute*, 110(9), pp. 925–926. <https://doi.org/10.1093/jnci/djy047>
- Rebbeck, T., Mitra, N., Domchek, S., Wan, F., Friebel, T., Tran, T., y Nathanson, K. (2011). Modification of BRCA1-associated breast and ovarian cancer risk by BRCA1-interacting genes. *Cancer research*, 71(17), pp. 5792-5805. <https://doi.org/10.1158/0008-5472.CAN-11-0773>
- Rivera, P., Melin, M., Biagi, T., Fall, T., Häggström, J., Lindblad-Toh, K., y Von Euler, H. (2009). Mammary tumor development in dogs is associated with BRCA1 and BRCA2. *Cancer Research*, 69(22), pp. 8770-8774. <https://doi.org/10.1158/0008-5472.CAN-09-1725>
- Spain, B., Larson, C., Shihabuddin, L., Gage, F., y Verma, I. (1999). Truncated BRCA2 is cytoplasmic: implications for cancer-linked mutations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96(24), pp. 13920-13925. <https://doi.org/10.1073/pnas.96.24.13920>
- Tamaso, E., y Guerra, J. (2002). Estudio retrospectivo-sistemático da matriz extracelular de tumores mamários caninos. *Brazilian Journal of Veterinary Research and Animal Science*, 39(1), pp. 38-42. [https://www.bvs-vet.org.br/vetindex/periodicos/brazilian-journal-veterinary-research-and-animal-s/39-\(2002\)-1/estudo-retrospectivo-sistemico-da-matriz-extracelular-de-tumores-mam/](https://www.bvs-vet.org.br/vetindex/periodicos/brazilian-journal-veterinary-research-and-animal-s/39-(2002)-1/estudo-retrospectivo-sistemico-da-matriz-extracelular-de-tumores-mam/)
- Thumser-Henner, P., Nytko, K., y Bley, C. (2020). Mutations of BRCA2 in canine mammary tumors and their targeting potential in clinical therapy. *BMC veterinary research*, 16(1), pp. 1-9. <https://doi.org/10.1186/s12917-020-2247-4>
- Vargas, J., Saavedra, M., Alcantara, R., Zegarra, J., Ampuero, M., y Monge, L. (2009). Modelo experimental para el estudio de la ascitis en perros. *Investigación Valdizana*, 3(2), pp. 114-119. <https://www.redalyc.org/pdf/5860/586061880010.pdf>
- Yano, K. I., Morotomi, K., Saito, H., Kato, M., Matsuo, F., y Miki, Y. (2000). Nuclear localization signals of the BRCA2 protein. *Biochemical and biophysical research communications*, 270(1), pp. 171-175. <https://doi.org/10.1006/bbrc.2000.2392>



Yoshikawa, Y., Morimatsu, M., Ochiai, K., Ishiguro-Oonuma, T., Wada, S., Orino, K., y Watanabe, K. (2015). Reduced canine BRCA2 expression levels in mammary gland tumors. *BMC veterinary research*, 11(1), pp. 1-8. <https://doi.org/10.1186/s12917-015-0483-9>

Yoshikawa, Y., Morimatsu, M., Ochiai, K., Nagano, M., Yamane, Y., Tomizawa, N., y Hashizume, K. (2005a). Insertion/deletion polymorphism in the BRCA2 nuclear localization signal. *Biomedical Research*, 26(3), pp. 109-116. <https://doi.org/10.2220/biomedres.26.109>

Yoshikawa, Y., Morimatsu, M., Ochiai, K., Nagano, M., Yamane, Y., Tomizawa, N., y Hashizume, K. (2005b). Analysis of genetic variations in the exon 27 region of the canine BRCA2 locus. *Journal of veterinary medical science*, 67(10), pp. 1013-1017. <https://doi.org/10.1292/jvms.67.1013>



Anexo A

Alineamiento manual de las secuencias e identificación de la inserción AAA en la posición 10204

```
>Canis lupus familiaris Brca2 mRNA complete cds. AB043895.5
AGTCTGCCCATACCTGGATCAACCCAAATGACTTCAAAGTCTTATTGTAAGAGGAGAAAGAGATGGATGACCCAAAAACCTGCAAAAAAGAGAAAGGCCTTGGACTTTTTGAGTAGAGTGCCTTTACCTCCATCTGTCAAGTCCC
ATTTGTACATTTGTTTCTCCAGCTGCCACAGAAGGCATTTACGCCACCAACCGGAGTTGCGGCCACCAAAATATGAAACACTGATAAAAGAGAAAGAGTGAATTTCCACAGATGACTCCACGTAAATTTAATGACCTTTCCTTTTGGGA
AAGTGATTCAAATAGCAGACGAAGAAGCTCGCAATGATAAACACCCAAAGCCCTTTTGTGGGTTCCACAGGAGAACATCAACTTTGTGTCTGTCAAGTACTACCAGGACTGCTCCACGAGCTCAAAAAGATTATCTTGGACTGAAAA
GGCATTCTACTGCAACCCGGGTTCAGAGGACCCGAGAGCCCGAGGCCCGAGCCCTGCACCCAGGAAAGCGGGAGCCCGGTGTACAGAACACAAGTGATCTGAAAAAGGACATCTCTGAGACTGCA
>Canis lupus familiaris BRCA2 mRNA for breast cancer 2 AB210823.1
AGTCTGCCCATACCTGGATCAACCCAAATGACTTCAAAGTCTTATTGTAAGAGGAGAAAGAGATGGATGACCCAAAAACCTGCAAAAAAGAGAAAGGCCTTGGACTTTTTGAGTAGAGTGCCTTTACCTCCATCTGTCAAGTCCC
ATTTGTACATTTGTTTCTCCAGCTGCCACAGAAGGCATTTACGCCACCAACCGGAGTTGCGGCCACCAAAATATGAAACACTGATAAAAGAGAAAGAGTGAATTTCCACAGATGACTCCACGTAAATTTAATGACCTTTCCTTTTGGGA
AAGTGATTCAAATAGCAGACGAAGAAGCTCGCAATGATAAACACCCAAAGCCCTTTTGTGGGTTCCACAGGAGAACATCAACTTTGTGTCTGTCAAGTACTACCAGGACTGCTCCACGAGCTCAAAAAGATTATCTTGGACTGAAAA
GGCATTCTACTGCAACCCGGGTTCAGAGGACCCGAGAGCCCGAGGCCCGAGCCCTGCACCCAGGAAAGCGGGAGCCCGGTGTACAGAACACAAGTGATCTGAAAAAGGACATCTCTGAGACTGCA
>Canis lupus familiaris BRCA2 mRNA for breast cancer 2.2 AB622997.1
AGTCTGCCCATACCTGGATCAACCCAAATGACTTCAAAGTCTTATTGTAAGAGGAGAAAGAGATGGATGACCCAAAAACCTGCAAAAAAGAGAAAGGCCTTGGACTTTTTGAGTAGAGTGCCTTTACCTCCATCTGTCAAGTCCC
ATTTGTACATTTGTTTCTCCAGCTGCCACAGAAGGCATTTACGCCACCAACCGGAGTTGCGGCCACCAAAATATGAAACACTGATAAAAGAGAAAGAGTGAATTTCCACAGATGACTCCACGTAAATTTAATGACCTTTCCTTTTGGGA
AAGTGATTCAAATAGCAGACGAAGAAGCTCGCAATGATAAACACCCAAAGCCCTTTTGTGGGTTCCACAGGAGAACATCAACTTTGTGTCTGTCAAGTACTACCAGGACTGCTCCACGAGCTCAAAAAGATTATCTTGGACTGAAAA
GGCATTCTACTGCAACCCGGGTTCAGAGGACCCGAGAGCCCGAGGCCCGAGCCCTGCACCCAGGAAAGCGGGAGCCCGGTGTACAGAACACAAGTGATCTGAAAAAGGACATCTCTGAGACTGCA
>MEDB06 3E Organism=Canis lupus familiaris BRCA2 partial cds insertion polymorphism
AGTCTGCCCATACCTGGATCAACCCAAATGACTTCAAAGTCTTATTGTAAGAGGAGAAAGAGATGGATGACCCAAAAACCTGCAAAAAAGAGAAAGGCCTTGGACTTTTTGAGTAGAGTGCCTTTACCTCCATCTGTCAAGTCCC
ATTTGTACATTTGTTTCTCCAGCTGCCACAGAAGGCATTTACGCCACCAACCGGAGTTGCGGCCACCAAAATATGAAACACTGATAAAAGAGAAAGAGTGAATTTCCACAGATGACTCCACGTAAATTTAATGACCTTTCCTTTTGGGA
AAGTGATTCAAATAGCAGACGAAGAAGCTCGCAATGATAAACACCCAAAGCCCTTTTGTGGGTTCCACAGGAGAACATCAACTTTGTGTCTGTCAAGTACTACCAGGACTGCTCCACGAGCTCAAAAAGATTATCTTGGACTGAAAA
GGCATTCTACTGCAACCCGGGTTCAGAGGACCCGAGAGCCCGAGGCCCGAGCCCTGCACCCAGGAAAGCGGGAGCCCGGTGTACAGAACACAAGTGATCTGAAAAAGGACATCTCTGAGACTGCA
>MEDD08 3R Organism=Canis lupus familiaris BRCA2 partial cds insertion polymorphism
AGTCTGCCCATACCTGGATCAACCCAAATGACTTCAAAGTCTTATTGTAAGAGGAGAAAGAGATGGATGACCCAAAAACCTGCAAAAAAGAGAAAGGCCTTGGACTTTTTGAGTAGAGTGCCTTTACCTCCATCTGTCAAGTCCC
ATTTGTACATTTGTTTCTCCAGCTGCCACAGAAGGCATTTACGCCACCAACCGGAGTTGCGGCCACCAAAATATGAAACACTGATAAAAGAGAAAGAGTGAATTTCCACAGATGACTCCACGTAAATTTAATGACCTTTCCTTTTGGGA
AAGTGATTCAAATAGCAGACGAAGAAGCTCGCAATGATAAACACCCAAAGCCCTTTTGTGGGTTCCACAGGAGAACATCAACTTTGTGTCTGTCAAGTACTACCAGGACTGCTCCACGAGCTCAAAAAGATTATCTTGGACTGAAAA
GGCATTCTACTGCAACCCGGGTTCAGAGGACCCGAGAGCCCGAGGCCCGAGCCCTGCACCCAGGAAAGCGGGAGCCCGGTGTACAGAACACAAGTGATCTGAAAAAGGACATCTCTGAGACTGCA
>MEDH06 3H Organism=Canis lupus familiaris BRCA2 partial cds insertion polymorphism
AGTCTGCCCATACCTGGATCAACCCAAATGACTTCAAAGTCTTATTGTAAGAGGAGAAAGAGATGGATGACCCAAAAACCTGCAAAAAAGAGAAAGGCCTTGGACTTTTTGAGTAGAGTGCCTTTACCTCCATCTGTCAAGTCCC
ATTTGTACATTTGTTTCTCCAGCTGCCACAGAAGGCATTTACGCCACCAACCGGAGTTGCGGCCACCAAAATATGAAACACTGATAAAAGAGAAAGAGTGAATTTCCACAGATGACTCCACGTAAATTTAATGACCTTTCCTTTTGGGA
AAGTGATTCAAATAGCAGACGAAGAAGCTCGCAATGATAAACACCCAAAGCCCTTTTGTGGGTTCCACAGGAGAACATCAACTTTGTGTCTGTCAAGTACTACCAGGACTGCTCCACGAGCTCAAAAAGATTATCTTGGACTGAAAA
GGCATTCTACTGCAACCCGGGTTCAGAGGACCCGAGAGCCCGAGGCCCGAGCCCTGCACCCAGGAAAGCGGGAGCCCGGTGTACAGAACACAAGTGATCTGAAAAAGGACATCTCTGAGACTGCA
>MEDH08 3T Organism=Canis lupus familiaris BRCA2 partial cds insertion polymorphism
AGTCTGCCCATACCTGGATCAACCCAAATGACTTCAAAGTCTTATTGTAAGAGGAGAAAGAGATGGATGACCCAAAAACCTGCAAAAAAGAGAAAGGCCTTGGACTTTTTGAGTAGAGTGCCTTTACCTCCATCTGTCAAGTCCC
ATTTGTACATTTGTTTCTCCAGCTGCCACAGAAGGCATTTACGCCACCAACCGGAGTTGCGGCCACCAAAATATGAAACACTGATAAAAGAGAAAGAGTGAATTTCCACAGATGACTCCACGTAAATTTAATGACCTTTCCTTTTGGGA
AAGTGATTCAAATAGCAGACGAAGAAGCTCGCAATGATAAACACCCAAAGCCCTTTTGTGGGTTCCACAGGAGAACATCAACTTTGTGTCTGTCAAGTACTACCAGGACTGCTCCACGAGCTCAAAAAGATTATCTTGGACTGAAAA
GGCATTCTACTGCAACCCGGGTTCAGAGGACCCGAGAGCCCGAGGCCCGAGCCCTGCACCCAGGAAAGCGGGAGCCCGGTGTACAGAACACAAGTGATCTGAAAAAGGACATCTCTGAGACTGCA
>MEDJ06 3M Organism=Canis lupus familiaris BRCA2 partial cds insertion polymorphism
AGTCTGCCCATACCTGGATCAACCCAAATGACTTCAAAGTCTTATTGTAAGAGGAGAAAGAGATGGATGACCCAAAAACCTGCAAAAAAGAGAAAGGCCTTGGACTTTTTGAGTAGAGTGCCTTTACCTCCATCTGTCAAGTCCC
ATTTGTACATTTGTTTCTCCAGCTGCCACAGAAGGCATTTACGCCACCAACCGGAGTTGCGGCCACCAAAATATGAAACACTGATAAAAGAGAAAGAGTGAATTTCCACAGATGACTCCACGTAAATTTAATGACCTTTCCTTTTGGGA
AAGTGATTCAAATAGCAGACGAAGAAGCTCGCAATGATAAACACCCAAAGCCCTTTTGTGGGTTCCACAGGAGAACATCAACTTTGTGTCTGTCAAGTACTACCAGGACTGCTCCACGAGCTCAAAAAGATTATCTTGGACTGAAAA
GGCATTCTACTGCAACCCGGGTTCAGAGGACCCGAGAGCCCGAGGCCCGAGCCCTGCACCCAGGAAAGCGGGAGCCCGGTGTACAGAACACAAGTGATCTGAAAAAGGACATCTCTGAGACTGCA
>MEDL04 3B Organism=Canis lupus familiaris BRCA2 partial cds insertion polymorphism
AGTCTGCCCATACCTGGATCAACCCAAATGACTTCAAAGTCTTATTGTAAGAGGAGAAAGAGATGGATGACCCAAAAACCTGCAAAAAAGAGAAAGGCCTTGGACTTTTTGAGTAGAGTGCCTTTACCTCCATCTGTCAAGTCCC
ATTTGTACATTTGTTTCTCCAGCTGCCACAGAAGGCATTTACGCCACCAACCGGAGTTGCGGCCACCAAAATATGAAACACTGATAAAAGAGAAAGAGTGAATTTCCACAGATGACTCCACGTAAATTTAATGACCTTTCCTTTTGGGA
AAGTGATTCAAATAGCAGACGAAGAAGCTCGCAATGATAAACACCCAAAGCCCTTTTGTGGGTTCCACAGGAGAACATCAACTTTGTGTCTGTCAAGTACTACCAGGACTGCTCCACGAGCTCAAAAAGATTATCTTGGACTGAAAA
GGCATTCTACTGCAACCCGGGTTCAGAGGACCCGAGAGCCCGAGGCCCGAGCCCTGCACCCAGGAAAGCGGGAGCCCGGTGTACAGAACACAAGTGATCTGAAAAAGGACATCTCTGAGACTGCA
>MEDL06 3N Organism=Canis lupus familiaris BRCA2 partial cds insertion polymorphism
AGTCTGCCCATACCTGGATCAACCCAAATGACTTCAAAGTCTTATTGTAAGAGGAGAAAGAGATGGATGACCCAAAAACCTGCAAAAAAGAGAAAGGCCTTGGACTTTTTGAGTAGAGTGCCTTTACCTCCATCTGTCAAGTCCC
ATTTGTACATTTGTTTCTCCAGCTGCCACAGAAGGCATTTACGCCACCAACCGGAGTTGCGGCCACCAAAATATGAAACACTGATAAAAGAGAAAGAGTGAATTTCCACAGATGACTCCACGTAAATTTAATGACCTTTCCTTTTGGGA
AAGTGATTCAAATAGCAGACGAAGAAGCTCGCAATGATAAACACCCAAAGCCCTTTTGTGGGTTCCACAGGAGAACATCAACTTTGTGTCTGTCAAGTACTACCAGGACTGCTCCACGAGCTCAAAAAGATTATCTTGGACTGAAAA
GGCATTCTACTGCAACCCGGGTTCAGAGGACCCGAGAGCCCGAGGCCCGAGCCCTGCACCCAGGAAAGCGGGAGCCCGGTGTACAGAACACAAGTGATCTGAAAAAGGACATCTCTGAGACTGCA
```

Nota. La secuencia de referencia AB043895.5 pertenece a un canino sin mutaciones genéticas, y las secuencias AB210823.1 y AB622997.1 pertenecen a caninos con la inserción AAA en el sitio 10204. En los recuadros rojos se presenta el sitio de inserción de la tripleta AAA para cada uno de los 7 caninos analizados en este estudio



Anexo B

Alineamiento aminoacídico e identificación de la inserción isolucina (I) y lisina (K)

```
>Canis lupus familiaris BRCA2 mRNA for breast cancer 2 AB210823.1
SVPIPGSTQMTSKSYCKEEKEMDDPKTCKKRRALDFLSRVPLPPSVSPICTFVSPAAQKAFQPPRSCGTYETLIKKKELNSP
QMTPRKFNDLSLLESDSIADEELAMINTQALLLGSPGEHQLVSVSDSTRAPTSSKDYLGLKRHSTAPGVRGPESPQACTRKR
EPRVQNTSDLKRTSLRL
>Canis lupus familiaris BRCA2 mRNA for breast cancer 2_2 AB622997.1
SVPIPGSTQMTSKSYCKEEKEMDDPKTCKKRRALDFLSRVPLPPSVSPICTFVSPAAQKAFQPPRSCGTYETLIKKKELNSP
QMTPRKFNDLSLLESDSIADEELAMINTQALLLGSPGEHQLVSVSDSTRAPTSSKDYLGLKRHSTAPGVRGPESPQACTRKR
EPRVQNTSDLKRTSLRL
>MEDB06 3E Organism=Canis lupus familiaris BRCA2 partial cds insertion polymorphism
SVPIPGSTQMTSKSYCKEEKEMDDPKTCKKRRALDFLSRVPLPPSVSPICTFVSPAAQKAFQPPRSCGTYETLIKKKELNSP
QMTPRKFNDLSLLESDSIADEELAMINTQALLLGSPGEHQLVSVSDSTRAPTSSKDYLGLKRHSTAPGVRGPESPQACTRKR
EPRVQNTSDLKRTSLRL
>MEDD08 3R Organism=Canis lupus familiaris BRCA2 partial cds insertion polymorphism
SVPIPGSTQMTSKSYCKEEKEMDDPKTCKKRRALDFLSRVPLPPSVSPICTFVSPAAQKAFQPPRSCGTYETLIKKKELNSP
QMTPRKFNDLSLLESDSIADEELAMINTQALLLGSPGEHQLVSVSDSTRAPTSSKDYLGLKRHSTAPGVRGPESPQACTRKR
EPRVQNTSDLKRTSLRL
>MEDH06 3H Organism=Canis lupus familiaris BRCA2 partial cds insertion polymorphism
SVPIPGSTQMTSKSYCKEEKEMDDPKTCKKRRALDFLSRVPLPPSVSPICTFVSPAAQKAFQPPRSCGTYETLIKKKELNSP
QMTPRKFNDLSLLESDSIADEELAMINTQALLLGSPGEHQLVSVSDSTRAPTSSKDYLGLKRHSTAPGVRGPESPQACTRKR
EPRVQNTSDLKRTSLRL
>MEDH08 3T Organism=Canis lupus familiaris BRCA2 partial cds insertion polymorphism
SVPIPGSTQMTSKSYCKEEKEMDDPKTCKKRRALDFLSRVPLPPSVSPICTFVSPAAQKAFQPPRSCGTYETLIKKKELNSP
QMTPRKFNDLSLLESDSIADEELAMINTQALLLGSPGEHQLVSVSDSTRAPTSSKDYLGLKRHSTAPGVRGPESPQACTRKR
EPRVQNTSDLKRTSLRL
>MEDJ06 3M Organism=Canis lupus familiaris BRCA2 partial cds insertion polymorphism
SVPIPGSTQMTSKSYCKEEKEMDDPKTCKKRRALDFLSRVPLPPSVSPICTFVSPAAQKAFQPPRSCGTYETLIKKKELNSP
QMTPRKFNDLSLLESDSIADEELAMINTQALLLGSPGEHQLVSVSDSTRAPTSSKDYLGLKRHSTAPGVRGPESPQACTRKR
EPRVQNTSDLKRTSLRL
>MEDL04 3B Organism=Canis lupus familiaris BRCA2 partial cds insertion polymorphism
SVPIPGSTQMTSKSYCKEEKEMDDPKTCKKRRALDFLSRVPLPPSVSPICTFVSPAAQKAFQPPRSCGTYETLIKKKELNSP
QMTPRKFNDLSLLESDSIADEELAMINTQALLLGSPGEHQLVSVSDSTRAPTSSKDYLGLKRHSTAPGVRGPESPQACTRKR
EPRVQNTSDLKRTSLRL
>MEDL06 3N Organism=Canis lupus familiaris BRCA2 partial cds insertion polymorphism
SVPIPGSTQMTSKSYCKEEKEMDDPKTCKKRRALDFLSRVPLPPSVSPICTFVSPAAQKAFQPPRSCGTYETLIKKKELNSP
QMTPRKFNDLSLLESDSIADEELAMINTQALLLGSPGEHQLVSVSDSTRAPTSSKDYLGLKRHSTAPGVRGPESPQACTRKR
EPRVQNTSDLKRTSLRL
```

Nota. La secuencia de referencias AB210823.1 y AB622997.1 pertenecen a caninos con la inserción AAA en el sitio 10204. En el recuadro rojo se marca la presencia de los residuos IK para cada uno de los caninos evaluados



SEGUNDA PARTE

SEGURIDAD ALIMENTARIA

Es habitual que cada uno de nosotros nos preguntemos ¿qué vamos a comer hoy? O simplemente a veces damos por sentado que ingerir alimentos es algo que necesitamos para mantenernos con vida. Sin embargo, cuántas veces en nuestra cotidianidad nos preguntamos realmente ¿por qué es importante comer? ¿Cuáles son los principios o bases para entender nuestra alimentación? ¿Cómo cultura latinoamericana la alimentación es parte integral de construcción de nuestra sociedad? Estas son algunas de las preguntas que diferentes profesionales y científicos en alimentos nos hacemos constantemente.

Efectivamente todos los seres vivos necesitamos alimentarnos como base fundamental de los procesos biológicos, bioquímicos y físicos de nuestros organismos. Por otra parte, los seres humanos comprendimos, desde hace miles de años, la importancia de forjar unas relaciones con el entorno físico y social que nos rodea para construir diferentes tipos de sistemas, técnicas, procedimientos etc. De esta forma construimos representaciones culturales referentes a la alimentación y la comida. En otras palabras, a lo largo de nuestra historia hemos respondido a la necesidad biológica de alimentarse, a través de diferentes dimensiones en las que los mundos culturales y sociales definen la alimentación (Fischler, 1995).

Una de las principales dimensiones actuales sobre la alimentación es el concepto de Seguridad Alimentaria. El cual es definido por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (F.A.O., por sus siglas en inglés), como “a nivel de individuo, hogar, nación y global, se consigue cuando todas las personas, en todo momento, tienen acceso físico y económico a suficiente alimento, seguro y nutritivo, para satisfacer sus necesidades alimenticias y sus preferencias, con el objeto de llevar una vida activa y sana” (FAO, 1996, citado por Díaz, K. 2022, párr. 4).

Así mismo, la Seguridad Alimentaria es una noción que está compuesta por las siguientes categorías: 1.) Accesibilidad permanente a los alimentos desde perspectivas físicas y económicas; 2.) Ofrecer alimentos de calidad nutricional y energética adecuada para cada individuo, definida como disponibilidad de alimentos; 3.) Ofrecer alimentos producidos y transformados de tal forma que se consideren seguros, definida como “inocuidad y calidad alimentaria o denominada como *Food Safety*. En ese sentido, tanto los alimentos como la

alimentación son ejemplos de las relaciones establecidas entre los seres humanos y las condiciones ambientales que los rodean. Los alimentos, por otra parte, son ejemplos de cómo se construyen las relaciones entre instituciones y saberes que tienen como interés definir las formas de producción y consumo de estos.

Así las cosas, la Seguridad Alimentaria tiene como uno de sus principales propósitos establecer la alimentación adecuada y segura como uno de los pilares que garantizan el bienestar y la salud de la población global. Para la FAO la producción a gran escala de alimentos, la nutrición, y el desarrollo sostenible de las poblaciones están íntimamente ligadas. Sin embargo, solo hasta la aparición del concepto Seguridad Alimentaria, surgió una diferenciación entre estas categorías que permite acercamientos completamente disímiles.

La producción de alimentos, el consumo de los alimentos y la relación con el entorno físico y social que nos rodea son ejes fundamentales de la Seguridad Alimentaria. En este sentido, los siguientes capítulos nos mostrarán cómo desde el ejercicio como científicos en alimentos la inherencia de investigar nuevas formas de consumo, desarrollar tecnologías limpias y alternativas e innovar en los procesos de producción para disminuir el impacto ambiental, cumplen un rol fundamental en el cumplimiento de la Seguridad Alimentaria.

JOSE DANIEL DUARTE FLOREZ³⁵

Docente Ingeniería de Alimentos

Universidad INCCA de Colombia

³⁵ Ingeniero de alimentos y Magíster en Estudios Sociales de la Ciencia y la Tecnología. Experiencia en educación superior en la Universidad INCCA de Colombia, Universidad de la Salle Bogotá y Universidad del Rosario en los campos de la ingeniería de alimentos, alimentación funcional e investigación y desarrollo. Docente y asesor de investigación formativa y profesional en pregrado. Experiencia como científico de alimentos con énfasis en el desarrollo de alimentos funcionales para dietas especiales, bienestar mental y nuevos hábitos de consumo. Experiencia en investigación de estudios sociales e históricos de la alimentación en América Latina. jdduartef@unincca.edu.co

Referencias bibliográficas

Díaz, K. (2022). Crisis en la alimentación. *Hoy en la Javeriana*.

<https://www.javeriana.edu.co/hoy-en-la-javeriana/crisis-en-la-alimentacion/>

Fischler, C. (1995). El (h)omnívoro: el gusto, la cocina y el cuerpo. (1ª ed.). Barcelona: Editorial Anagrama.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (1996). Cumbre Mundial Sobre la Alimentación Roma: Producción de alimentos e Impacto Ambiental. Recuperado de <http://www.fao.org/3/w2612s/w2612s11.htm>

CAPÍTULO X

Modelo “Cradle to Cradle” para grasas saturadas: un gran paso hacia la bioeconomía circular

Cradle to cradle model for saturated fats: a big step towards the circular bioeconomy

Yina Paola Ortega Santiago³⁶
Dagoberto Lozano Rivera³⁷
Fabián Armando Barbosa Páez³⁸
Héctor Camilo Alvernia Verjel³⁹

Resumen

La meta trazada con el empleo de grasas saturadas en la producción de biodiesel bajo el enfoque “Cradle to Cradle” es el de forjar bases sólidas para la construcción de industria verde, en la que cada materia prima pueda reutilizarse ya sea que al finalizar su ciclo de vida retornen al suelo o a la atmósfera en condiciones no tóxicas ni dañinas para el ecosistema, o se reincorporen a un nuevo proceso industrial para ser recicladas una y otra vez. La primera etapa del presente estudio estuvo basada en el modelo interpretativo bajo la metodología de ecoindicadores o ecopuntos, por medio de la cual se evaluaron los impactos ambientales asociados a la disposición actual de las grasas derivadas de puestos informales de comidas rápidas en un contexto local. En la segunda fase correspondiente a la producción de biodiesel, se realizó en primera instancia la determinación de parámetros físicoquímicos de los aceites reusados, para posteriormente dar inicio al desarrollo del experimento en la que se analizaron parámetros tales como la densidad, acidez, viscosidad y la prueba de encendido del combustible en cada uno de los tratamientos. Los resultados obtenidos en cuanto a los impactos asociados al calentamiento global y la evaluación experimental de la conversión de los ácidos grasos a metil éster tras la reacción de transesterificación, permiten concluir que este tipo de grasas presentan una alta viabilidad técnica y económica para la reducción y mitigación de la huella de carbono ligada a la producción de combustibles fósiles.

Palabras clave: economía verde, energía de la biomasa, indicadores ambientales, recursos energéticos, tecnología de los combustibles.

³⁶ Ingeniera Agroindustrial. Magister en Diseño de Procesos y Productos, Universidad de los Andes. Docente Asistente de la Universidad Popular del Cesar. Grupo de investigación Gestión en investigación, producción y transformación Agroindustrial (GIPTA). Cesar, Colombia <https://orcid.org/0000-0003-2718-0374>, yportega@unicesar.edu.co

³⁷ Ingeniero Agroindustrial. Magister en Gerencia Empresarial, Universidad Rafael Beloso Chacín, URBE. Docente Auxiliar de la Universidad Popular del Cesar. Grupo de investigación Gestión en investigación, producción y transformación Agroindustrial (GIPTA). Cesar, Colombia. <https://orcid.org/0000-0003-1294-196X>, dlozanor@unicesar.edu.co

³⁸ Ingeniero Agroindustrial. Especialista en Energías Renovables, Universidad de la Costa, CUC. Docente Asistente de la Universidad Popular del Cesar. Cesar, Colombia. <https://orcid.org/0000-0003-3227-4236>, farmandobarbosa@unicesar.edu.co

³⁹ Ingeniero Ambiental. Especialista en Gestión Ambiental, Fundación Universitaria del área Andina. Director del Departamento de Ciencias Agroindustriales de la Universidad Popular del Cesar. Cesar, Colombia. <https://orcid.org/0000-0003-2599-6302>, hcamiloalvernia@unicesar.edu.co



Abstract

The goal outlined with the use of saturated fats in the production of biodiesel under the "Cradle to Cradle" approach is to forge solid foundations for the construction of green industry, in which each raw material can be reused either at the end of its cycle of life return to the soil or the atmosphere in conditions that are not toxic or harmful to the ecosystem, or are reincorporated into a new industrial process to be recycled over and over again. The first stage of the present study was based on the interpretive model under the methodology of ecoindicators or ecopoints, through which the environmental impacts associated with the current disposal of fats derived from informal fast food stalls in a local context were evaluated. In the second phase corresponding to the production of biodiesel, the determination of physicochemical parameters of the reused oils was carried out in the first instance, to later start the development of the experiment in which parameters such as density, acidity, viscosity and viscosity were analyzed. Fuel ignition test in each of the treatments. The results obtained in terms of the impacts associated with global warming and the experimental evaluation of the conversion of fatty acids to methyl ester after the transesterification reaction, allow us to conclude that this type of fat has a high technical and economic viability for the reduction and Mitigation of the carbon footprint linked to the production of fossil fuels.

Keywords: green economy, biomass energy, environmental indicators, energy resources, fuels technology.



Introducción

Desde la década de los 70'S la salud de gran parte de la población a nivel mundial se ha visto afectada a causa del ineludible problema del calentamiento global, ocasionado por el excesivo volumen de gases de efecto invernadero (GEI) derivados comúnmente de las actividades industriales que se realizan diariamente (Romero et al., 2018). Gases que se originan principalmente por la ignición de combustibles fósiles y algunos subproductos de estos mismos (Mones, 2015). Para el año 2019 las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial aumentaron por tercera vez consecutiva, encontrándose en esta ocasión en 52,4 GtCO₂e (rango de $\pm 5,2$) sin tener en cuenta aquellas emisiones asociadas al cambio en el uso de terrenos agrícolas, las cuales se enmarcan alrededor de las 6,7 GtCO₂e (rango de $\pm 5,9$) (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2020). Hoy día la sostenibilidad ambiental es una de las grandes apuestas productivas en las que se han direccionado los esfuerzos de un país entero para mejorar la calidad de vida de sus habitantes, al ser un tema crucial para cumplir con el compromiso a nivel mundial de formular medidas trascendentales en pro de combatir el cambio climático; medidas que deben ir de la mano con la creación de políticas, estrategias y planes nacionales (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura [IICA], 2020).

Al estudiar el incremento exponencial del volumen de gases que se acumulan año tras año en la atmósfera, se ha logrado detectar una ralentización en el aumento de las emisiones a nivel mundial de GEI. Sin embargo, este declive se atribuye en gran medida al modelo financiero que diferencia la cantidad de emisiones derivadas de las compañías de países que atañen a las economías de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE), con las emisiones de aquellas que no pertenecen a esta (CEPAL et al., 2019). Muchas de las economías asociadas a la OCDE han alcanzado su máximo nivel de emisiones de GEI, lo que le crea directamente un gran compromiso al sector productivo frente a la mitigación de este flagelo no sólo en términos de eficiencia energética, sino además en cuanto al fomento de las fuentes de energía bajas en carbono (IPCC, 2019); ya que para el 2030 se ha planteado como objetivo mundial alcanzar una reducción considerable de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización (Necoechea, 2020).

Dado a lo anterior, el sector industrial en Colombia debe centrar su atención en la planeación y formulación de alternativas de producción limpia en términos energéticos que



potencialicen el uso de biocombustibles, siendo estos considerados productos renovables con cero emisiones de dióxido de carbono (Hernández, 2014). En este contexto el biodiesel se proyecta como una de las alternativas de solución potenciales para acelerar la evolución del combustible fósil a biocombustible, al centrar la atención en el empleo de aceites de origen vegetal o animal, con propiedades de diésel equivalentes; lo que lo cataloga como la opción ideal para usar parte o completamente en los motores de combustión interna, puesto que su utilización acrecentada ensancha directamente la puerta para nuevas estrategias que le apuestan a la construcción de un espacio ambientalmente sostenible, en el que se trabaja arduamente por reducir los gases de efecto invernadero y la sumisión al mundo del petróleo (Pérez et al., 2017). En este sentido, el sistema energético de un país en el contexto de los biocombustibles al planearse desde la estrategia de economía circular, establece una nueva ruta en el diseño de productos y procesos en términos de sostenibilidad ambiental. Lo anterior, se fundamenta en el Decreto Supremo N° 014-2017-minam, en el que se estipula la recuperación de aceites como una de las alternativas más prometedoras en cuanto a la valorización de residuos de difícil manejo (INERCO Consultoría Colombia, 2018).

El aprovechamiento de aceites reciclados en la industria de los combustibles es cada vez más expansivo, tal es el caso del sebo bovino y aceites utilizados en procesos de fritura, característicamente en territorios como Irlanda, México y Canadá (Dávila y López, 2017). Estos desechos oleosos se han posicionado en componentes elementales de bajo importe, debido a que el biodiesel se suele obtener de aceites vegetales de alto costo, los cuales representan aproximadamente el 85 % de los costes totales de operación. Sin embargo, estas grasas presentan por lo general características físicas que dificultan su procesamiento, tal como la solidificación a temperatura ambiente gracias a su alto contenido en ácidos grasos saturados, lo cual resulta en una combustión inconclusa (Campos, 2017).

Desde un marco histórico mundial, es preciso señalar los aportes realizados por diversos investigadores en términos energéticos; ejemplo de ello es el estudio realizado en Quito por Guayara (2016) en el que se determinaron las óptimas situaciones experimentales en la producción de biodiesel a base de la grasa de pollo extraída de la cocción del pollo asado, por medio de la cual Guayara, afirma que este tipo de aceite cumple con los requerimientos establecidos para Diésel No. 2 por lo que puede ser utilizado en automotores diésel o equipos industriales que funcionen con este combustible. Por otra parte, Gómez (2016) en su trabajo de investigación sobre grasa bovina, realizado en la Universidad Técnica de Ambato, Ecuador, usó un método de fusión en seco en la grasa bovina para la producción



de biodiesel de origen animal con un proceso de refinamiento, en esta investigación se extrajo grasa con propiedades fisicoquímicas favorables en producción de biocombustible. De igual forma la mezcla de diferentes aceites para la producción de biodiesel, es una técnica que se ha estudiado con el objetivo de optimizar el rendimiento y las propiedades de este biocombustible.

La selección de factores destacables favorablemente en algunos aceites frente a otros es una de las alternativas de estabilización del combustible, para lo cual se realizan mezclas entre ellos que procuran la obtención de un producto más estable a condiciones ambientales, así como de la mejora del poder de combustión; por lo que, acorde con el estudio realizado por Álvarez (2013) se sugiere realizar mezclas entre el aceite de soja y el de palma bajo una determinada formulación, las cuáles se postulan como la solución al flujo en frío y la estabilidad oxidativa del combustible obtenido. Dentro del contexto nacional se destaca la investigación realizada por los estudiantes de la universidad católica de Colombia Ramírez y Rodríguez (2019), en la que establecen que en el sector palmero los trabajadores poseen mayor calidad de vida referente a los otros sectores agrícolas, implicando que los sectores rurales dispongan ingresos y para producir consumo, que en su momento estimula la economía de los territorios rurales, calidad de vida que es atribuida por la alta producción de biodiesel en esta zona. Dado a lo expuesto en los párrafos anteriores, la presente investigación se centra en la valoración del potencial que presentan las grasas saturadas recicladas de diversos puestos informales de comidas rápidas en el municipio de Aguachica Cesar para ser empleadas como materias primas en la producción de biodiesel.

Método

El objetivo principal de la presente investigación abarca la evaluación de impactos ambientales asociados al cambio climático, ocasionados por la disposición final actual que se da a las grasas saturadas en el municipio de Aguachica-Cesar; además de evaluar el efecto de la cantidad y tipo de alcohol empleado por cada gramo de materia prima tratada, como los factores de estudio en el análisis de las variables de respuesta. La primera etapa del proyecto consistió en un estudio descriptivo trabajado bajo el modelo analítico-deductivo (Hernández Sampieri, 1369), por medio de la metodología de ecoindicadores o ecopuntos (Goedkoop et al., 1999), en la que se evaluaron los impactos ambientales ligados a la disposición actual de



las grasas derivadas de cinco puestos informales de comidas rápidas ubicados en el casco urbano del municipio de Aguachica Cesar.

En cuanto a la segunda fase del estudio, se hizo uso de métodos experimentales para la evaluación de variables con enfoque cuantitativo tanto en la caracterización de la materia prima como en la caracterización fisicoquímica del biodiesel, de las cuales se tuvo el control de las variables independientes y se observaron las consecuencias en las dependientes haciendo una recolección y análisis de datos mediante una minuta de control (Cadena Iñiguez et al., 2017). En esta fase, se seleccionaron diferentes tipos de aceites reciclados, dentro de los que se encuentra el aceite derivado de la fritura de papas y salchichas, una mezcla de aceite usado de cocina y grasa de chorizo en una relación 1:1, aceite vegetal, aceite de palma y aceite recopilado tras la fritura de empanadas.

En la caracterización físico-química de la calidad de los diferentes aceites reciclados se determinaron parámetros tales como la densidad, viscosidad y la determinación del índice de acidez. Estas pruebas se realizaron según las normas planteadas en la tabla 1.

Tabla 1

Normatividad en las propiedades de los biocombustibles

Parámetro	Unidad	Límite	Método de prueba
Densidad a 15 °C	Kg/m ³	860-900	En ISO 3675- ASTM 14214
Viscosidad a 40 °C	mm ² /s (cSt)	3,50 – 5,00	En ISO 3104 - ASTM D 445
Índice de acidez	Mg KOH/g	Max 0,8	En 14104 - ASTM D 664 - ASTM 974
Rendimiento en Conversión	%(m/m)	min 96,5	En 14103

La reacción de transesterificación fue el método empleado para la producción del combustible oleoso, para la cual se recurrió al metanol como el alcohol de cadena corta, encargado del rompimiento de los triglicéridos en los aceites del tratamiento 1 y 2, y etanol en los aceites 3, 4 y 5, como puede apreciarse en la tabla 2.



Tabla 2

Tratamientos y condiciones fijas para la obtención de biodiesel.

<i>Tratamiento</i>	<i>Materia prima</i>	<i>Relación Alcohol/aceite</i>	<i>Tipo de alcohol</i>	<i>Concentración de catalizador (NaOH)</i>
T1	100 % Aceite de fritura de papas y salchichas	6:1	Metanol	2 %
T2	50 % aceite de cocina usado + 50 % grasa de chorizo	5:1	Metanol	2 %
T3	100 % Aceite vegetal de cocina	4:1	Etanol	2 %
T4	100 % Aceite residual de empanadas	5:1	Etanol	2 %
T5	100 % Aceite de palma	3:1	Etanol	2 %

Nota. Es importante resaltar que los tratamientos establecidos en la tabla 2, presentan una variabilidad marcada en cuanto a la relación alcohol/aceite, así como los porcentajes establecidos en las mezclas, por lo que los resultados de la caracterización realizados tras la reacción de transesterificación, generan un amplio espectro. Dado a lo anterior, el análisis realizado más adelante en cuanto al tratamiento con mejor respuesta, se presenta como una aproximación de la efectividad del tipo de materia prima empleada, así como la relación de alcohol/aceite, siendo recomendable ajustar el diseño para evaluar las discrepancias presentadas en este estudio.

Para el caso del catalizador, se empleó soda caustica (NaOH) al 2 %, metanol con el fin de evaluar la conversión de los acilgliceroles o triglicéridos y ácidos grasos libres en ésteres metílicos. Se establecieron valores fijos para el periodo de agitación, la temperatura y el tiempo de reacción. La primera etapa para la producción de biodiesel, fue la deshidratación del aceite de origen a 100 °C por un tiempo de 15 minutos, con el objetivo de eliminar las trazas de humedad remanentes en el aceite, la cual es característica en los procesos de fritura, que pudieran dar origen a una reacción de saponificación de los triglicéridos (Alfonso Alvarez, 2013).



Figura 1

Deshidratación de aceites residuales.



Tras la etapa de deshidratación se dejó en reposo hasta alcanzar una temperatura promedio de 60 °C, y proceder con la incorporación de la mezcla del alcohol y soda caustica, con agitación constante durante 45 minutos, lo que conoce tradicionalmente como la reacción de transesterificación. El montaje realizado para la reacción de transesterificación, puede apreciarse en la figura 2.

Figura 2

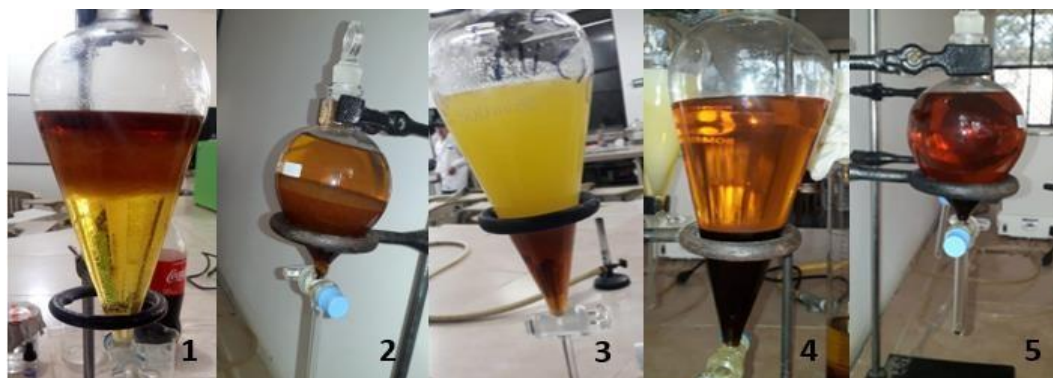
Reacción de transesterificación



Posterior al tiempo de reacción, se pasó la mezcla a un embudo de decantación, en que se dejó reposar por 24 horas; tiempo suficiente para poder observar las fases de metil o etilester y glicerina que se formaron (ver figura 3).

Figura 3

Decantación de mezcla aceite/alcohol



Como resultado de la operación de decantación, se logra divisar en el contenido, una separación de fases, que precisamente corresponde a los productos obtenidos; en este caso una mezcla de esteres de ácidos grasos y glicerina (Rodríguez, Benítez, Tovar y Ortíz, 2012).

Una vez separado el biodiesel, fue necesario realizar su purificación (Pedrojevic, 2008), ya que contenía restos de metanol y catalizador. Para el lavado, se adicionó agua destilada en un volumen igual a un tercio del volumen de biodiesel agitando vigorosamente, hasta observar una fase blancuzca que indica la presencia de jabón. El proceso se repitió hasta alcanzar un valor de pH del agua de lavado cercano a la neutralidad, tal como puede apreciarse en la figura 4.



Figura 4

Lavado del biodiesel



Como etapa final se realizó nuevamente una deshidratación al metiléster, hasta la eliminación total de las burbujas que se formaron, como muestra de una leve muestra de saponificación, tal como puede apreciarse en la figura 5.

Figura 5

Purificación del biodiesel



Se realizaron pruebas de viscosidad, densidad e índice de acidez al combustible obtenido. Las cuales se describen a continuación:

- Densidad: La prueba se realizó de acuerdo con la norma europea 14 214, tomada a 15 °C. Utilizando un Beaker aforado el cual se pesó antes de ser llenado, se agregó

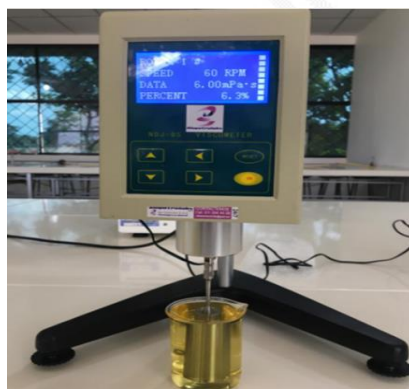


biodiesel hasta la marca de aforo y se pesó de nuevo para conocer el peso del biodiesel por diferencia de pesos entre el Beaker lleno y el Beaker vacío.

- Viscosidad: Para el análisis de viscosidad en la materia prima se contó con un viscosímetro rotativo con pantalla LCD referencia NDJ 8S, el cual se utilizó para hallar este parámetro en cada tratamiento a una T° de 40 °C (ver figura 6).
- Índice de Acidez: la determinación de la acidez se realizó con base a la norma ASTM 974 en donde se titularon 5 gramos de metiléster/etilester disuelto en 10 ml de etanol, con una solución de KOH 0,1N utilizando fenolftaleína como indicador

Figura 6

Determinación de Viscosidad para cada tratamiento



Técnicas e instrumentos de recolección de datos

En esta investigación se utilizaron técnicas de recolección de datos primarios como:

- Encuesta: Se aplicaron tipo cuestionario con preguntas formuladas por escrito con la cual se consiguió obtener información y respuestas puntuales logrando con esto identificar de una mejor manera las cifras de la población y muestra.
- Entrevista: La entrevista se realizó de manera presencial y directa a 10 propietarios de los establecimientos escogidos como población, en esta entrevista se abordaron preguntas concretas y puntuales como datos del establecimiento, venta promedio del día y disposición y manejo de los residuos grasos generados durante el día, información que se usó como base para el desarrollo de esta investigación.



- **Observación Experimental:** Se llevó a cabo controlando los datos obtenidos durante la investigación, utilizando como instrumento hojas o fichas para registro de datos.

Por otra parte, se utilizaron instrumentos de recolección de datos secundarios como: Libros, revistas científicas, búsquedas sistemáticas y fuentes bibliográficas acerca de investigaciones afines al objeto de estudio que permitieran la orientación hacia la búsqueda y cumplimiento de los objetivos propuestos en esta investigación.

Análisis y tabulación de datos

Luego de disponer los resultados se prosiguió a realizar un estudio de la información, en lo que se logró respuestas a los interrogantes de la investigación propuesta. Para la ejecución de la tabulación y del análisis de los datos se emplearon herramientas informáticas como el software de Microsoft Excel, en hojas de cálculo para la elaboración de los respectivos gráficos. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) en donde se tuvieron datos como $\text{media} \pm \text{desviación estándar}$ para determinar diferencias significativas en los tratamientos evaluados.

Resultados

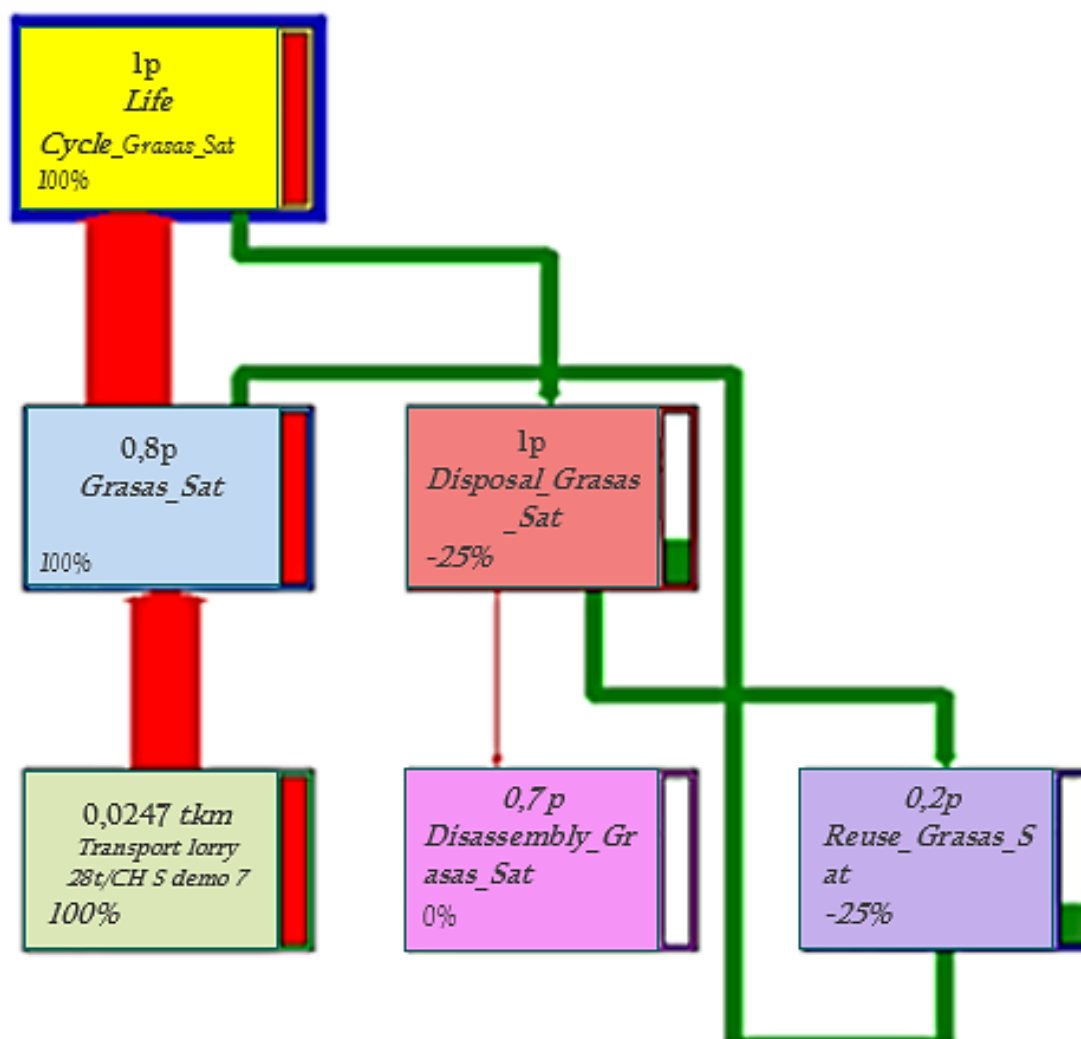
La evaluación de impactos ligados a la producción y disposición final (derrame al suelo o a sistemas de alcantarillado) que se le ha venido dando a los aceites derivados de los métodos de cocción de alimentos procesados, en diversos establecimientos de comidas rápidas en el municipio de Aguachica Cesar, estuvo dividida en tres grandes escenarios tales como el de la afectación a la salud de las personas, calidad del ecosistema y uso de recursos naturales.

Escenarios que fueron analizados por medio del Software SIMAPRO, los cuáles se encuentran representados por la figura 7.



Figura 7

Evaluación conjunta de escenarios de impacto para grasas saturadas recicladas.



Nota. Fuente: Elaborado en SIMAPRO.

Los resultados derivados del análisis de impactos obtenido por SIMAPRO, permiten deducir que el transporte es el principal responsable en cuanto a las emisiones de dióxido de carbono, arrojando un porcentaje de responsabilidad del 100 %. Así mismo en cuanto a la calidad del ecosistema y el uso de recursos naturales se establece que la recolección y distribución de los aceites estudiados son el principal emisor de gases de efecto invernadero, dado el análisis de ciclo de vida realizado en la cadena de producción de grasas y aceites saturados que se desechan en el municipio de Aguachica-Cesar.

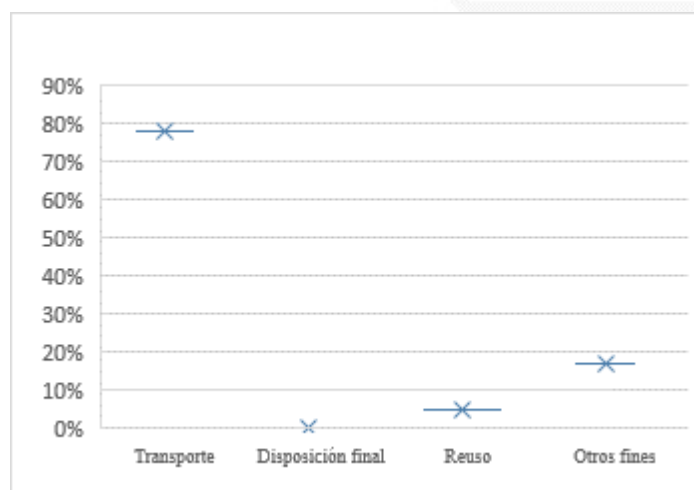


Los resultados en cuanto al fin de vida obtenidos por SIMAPRO teniendo en cuenta los límites establecidos, exponen un porcentaje de participación para disposición final de -25 %, así mismo para reúso (-25 %) y para otros fines no tuvo porcentaje de participación (0 %). Los valores negativos son un reflejo del impacto positivo que ocasiona al medio ambiente el plantear el reúso (para un nuevo proceso productivo) como alternativa de disposición para los aceites comúnmente desechados en este tipo de establecimientos de comidas rápidas.

En cuanto a la evaluación de impactos, bajo la metodología de ecoindicadores los resultados se presentan en la Figura 8.

Figura 8

Ecopuntos-Grasas saturadas



Los resultados arrojados tras la evaluación de impactos bajo la metodología de ecopuntos, se distinguen de los obtenidos en el software SIMAPRO en cuanto al porcentaje de participación de cada etapa del ciclo de vida para las grasas valoradas, siendo en este caso el mismo responsable directo, pero con una reducción del 22 % en cuanto al daño causado al ambiente (78 % de participación del sector transporte en la emisión de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero). Para los resultados del fin de vida arrojados por el ECOINDICADOR 99, teniendo en cuenta los límites fueron los siguientes: disposición final, con un porcentaje mínimo que tiende a cero (0 %), reúso con 5 % y otros fines con un 17 % de participación.

Caracterización fisicoquímica de los aceites residuales empleados en la producción de biodiesel

Con el objetivo de establecer la objetividad de los resultados obtenidos en cuanto a la densidad, viscosidad e índice de acidez presentados en las Figuras 9, 10 y 11 respectivamente, se efectuó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor con factores fijos, factores a los que se les realizó el test de Tukey para la identificación de diferencias significativas entre los tratamientos analizados.

Figura 9

Diagrama de cajas para la Densidad

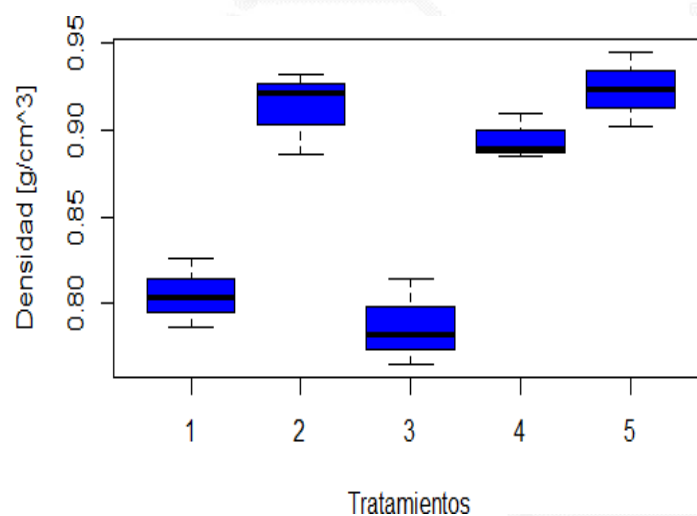


Figura 10

Diagrama de cajas para la Viscosidad

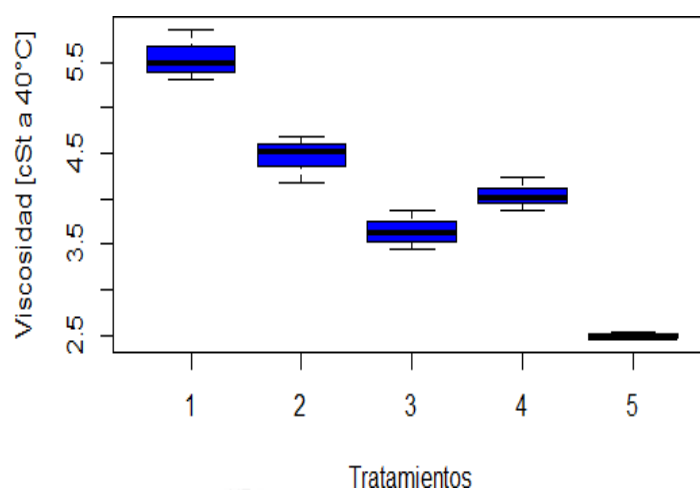
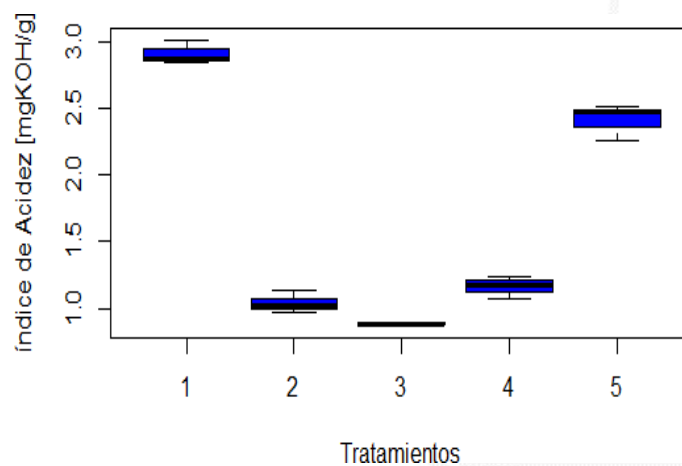


Figura 11

Diagrama de cajas para el índice de acidez



Al analizar los resultados presentados en los diagramas de cajas, se aprecia que los tratamientos, 4, 5 y 2 son análogos en cuanto a la densidad, sin variabilidad distinguible en sus respuestas, siendo esta en promedio de $0,91 \text{ g/cm}^3$; por otra parte, las mezclas establecidas para los tratamientos 1 y 3 presentaron de igual forma semejanza con una densidad aproximada de $0,8 \text{ g/cm}^3$.

Los resultados en cuánto a viscosidad expuestos en la figura 10 expresan discrepancias reveladoras entre el tratamiento 4 y el resto de las mezclas, pero con una ligera

proximidad hacia la mezcla del tratamiento, con tan solo 3 centésimas por debajo del valor reportado por el tratamiento 2, siendo este de 0,42 cSt9.

En cuanto al índice de acidez de los tratamientos presentados en la figura 11, se identifica la existencia de diferencias significativas entre los resultados de los tratamientos 1 y 5 con relación al 2, 3 y 4, coincidiendo con lo mostrado para el caso de la viscosidad, donde se hallaron analogías en cuanto a las respuestas de las variables estudiadas en el tratamiento 2 con relación al 3 y 4.

Producción y Caracterización fisicoquímica de los biodiéselos obtenidos en cada tratamiento.

A continuación, en la tabla 3 se exponen los resultados de los análisis fisicoquímicos realizados a las muestras de biodiesel seleccionadas en cada una de las mezclas.

Tabla 3

Resultados de la caracterización fisicoquímica de los biodiéselos obtenidos

Materia prima	Densidad (g/cm ³)	Viscosidad (cSt a 40°C)	Índice de Acidez Mg KOH/g	Rendimiento (%)
100 % Aceite de fritura de papas y salchichas	0,87	3,96	0,75	85
	0,86	4,89	0,68	
	0,85	5,12	0,74	
50 % aceite de cocina usado + 50 % grasa de chorizo	0,92	3,45	0,85	79
	0,95	4,26	0,76	
	0,96	3,89	0,88	
100 % Aceite vegetal de cocina	0,74	3,26	0,64	83
	0,80	3,52	0,75	
	0,85	4,0	0,69	
100 % Aceite residual de empanadas	0,92	3,82	0,78	87
	0,80	4,03	0,69	
	0,86	3,95	0,74	
100 % Aceite de palma	0,78	3,04	1,02	76
	0,83	2,97	0,97	
	0,81	3,14	1,13	



Discusión

Tras analizar los resultados obtenidos con la evaluación de impactos realizada en SIMAPRO, se puede establecer claramente un impacto negativo directo a la atmósfera asociado al sistema de transporte; impacto que repercute llanamente en la calidad de vida de las personas. Este resultado es razonable dado a la excesiva generación de smog por parte de los camiones transportadores, que acarrearán contaminación en el aire (partículas sólidas) lo que afecta la salud de la población a corto y/o mediano plazo (World Health Organization, 2017).

En cuanto al escenario de la calidad del ecosistema, se logró identificar que el impacto negativo atribuido al transporte, se relaciona en gran medida con la afectación directa hacia la fauna y la flora del ecosistema, ya que la contaminación del aire se traduce en el denominado efecto invernadero (Tayde et al., 2014).

En cuanto al análisis del ECOINDICADOR 99, los resultados reflejan que el 78 % de las emisiones de gases de efecto invernadero son atribuidas al transporte, siendo este porcentaje bastante significativo ya que las emisiones de smog liberadas a la atmósfera suelen afectar de manera notoria el medio ambiente, por ser causante del efecto invernadero; siendo afectados en la misma medida la fauna y flora en primera instancia, sin tener en cuenta el tipo de combustible empleado en el sistema de transporte seleccionado para realizar el servicio de distribución.

Respecto a la evaluación del potencial de las grasas saturadas para ser empleadas como materia prima para la producción de biodiesel, se puede establecer que el aceite proveniente de frituras de alimentos como papas, salchichas y empanadas así como el empleo de aceites reusados de origen vegetal ensanchan las posibilidades de conseguir un carburante más limpio, al comparar los resultados obtenidos con el combustible obtenido al ser mezclado de grasa de chorizo incluso más allá del tan habitualmente empleado aceite de palma (Dávila Barrera y Cortés López, 2017).

Los datos de las densidades del biodiesel a partir de aceites reciclados, mostraron valores dentro de lo permitido por la norma ASTM D127, como puede observarse en la Tabla 3, solo 2 tratamientos (T3 y T5) estuvieron por debajo de los 860 kg/m^3 establecidos por la norma. Estos resultados fueron satisfactorios para el resto de los tratamientos siendo un dato importante puesto que la densidad es una de las propiedades más relevantes en los biocombustibles ya que hace que el sistema de combustión se produzca de forma adecuada (García-Muentes y Lafargue-Pérez, 2018). Las normas que regulan la calidad del biodiesel



establecen un rango permitido para la viscosidad de (3,5–5,0 cSt), en los resultados de los tratamientos solo el tratamiento 5 no estuvo dentro del rango, lo cual podría corregirse con la inclusión de aditivos para el mejoramiento de este comportamiento.

Como se observa en la Tabla 3, los tratamientos T2 Y T5 exceden el límite establecido por la norma ASTM D 664 en cuánto al índice de acidez; estando el resto de los tratamientos dentro el rango establecido, por lo que se podría decir que la transesterificación convirtió la mayoría de los ácidos grasos libres en ésteres carboxílicos; sin embargo, esta medida podría verse afectada en el tiempo de almacenamiento del biodiesel haciendo una ruptura de los ácidos grasos en cadenas ácidas más cortas o la hidrólisis de los ésteres metílicos (Montpetit y Tremblay, 2016).

Los resultados en cuanto al rendimiento de conversión de los ácidos grasos a metiléster a partir de aceite residual exponen que los tratamientos T1, T3 y T4 superaron el 80 %, cifra que hace al biodiesel sostenible desde el punto de vista técnico y económico; sin embargo, Nazario (2005) establece que un buen rendimiento estaría por encima del 86 %. Para este parámetro se podría decir que las concentraciones molares alcohol/grasa no influyen en gran medida en el rendimiento del biodiesel ya que no presentó diferencia significativa en los tratamientos.

Conclusiones

En el presente estudio se demostró que es posible emplear aceites reciclados derivados de procesos de cocción de alimentos, caracterizados por poseer un gran contenido de ácidos grasos saturados, como materia prima para la producción de biodiesel; siendo una alternativa de energía renovable a la par de otorgar valor agregado a estos desechos. En la caracterización de la materia prima no se presentaron inconvenientes respecto a su solidificación, siendo esta una de las principales problemáticas que caracteriza a las grasas de origen animal.

Para la caracterización fisicoquímica del biodiesel al igual que la materia prima se midieron parámetros como la densidad, viscosidad, índice de acidez y el rendimiento, dando como resultado un mejor comportamiento por parte de los tratamientos T1 y T4, al presentar los valores más cercanos a la norma internacional exigida para aceptación del biodiesel, así como también las mejores condiciones de reacción de las cuatro relaciones molares que se



trabajaron, encontrando que la relación molar alcohol/grasa con la mejor característica fue la relación 6:1. En los parámetros no se logró en un 100 % el cumplimiento de la norma establecida, sin embargo, se hicieron unas recomendaciones para aquellos parámetros no satisfactorios.

Se cumplieron a cabalidad todos los objetivos propuestos en el presente proyecto, logrando establecer que los aceites residuales son una buena opción para la obtención de biodiesel en el municipio de Aguachica Cesar; siendo esta alternativa viable para la demanda actual que hay con las materias primas de primera generación como lo es el aceite de palma. Cabe recalcar que el presente estudio es el primero realizado en el municipio sirviendo como base para las futuras investigaciones sobre biodiesel a partir de grasas trans.

Algunas de las recomendaciones propuestas para futuras investigaciones, son las siguientes:

- Se recomienda en la reacción de transesterificación aumentar el tiempo de reacción a 2 horas.
- Se sugiere que esta reacción debe hacerse a una temperatura de 48-50°C en lugares que se caracterizan por presentar un clima cálido, ya que a una temperatura mayor el metanol se volatiliza más fácilmente; lo que repercute en la disminución del rendimiento obtenido.
- Se propone estudiar la estabilidad del biodiesel con el tiempo en almacenamiento para evaluar si sus propiedades fueron afectadas y determinar el tiempo de vida útil.
- Por último, se recomienda realizar mezclas de biodiesel a partir de aceites reciclados con diésel comercial con el fin de ejecutar pruebas de combustión en motores analizando su comportamiento.



Referencias bibliográficas

- Águila, E., Sohr, R., Parker, C., y Zanelli, J. (2011). Energía y medio ambiente. Una ecuación difícil para América Latina: los desafíos del crecimiento y desarrollo en el contexto del cambio climático. In *Consejo Latinoamericano de Ciencias Sociales, CLACSO*.
- Amarís, J., Manrique, D., y Jaramillo, J. (2015). Biocombustibles líquidos en Colombia y su impacto en motores de combustión interna. Una revisión. *Revista Fuentes El Reventón Energético*, 13(2), pp. 23–34. <https://doi.org/10.18273/revfue.v13n2-2015003>
- Benavides, H. (2007). Información técnica sobre Gases de Efecto Invernadero y el cambio climático. *Ideam*, pp. 1–102. <https://doi.org/IDEAM-METEO/008-2007>
- Cadena Iñiguez, P., Rendón-Medel, R., Aguilar-Ávila, J., Salinas- Cruz, E., De la Cruz-Morales, F., y Sangerman- Jarquín, D. (2017). Quantitative methods, qualitative methods or combination of research: an approach in the social sciences. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(7), pp-65-76 1603. <https://www.redalyc.org/pdf/2631/263153520009.pdf>
- Castellar, G., Angulo, E., y Cardozo, B. (2014). Transesterificación de aceites vegetales empleando catalizadores heterogéneos. *Prospectiva*, 12(2), pp. 90. <https://doi.org/10.15665/rp.v12i2.293>
- CEPAL, FAO, y IICA. (2019). Acciones claves para la transformación rural y agrícola hacia el desarrollo sostenible e inclusivo en América Latina y el Caribe. In *Perspectivas de la agricultura y del desarrollo rural en las Américas: una mirada hacia América Latina y el Caribe 2019-2020*. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/45111/CEPAL-FAO2019-2020_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Cortés, M., Gata, E., Pipió, A., Rodríguez, Á., y Sánchez, J. (2019). Biocombustibles: tipos y estrategias de producción. *MoleQla: Revista de Ciencias de La Universidad Pablo de Olavide*, 35, 6. pp, 40-42. <https://www.upo.es/cms1/export/sites/upo/moleqqa/documentos/Numero35/Destacado-1.pdf>



Dávila Barrera, J., y Cortés López, C. (2017). Obtención de biodiesel a partir de aceite de fritura. *Instname: Universidad Libre*, 56.

<http://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/10393>

García-Muentes, S. A., y Lafargue-Pérez, C. F. (2018). Propiedades fisicoquímicas del aceite y biodiesel producidos de la *Jatropha curcas* L. en la provincia de Manabí, Ecuador. *Revista Cubana de Química*, 30(1), pp. 143–159.

http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-54212018000100012&lng=es&nrm=iso

Goedkoop, M., Effting, S., y Collignon, M. (1999). Manual práctico de ecodiseño. Operativo de implantación en 7 pasos. Indicador 99. In PRé Consultants.

[https://proyectaryproducir.com.ar/public_html/Seminarios_Posgrado/Herramientas/ECO indicador 99 ca.pdf](https://proyectaryproducir.com.ar/public_html/Seminarios_Posgrado/Herramientas/ECO%20indicador%2099%20ca.pdf)

Gómez, D. (2016). *Aprovechamiento De La Grasa Bovina del Camal Frigorífico Municipal Ambato Para La Obtención de Biodiesel como Combustible de Origen Animal*.

Disponible en: <https://n9.cl/6tvh>

Guayara, A. (2016). *Estudio de Pre-Factibilidad del Proceso de Obtención de Biodiesel a partir de la Grasa de Pollo Recuperada de los Residuos Generados en su Proceso de Cocción*. Disponible en: <https://n9.cl/j793g>

Hernández Sampieri, R. (1969). *Metodología de la Investigación*.

IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura). (2020). *Desarrollo rural en las Américas: 2019-2020*.

INERCO Consultoría Colombia. (2018). *Valorización Energética De Residuos: Proyecto WTE Colombia*.

https://bdigital.upme.gov.co/bitstream/001/1339/5/Productos1%2C2%20y%203_V2.pdf

IPCC. (2019). Calentamiento Global de 1,5 °C. In *Intergovernmental Panel on Climate Change*.

Mazzarri, C. A., y colaboradores. (2018). Producción de biodiésel a partir de las grasas extraídas de la borra de café. *Ciencia e ingeniería neogranadina*, 29(1), pp. 53-66.

<https://doi.org/10.18359/rcin.2899>



- Mones, J. O. (2015). Producción de biodiesel a partir de grasa animal. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 93. pp. 7- 10
www.reibci.org/publicados/2015/septiembre/1200103.pdf
- Montpetit, A., y Tremblay, A. Y. (2016). A Quantitative Method of Analysis for Sterol Glycosides in Biodiesel and FAME Using GC-FID. *JAOCS, Journal of the American Oil Chemists' Society*, 93(4), pp. 479–487. <https://doi.org/10.1007/s11746-016-2798-5>
- Necoechea, P. (2020). ¿Podrá el COVID-19 reducir la huella de carbono en América Latina? Konrad Adenauer Stiftung, 3.
https://www.kas.de/documents/273477/8706787/Podrá+el+COVID-19+reducir+la+huella+de+carbono+en+América+Latina_diseño.pdf/02850da0-2412-0110-d33e-c5038ced511f?version=1.0yt=1587297086905
- Ordoñez, B., Chaves, L., Pérez, W., Murcia, M., y Alvarado, E. (2013). Caracterización de biodiesel obtenido. *Colomb biotecnol*, 62. pp. 61-65.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-34752013000100007&lng=en&nrm=iso
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2020). *Informe sobre la brecha en las emisiones del 2020*. 1–16.
- Rieznik, N., y Hernández, A. (2005). Análisis del ciclo de vida. Madrid, España: Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid.
- Rodríguez, L., Benítez, L., Tovar, C., y Ortíz, Á. (2012). Obtención de biodiesel a partir de grasa residual de pollo. *CIENCIAS E INGENIERIAS AL DIA*, 62. pp. 62-68.
<https://hdl.handle.net/11227/5164>
- Román López Teresa. (2017, enero 11). Análisis de Ciclo de Vida de un producto, qué es, objetivo, origen, cómo se realiza, beneficios. <https://www.gestiopolis.com/analisis-del-ciclo-vida-producto/>
- Romero, G., Álvarez, A., Calderón, S., y Ordóñez, A. (2018). Impactos distributivos de un impuesto al carbono en Colombia: vínculo entre modelos de microsimulaciones y equilibrio general. *Lecturas de Economía*, 89, pp. 163–198.
<https://doi.org/10.17533/udea.le.n89a06>



Modelo “Cradle to Cradle” para grasas saturadas

Sedeño, E., Rocha-Hoyos, J., Alvear, P., y Barboza, J. (2017). Producción e Impacto del Biodiesel. UIDE, 60.

Tayde, E., Gutierrez, Y., y Jacome, R. (2014). PROPOSALS FOR REDUCING ENVIRONMENTAL. *Environmental Management System*, 5(1900–9178).

<https://bit.ly/2MLpdiP>

World Health Organization. (2017, 23 enero). Contaminación del aire. Organización Mundial de la Salud. https://www.who.int/topics/air_pollution/es/



Solubilización de la Roca Fosfórica con Ácido Oxálico, Modelo de Fertilización para una Agricultura Sostenible

Solubilization of Phosphoric Rock with Oxalic Acid, Fertilization Model for Sustainable Agriculture

Laura Andrea Trejos Gómez⁴⁰
Gladis Estela Morales Mira⁴¹
Martha Liliana Acevedo Betancourth⁴²
Sergio Mauricio Betancur Hincapié⁴³
Carlos Alberto Peláez Jaramillo⁴⁴
Nora Eugenia Restrepo Sánchez⁴⁵

Resumen

Existen métodos para acelerar y fortalecer los procesos de transformación del fósforo, un macronutriente esencial para el crecimiento de las plantas, de los más limitantes en la productividad de los cultivos, su deficiencia es común en suelos agrícolas de todo el mundo. Por esta razón, es necesario estudiar el efecto de los ácidos orgánicos de bajo peso molecular en la extracción de fósforo asimilable. En esta investigación se ha profundizado en este tipo de estudio, cuya metodología consiste en analizar el porcentaje de solubilización de la roca fosfórica obtenido por espectrofotometría visible a partir de la cuantificación del fósforo asimilable. Fueron empleadas cinéticas de solubilización de roca fosfórica en distintas proporciones Roca Fosfórica (RF) / Ácido Oxálico (AO) a diferentes temperaturas y espacios de tiempo para determinar la eficiencia de este proceso y su uso potencial como fertilizante en el campo de la agricultura sostenible. Se pudo identificar que el tratamiento Roca Fosfórica 50 % - Ácido Oxálico 50 % a una temperatura controlada de 70 °C alcanza una solubilidad máxima de la Roca Fosfórica de 100 % luego de 11 días de tratamiento comparada con la roca fosfórica sin solubilizar que es de un 10 %. Lo anterior permite concluir que, los ácidos orgánicos de bajo peso molecular actúan como activadores de fósforo inorgánico. Lo que define este método como un modelo promisorio para la agricultura y permite garantizar la seguridad alimentaria para las generaciones futuras.

Palabras clave: eficiencia, solubilización, fertilizante, ácidos orgánicos de bajo peso molecular, roca fosfórica.

⁴⁰ Ingeniera Ambiental. Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad de Medellín. Medellín, Colombia. <https://orcid.org/0000-0001-5212-7976>. lauraandreatrejosgomez@gmail.com

⁴¹ Química. Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad de Medellín. Medellín, Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-1796-8945>. gmorales@udemedellin.edu.co

⁴² Química. Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad de Medellín. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Antioquia. Colombia. <https://orcid.org/0000-0001-5298-0539>. marta.acevedo@udea.edu.co

⁴³ Químico. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Antioquia. Colombia. <https://orcid.org/0000-0003-4666-530X>. smauricio.betancur@udea.edu.co

⁴⁴ Biólogo. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Antioquia. Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-0681-6735>. carlos.pelaez@udea.edu.co

⁴⁵ Química. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Antioquia. Colombia. <https://orcid.org/0000-0001-8379-3568>. neugenia.restrepo@udea.edu.co



Abstract

There are methods to accelerate and strengthen the transformation processes of phosphorus, an essential macronutrient for plant growth, one of the most limiting in crop productivity, its deficiency is common in agricultural soils around the world. For this reason, it is necessary to study the effect of low molecular weight organic acids on the extraction of assimilable phosphorus. This research has delved into this type of study, whose methodology consists of analyzing the percentage of phosphate rock solubilization obtained by visible spectrophotometry from the quantification of assimilable phosphorus. Kinetics of phosphate rock solubilization in different proportions of Phosphoric Rock (RF) / Oxalic Acid (AO) at different temperatures and time periods were used to determine the efficiency of this process and its potential use as a fertilizer in the field of sustainable agriculture. It was possible to identify that the Phosphoric Rock 50% - Oxalic Acid 50% treatment at a controlled temperature of 70 °C reaches a maximum solubility of the Phosphoric Rock of 100% after 11 days of treatment compared to the unsolubilized phosphate rock, which is of 10%. The foregoing allows us to conclude that low molecular weight organic acids act as inorganic phosphorus activators. What defines this method as a promising model for agriculture and ensures food security for future generations.

Keywords: efficiency, solubilization, fertilizer, low molecular weight organic acids, phosphate rock.



Introducción

Para dar solución a problemas que amenazan la seguridad alimentaria de la humanidad, las naciones Unidas a través de los objetivos de desarrollo sostenible adoptaron y adoptan programas y proyectos de investigación que emplean técnicas de agricultura sostenible para una producción más limpia, eficiente y además más resiliente (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, s.f.).

La investigación relacionada con la obtención limpia de fertilizantes y su eficiencia busca disminuir el uso de fertilizantes sintéticos que degradan y contaminan significativamente al medio ambiente, además, de una mejor eficiencia en la fertilización que ayuda a mantener regulados los procesos de los ecosistemas, como el ciclo de los nutrientes en el suelo y la descomposición de la materia orgánica (Hafez, Popov, y Rashad, 2021). Uno de los macronutrientes más importantes en la fertilización de los cultivos es el fósforo y este se encuentra en el suelo en muy pequeñas cantidades en forma disponible para la planta, lo que constituye un factor limitante para su crecimiento y el rendimiento de los cultivos.

Se han realizado estudios de mecanismos activadores de fósforo, los cuales actúan promoviendo la liberación de fosfato del suelo por medio de reacciones química e interacciones biológicas, aportando de esta manera a la mitigación del impacto que causa en las plantas la limitación de este macronutriente fundamental para su desarrollo. Dentro de estos mecanismos los que más se destacan por lograr resultados exitosos en investigaciones orientadas a encontrar fósforo disponible en la solución de suelo para las plantas son: 1) Bioinoculantes y biofertilizantes, incluidos organismos solubilizadores/solubilizantes de fosfatos y enzimas fosfatasas. 2) Materia orgánica, incluyendo ácidos orgánicos de bajo peso molecular, ácidos húmicos, lignina, residuos de cultivos, estiércol y biocarbón. (Zhu, Li y Whelan, 2018).

Por lo anterior, el estudio de la solubilización de la roca fosfórica (RF) con los ácidos orgánicos de bajo peso molecular (AOBPM) como el ácido oxálico (AO) (Protocolo propuesto en este trabajo) se hace necesario como una herramienta para el fortalecimiento de la agricultura sostenible a través de una metodología que aporta de forma positiva a la obtención de fósforo asimilable (Pa), además de que permite la introducción de prácticas más amigables tendientes a desarrollar cultivos con rendimientos óptimos y metodologías respetuosas con el medio ambiente.



El Suelo como Ecosistema

El suelo es un gran cuerpo natural que posee las condiciones adecuadas para dar vida a la diversidad microbiana que lo habita y es capaz de realizar procesos de transformación que ayudan al sostenimiento del mismo. El suelo está conformado por rocas y capas de otros elementos como humus, arcilla y arena, donde se desarrolla la mayor parte de los ciclos vitales microbianos, además de ser una importante fuente de macronutrientes y micronutrientes (Hernández et al., 2006). Estas condiciones hacen posible la presencia de microorganismos cuyas funciones metabólicas pueden aumentar la cantidad de nutrientes asimilables para la planta, fortalecer la relación simbiótica con la raíz y de esta manera facilitar el crecimiento vegetal. (Corrales Ramírez et al., 2014).

La progresiva degradación de los suelos, acelerada principalmente por la actividad humana, cuyas consecuencias van desde suelos erosionados, deforestación y contaminación hídrica impiden el desarrollo adecuado de los cultivos, obteniendo de esta forma productos agrícolas de baja calidad que finalmente no logran satisfacer las necesidades alimentarias demandadas por la sociedad (Sanzano, s.f.). Con el objetivo de mitigar este problema, los agricultores recurren al uso indiscriminado de fertilizantes químicos que contaminan y deterioran la calidad del suelo. Por esta razón, optar por alternativas eco-amigables resulta ser una buena opción para mejorar productividad y garantizar la protección ambiental.

Importancia del Fósforo para las Plantas

El fósforo constituye uno de los requerimientos indispensables para el crecimiento, desarrollo y funcionamiento de las plantas. Está clasificado como uno de los nutrientes primarios, ya que cumple funciones que no desempeñan otros nutrientes como el crecimiento y reproducción de la planta; se encuentra involucrado en el desarrollo de la raíz y el grano y, además, se encuentra constituyendo los fosfolípidos de las membranas celulares y del material genético. También cumple un papel metabólico como acumulador de energía y combustible para las actividades de fotosíntesis, glucólisis, respiración y síntesis de ácidos grasos (Corrales Ramírez et al., 2014).

A pesar de la importancia de este nutriente para las plantas, se cuenta con una muy baja disponibilidad de este elemento en la corteza terrestre, en vista de que, su movilidad en el suelo es restringida, de modo que, lo que la planta puede absorber son mínimas cantidades de fósforo. Debido a esta condición natural se ha generado un principal interés por encontrar alternativas que faciliten a las plantas la absorción de este elemento a través de la raíz y que a



su vez pueda incrementarse la concentración disponible de fósforo en la rizosfera (Huilcapi Salazar, 2007).

En los ecosistemas las rocas son las principales fuentes de reserva de fósforo, que asociadas al oxígeno forman grupos fosfatos. La exposición constante de estas rocas al ambiente, intemperie y/o lluvias facilita la absorción de estos fosfatos por medio de las raíces de las plantas debido a que estas condiciones favorecen la dilución de los mismos en los suelos. La cantidad de fósforo en el suelo se expresa como P_2O_5 y este se clasifica en fósforo orgánico e inorgánico (Corrales Ramírez et al., 2014).

Fósforo Orgánico

El fósforo orgánico se encuentra principalmente en restos vegetales y animales, es degradado por los microorganismos presentes en el suelo, estos permiten la hidrólisis del fósforo orgánico mediante enzimas, liberando de esta manera el fosfato asimilable por las plantas. Las principales formas de fósforo orgánico son fosfato de inositol, los ácidos nucleicos y fosfolípidos (Corrales Ramírez et al., 2014).

Fósforo Inorgánico

Está representado por el fósforo presente en minerales primarios como las apatitas, hidroxiapatitas y oxiapatitas, este no es asimilable por las plantas ya que es insoluble y de difícil solubilización. Pero existen algunas bacterias capaces de solubilizar el fósforo inorgánico a través de la producción de ácidos orgánicos tales como el ácido glucónico, el cual libera fosfatos y cationes al suelo que son fácilmente asimilables por las plantas. (Corrales Ramírez et al., 2014)

Ciclo del Fósforo

Como puede observarse en la Figura 1, la RF constituye uno de los mayores depósitos de fósforo en el mundo. El ciclo de este elemento comienza con los iones de fosfato disueltos que son liberados por la RF durante el proceso de meteorización donde se descompone y libera fosfatos, los cuales son absorbidos por las raíces de las plantas y distribuidos por todas sus células. A su vez, los animales lo adquieren al ingerir los vegetales, al morir las plantas y la secreción de los animales hace que este llegue de nuevo al ciclo como fósforo insoluble, donde las bacterias solubilizadoras efectúan su trabajo transformándolo en fosfatos inorgánicos disueltos. Una parte de estos fosfatos son arrastrados al mar, estos descienden al fondo y se convierten en formaciones rocosas y la otra parte es tomada por las algas, aves



marinas y peces que, al ser ingeridos finalmente por los seres humanos, permiten que el ciclo sea completado (Corrales Ramírez et al., 2014).

Figura 1

Ciclo del fósforo



Nota. La figura representa el ciclo del fósforo en los seres vivos. Tomado de (Corrales Ramírez, Arévalo Galvez, y Moreno Burbano, 2014)

Roca Fosfórica

Existe una gran preocupación por la disminución de las reservas de fósforo, debido a que con el paso del tiempo y el mal manejo dado por el hombre se han ido agotando. Ejemplo de esto son las rocas fosfóricas, las cuales constituyen la mayor fuente natural inorgánica del elemento (Chernoff y Orris, 2002). Las rocas fosfóricas son la base de la producción de fertilizantes fosfatados y productos industriales como suplementos para animales y detergentes, lo que las hace elementos de estudio de gran importancia económica. Estas rocas están compuestas por fosfato de calcio, el cual hace parte del grupo mineral apatita que se encuentra unido a iones de Cl, F y OH, esta forma es liberada de manera natural por efectos de la meteorización o extracción con ácidos fuertes y diferentes procesos físicos para la producción de fertilizantes (González, 2021). La extracción de la roca no es un proceso



económicamente sostenible y, además, la disponibilidad de fósforo logrado es bajo por lo que se ha venido intensificando este proceso, generando efectos adversos en los suelos y a su vez, la disminución de los depósitos de este recurso natural, lo que podría generar una carencia importante de este en aproximadamente 50 a 100 años, provocando problemas a nivel mundial de escasez de alimentos y de suelos improductivos. Sin embargo, con el pasar de los años nuevos yacimientos han sido encontrados y explotados alrededor del mundo como en Estados Unidos, que ocupa el primer lugar en explotación masiva, seguido de China, Marruecos y otros países en América Latina como Perú, México, Brasil y Colombia, los cuales han tenido un alto interés en este recurso para mejorar la agricultura (González, 2021).

La RF puede obtenerse de depósitos ígneos o depósitos sedimentarios en los cuales los procesos de meteorización son diferentes y determinan el contenido de fósforo presente en la roca fosfórica (Kauwenbergh, 2010). En la figura 2 puede observarse los diferentes depósitos de RF presentes en la tierra; en donde puede verse que Colombia posee depósitos sedimentarios localizados a lo largo de la cordillera oriental de los andes; el contenido de fósforo en forma de P_2O_5 de la RF se encuentra entre 20 y 30% y tan sólo contiene entre un 1,5 y 4,9% de fósforo asimilable (Pa). Los departamentos que tienen mayor participación en la producción en Colombia son Boyacá, Huila, Norte de Santander y Cauca, con una producción total de RF de aproximadamente 30 000 Toneladas (Fuentes de información ANM, 2015; FAO, 2007; Roma INGEOMINAS, 1987).



Figura 2

Depósitos donde se encuentra presente la RF



Nota. La figura representa la ubicación de los diferentes tipos de depósitos (ígneos y sedimentarios) de RF ubicados en el planeta tierra (FAO, 2007).

Microorganismos Solubilizadores de Fosfato

Los microorganismos solubilizadores de fosfato son aquellos capaces de transformar el fósforo insoluble en formas solubles accesibles para la planta. Pueden ser bacterias u hongos y en menor proporción los actinomicetos.

Las bacterias que más solubilizan fósforo son: *Pseudomonas*, *Azotobacter*, *Burkholderia*, *Bacillus* y *Rhizobium*. Y los hongos que solubilizan más este macronutriente son: *Aspergillus* y *Penicillium*. (Generalmente los hongos solubilizadores de fósforo producen más ácido que las bacterias, lo que permite una mayor solubilización de fósforo). Se ha puesto mayor interés en el estudio de actinomicetos ya que son organismos capaces de vivir en ambientes extremos (sequía-incendios) y poseen características potenciales (Producción de antibióticos y compuestos similares a fitohormonas) que podrían beneficiar el crecimiento de las plantas. Cuando se combina el efecto de las bacterias y hongos solubilizadores de fósforo, se obtiene mayor efectividad en la solubilización, ya que hay mayor colonización microbiana y la respuesta a la actividad fosfatasa es más alta que cuando



se trabajan por separado. Los hongos micorrizos arbusculares son microorganismos del suelo que forman simbiosis con el 80 % de las plantas terrestres. Su inoculación en cultivos de rendimientos similares ha mostrado que puede ayudar a reducir en un 80% el uso de fertilizantes fosfatados bajo ciertas condiciones. Los microorganismos solubilizadores de fósforo secretan enzimas que catalizan la mineralización del fósforo orgánico, las enzimas más comunes son las fosfatasas y las fitasas (son más predominantes en los suelos y promueven la producción de fósforo inorgánico) (Zhu, Li, y Whelan, 2018).

Mecanismos de Solubilización de Fosfato en el Suelo:

Enzimas Fosfatasas y Activadores de Enzimas

La actividad de las enzimas fosfatasas se extiende en entornos naturales y cumplen un papel muy importante en la regulación del fósforo orgánico al hidrolizar enlaces éster-fosfato, lo que conduce a la liberación de fosfato.

Normalmente, la actividad enzimática de los suelos aumenta al aumentar el pH del suelo y al adicionar enmiendas orgánicas como el estiércol de aves, lodos de depuradora, paja de cebada y alfalfa verde. Además, una alta cantidad de materia orgánica ofrece un hábitat óptimo para los microorganismos fuentes de fosfatasas y altas temperaturas estimulan el metabolismo microbiano, de tal forma que la actividad de las fosfatasas y la disponibilidad de nutrientes aumenta (Zhu, Li y Whelan, 2018).

Ácidos Orgánicos de Bajo Peso Molecular

Los ácidos orgánicos de bajo peso molecular son subproductos naturales que se generan a partir de las reacciones bioquímicas del suelo, aunque se encuentran en concentraciones muy bajas en los suelos (Oscilando entre 10^{-3} a 10^{-5} mol/L) actúan como activadores de fósforo en conjunto con la enzima fosfatasa. Estos ácidos pueden activar el fósforo inorgánico del suelo promoviendo la disolución de minerales poco solubles que contienen fósforo inorgánico a partir de la disminución de pH del suelo o formando complejos con hierro (Fe), aluminio (Al) y calcio (Ca) para liberar fósforo combinado con estos iones, además promueven también la liberación de fósforo orgánico (Zhu, Li y Whelan, 2018).



Ácidos Húmicos y Lignina

Los ácidos húmicos y la lignina son compuestos orgánicos naturales de mayor peso molecular derivados de la descomposición de hojarasca vegetal. Pueden aumentar la disponibilidad de nutrientes como el fósforo mediante su descomposición y producción de iones H^+ , aumentando así, las concentraciones de fósforo soluble en suelos calcáreos, también formando ligandos orgánicos simples (Formando complejos iones metálicos especialmente de hierro y aluminio, los cuales están asociados a la fijación de fosfato) o con interacciones coloidales, ya que los ácidos húmicos pueden absorber metales fortaleciendo de esta manera la capacidad competitiva del fosfato.

La lignina es un precursor importante en la formación de sustancias húmicas y puede formar ácidos húmicos, por esto comparte características con ellos y puede facilitar la activación de fósforo a través de mecanismos similares en suelos calcáreos y franco-arcillosos. Al ser incorporada aumenta el contenido de fósforo disponible, fósforo total y la actividad de la fosfatasa (Zhu, Li y Whelan, 2018).

Residuos de Cultivos, Estiércol y Biocarbón

Los residuos de cultivos, estiércol y biocarbón actúan como fuentes de fósforo, ya que contienen fósforo inorgánico altamente soluble y fósforo orgánico lábil que al mineralizarse libera fósforo soluble a corto plazo.

Sin embargo, la transferencia de fósforo de los residuos de cosecha es relativamente bajo y variable en comparación con el estiércol, el cual es considerado un fertilizante inorgánico de fósforo que puede contener mayor cantidad de fósforo y más lábil. Una gran fracción del fósforo en el estiércol está disponible para la planta una vez es aplicado. Por otro lado, el biocarbón puede competir con los óxidos de Aluminio y Hierro para la sorción de fósforo soluble como los ácidos húmicos y ácidos fúlvicos (Zhu, Li y Whelan, 2018).

Método

Fue elegido e implementado un proceso de extracción sólido-líquido por su efectividad y la replicación adecuada de sus resultados. Se tuvo en cuenta variables como la relación Roca Fosfórica (RF) – Acido Oxálico (AO), la temperatura, el tiempo. Para ello, se emplearon cinéticas de solubilización de la RF a diferentes temperaturas para diferentes



relaciones de RF/AO; la solubilidad de la RF se evaluó a partir del fósforo asimilable (Pa) cuantificado por espectrofotometría visible.

Roca Fosfórica y Ácido Orgánico Usado

La RF se obtuvo de una casa comercial con el nombre de fosforita, con ficha técnica de composición garantizada de P total (Pt) (% P_2O_5) 26,00 % y Pa (% P_2O_5) 1,50 %. El ácido orgánico usado fue ácido oxálico (AO) dihidratado de grado marca PANREAC.

Diseño Experimental

El montaje y desarrollo de este proceso se realizó en las instalaciones de la Universidad de Antioquia, Colombia en el Grupo GIEM adscrito al Instituto de Química de la Facultad Ciencias Exactas y Naturales.

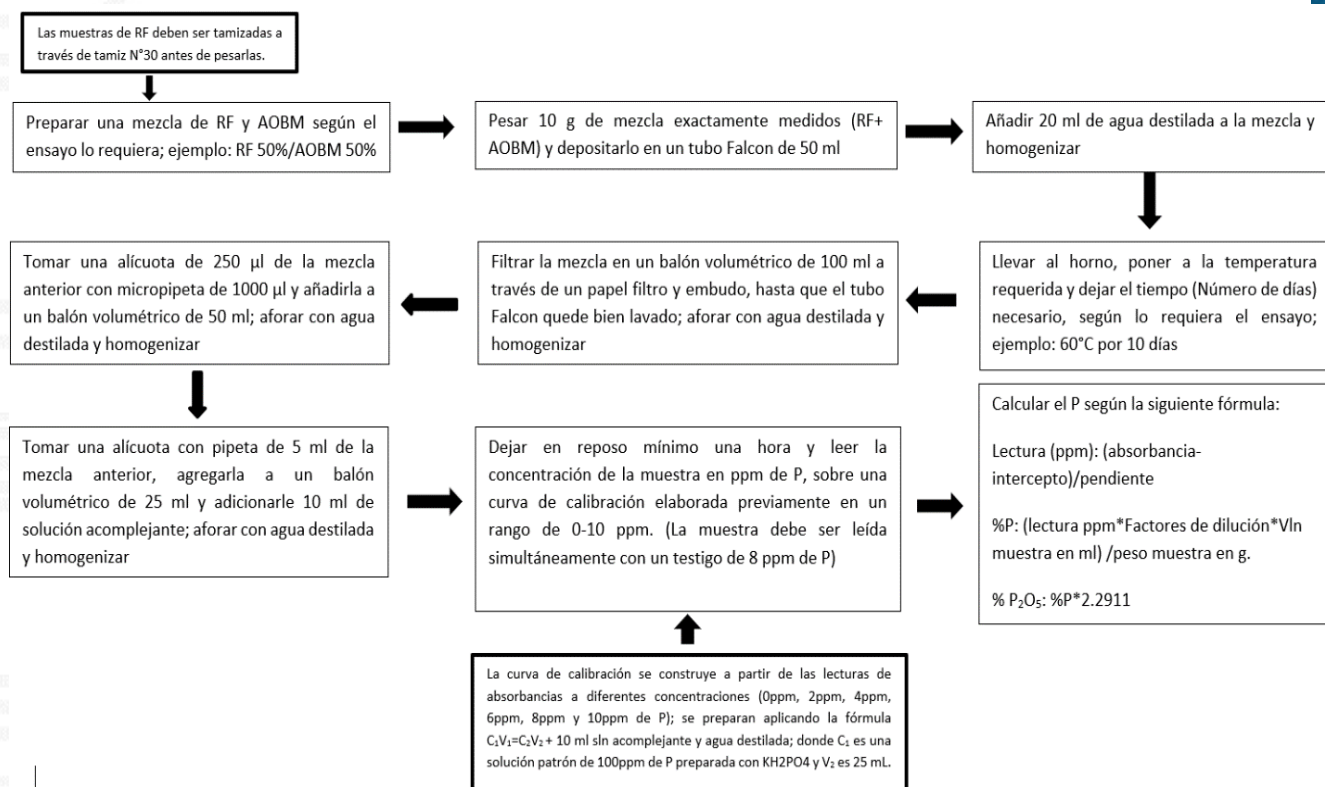
Para poder evaluar la solubilidad de la Roca fosfórica en presencia de ácidos de bajo peso molecular:

1. Se evaluó la cantidad de fósforo total P_t (% P_2O_5) que contenía la roca fosfórica comercial, para ello se llevaron a cabo 4 ensayos por triplicado analizando dicho parámetro y el fósforo asimilable Pa, como datos de partida de la Investigación.
2. Luego se realizó un ensayo de solubilidad de la roca en agua, la cual sirve como base de comparación para los tratamientos con ácidos orgánicos de bajo peso molecular (AOBPM).
3. Se realizaron los ensayos de solubilización de Roca Fosfórica con AOBPM, para ellos se aplicó el diagrama presentado a continuación, el cuál describe la metodología usada para realizar la extracción de la roca fosfórica con el ácido oxálico (ácido orgánico de bajo peso molecular). Para ello no solo se emplearon relaciones variables de la muestra “Roca Fosfórica (RF)+ Ácido Oxálico (AO)”, sino también intervalos de temperaturas de 25 a 70 °C, tiempos entre 0 y 18 días y condiciones controladas de humedad.



Figura 3

Diagrama de flujo, extracción de la roca fosfórica (RF) con ácidos orgánicos de bajo peso molecular (AOBM)



Nota. Las abreviaturas tienen los siguientes significados: P: Fósforo; % P: Porcentaje de fósforo; % P₂O₅: Porcentaje de Fósforo asimilable medido como óxidos de fósforo (P₂O₅); RF: Roca Fosfórica; AOBM: Ácidos Orgánicos de Bajo Peso Molecular; C: Concentración; V: Volumen.

El diagrama de la figura 3 describe la metodología usada para realizar la extracción de la roca fosfórica con el ácido orgánico de bajo peso molecular (ácido oxálico), con una solución acomplejante de molibdovanadato preparada con molibdato y metavanadato de amonio.



Resultados

1. Evaluación del Fósforo Total y Fósforo Asimilable en la Roca Fosfórica Comercial

En las siguientes tablas se presentan los resultados obtenidos de la cuantificación de fósforo total (Pt) y fósforo asimilable (Pa) en forma de % P_2O_5 para la roca fosfórica usada durante este proyecto de investigación.

Tabla 1

Evaluación de Fósforo total Pt como % P_2O_5 , en cuatro ensayos diferentes por triplicado

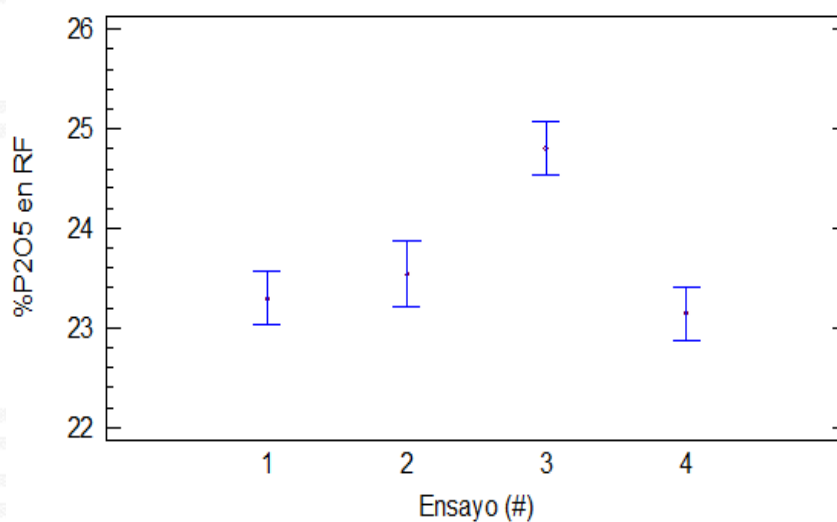
Muestras	Pt (% P_2O_5)	Medias para Pt vs Ensayo con 95,0% de Intervalo de confianza					
		Ensayo	Réplicas	Media	Error estándar	Límite inferior	Límite superior
Pt - RF 2019 - 1	23,3517						
Pt - RF 2019 - 2	22,9238	1	3	23,2983	0,160524	23,0299	23,5667
Pt - RF 2019 - 3	23,6193						
Pt - RF 2019 - 1	23,3609						
Pt - RF 2019 - 2	23,7050	2	2	23,533	0,196602	23,2042	23,8617
Pt - RF 2019 - 3	-						
Pt - RF 2019- 1	24,6468						
Pt - RF 2019- 2	25,0875	3	3	24,8041	0,160524	24,5357	25,0725
Pt - RF 2019- 3	24,6781						
Pt - RF 2021 - 1	22,9362						
Pt - RF 2021 - 2	23,4046	4	3	23,1411	0,160524	22,8727	23,4095
Pt - RF 2021 - 3	23,0825						
		Total	11	23,7088			
		Sin ensayo 3	8	23.2980			

Nota. Pt: Fósforo Total. RF= Roca Fosfórica. Análisis estadístico de la cuantificación de Pt como % P_2O_5 presente en la RF



Figura 4

Gráfico de medias; Cuantificación de Pt como P₂O₅ en Roca Fosfórica comercial



Nota. RF= Roca Fosfórica. El gráfico permite identificar la variación promedio de la cantidad de Pt presente en los diferentes ensayos.

Tabla 2

Evaluación de Fósforo asimilable Pa (% P₂O₅) en tres ensayos diferentes por triplicado

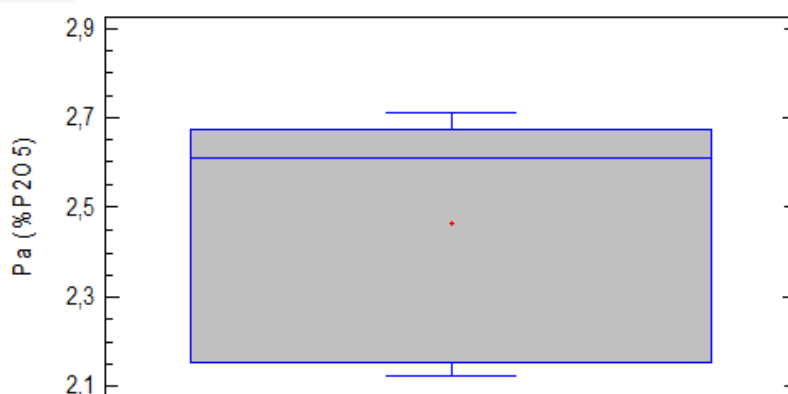
Muestra	Pa (%P ₂ O ₅)	Resumen estadístico	
Pa - RF - 1		Conteo	8
Pa - RF - 2	2,6364	Promedio	2,46341
Pa - RF - 3	2,5844	Desviación Estándar	0,269031
Pa - RF - 1	2,1416	Coef. de variación	10,921%
Pa - RF - 2	2,1237	Mínimo	2,1237
Pa - RF - 3	2,1609	Máximo	2,712
Pa - RF - 1	2,7120	Rango	0,5883
Pa - RF - 2	2,6963		
Pa - RF - 3	2,6520		

Nota. Pa = Fósforo asimilable. RF= Roca Fosfórica. Nota: Análisis estadístico de la cuantificación de Pa como % P₂O₅ presente en la RF



Figura 5

Gráfico de medias; Cuantificación de Pa como P₂O₅ en Roca Fosfórica comercial



Los resultados de la cuantificación de fósforo total (Pt) y fósforo asimilable (Pa) presente en la roca fosfórica empleada están acordes a los arrojados por la literatura donde informan que el % P₂O₅ presente en rocas fosfóricas de los suelos de esta investigación se encuentran entre 15-30 % y para el ensayo en mención dio un valor de 23,3 % y un porcentaje de fósforo asimilable entre 1,5 y 4,9 % y la RF usada en esta investigación corresponde a 2,5 % de P₂O₅.

2. Solubilización de la Roca Fosfórica con Agua.

En la tabla se puede ver la influencia de adicionar agua a la roca fosfórica y someterla a una temperatura de 60 °C, lo que favorece la disponibilidad de fósforo, aumentándolo en un 29,4 % aproximadamente. Independientemente del número de días al que fue sometido, el porcentaje de fósforo solubilizado fue constante.



Tabla 3

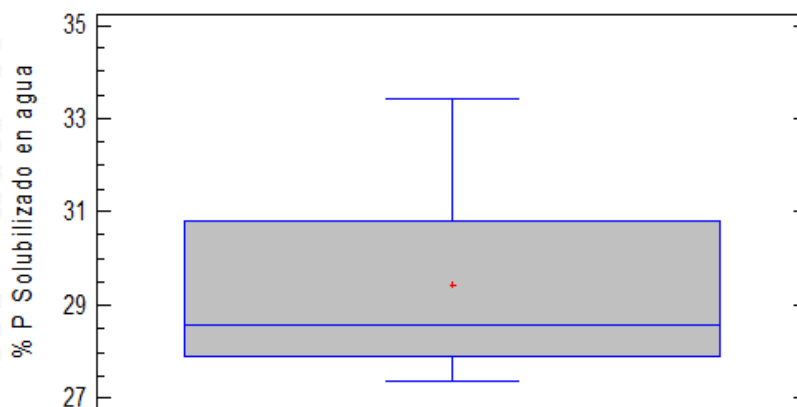
Cinética de solubilización de la roca fosfórica con agua a 60 °C y 10 días.

Tiempo (días)	%P Solubilizado en H ₂ O	Resumen estadístico	
0	28.7 ± 0.1 %	Conteo	6
2	33.4 ± ----%	Promedio	29,4333
3	27.4 ± 5.3 %	Desviación Estándar	2,26686
6	27.9 ± 4.1 %	Coef. de variación	7,70169%
8	30.8 ± --- %	Mínimo	27,4
10	28.4 ± 2.2 %	Máximo	33,4
		Rango	6,0

Nota. % P = Porcentaje de fósforo. Análisis estadístico del porcentaje de solubilización de la RF con agua

Figura 6

Gráfico del % P solubilizado en agua a diferentes días



3. Determinación de la Relación Roca fosfórica/ Ácido Oxálico siguiendo el Fósforo Asimilable

La tabla 4 muestra los resultados de la cuantificación de fósforo asimilable en forma de P₂O₅ para las diferentes relaciones Roca Fosfórica-Ácido Oxálico, cubriendo un rango de 0 a 50 % de ácido Oxálico, dichos análisis se realizaron por duplicado. Cada mezcla fue



sometida a una temperatura de 60 °C, tiempo de reacción de 10 días y se debió humectar con 20 mL de agua destilada.

Tabla 4

Evaluación del porcentaje de Fósforo asimilable (Pa) de la Roca Fosfórica a diferentes relaciones Roca Fosfórica/Ácido Oxálico

Tratamiento	Mezcla Roca fosfórica (RF) con Ácido Oxálico (AO)		% Ácido Orgánico de Bajo Peso Molecular (AOBPM)	Pa (%P ₂ O ₅) T 60°C a 10 días
	RF (g)	AO (g)		
1 (control)	10.0	0.0	0.0 %	2.463
2	8.0	2.0	20.0 %	2,908
3	7.0	3.0	30.0 %	5,400
4	6.0	4.0	40.0%	8,200
5	5.0	5.0	50.0%	10,809

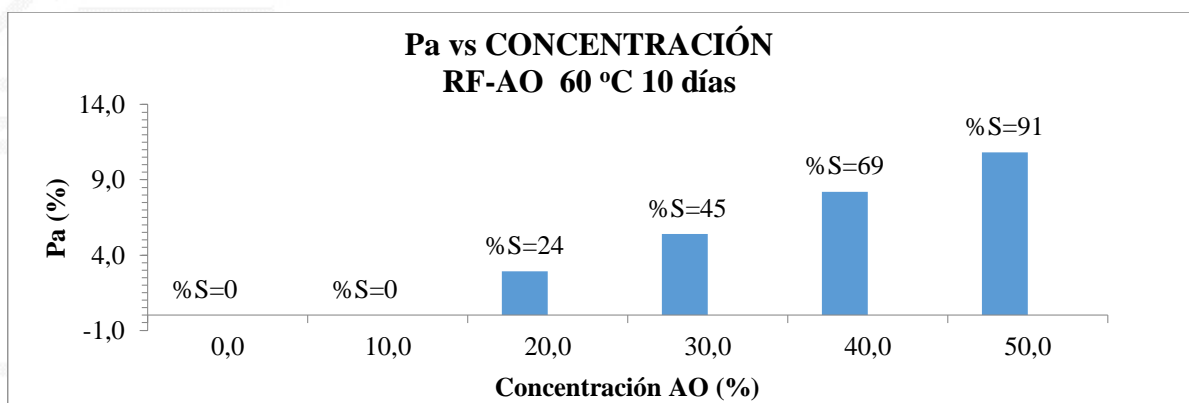
Nota. La tabla permite visualizar los ensayos de solubilización empleando relaciones variables de la muestra Roca Fosfórica (RF) – Ácido Oxálico (AO). T: Temperatura.

De acuerdo con los resultados registrados en la tabla anterior, la mejor relación corresponde a la Roca fosfórica 50 % - Ácido oxálico 50 % aproximadamente 10,8 % de (Pa) (% P₂O₅) equivalente a un porcentaje de solubilización (% S) de 91 % a los 10 días y 60 °C (ver figura 7).



Figura 7

Ensayo de solubilización de la Roca Fosfórica en diferentes proporciones RF-AO



Nota. Las abreviaturas tienen los siguientes significados. Pa: Fósforo asimilable. RF: Roca Fosfórica. AO: Ácido Oxálico. AOBPM: Ácido Orgánico de Bajo Peso Molecular. % S: Porcentaje de Solubilidad.

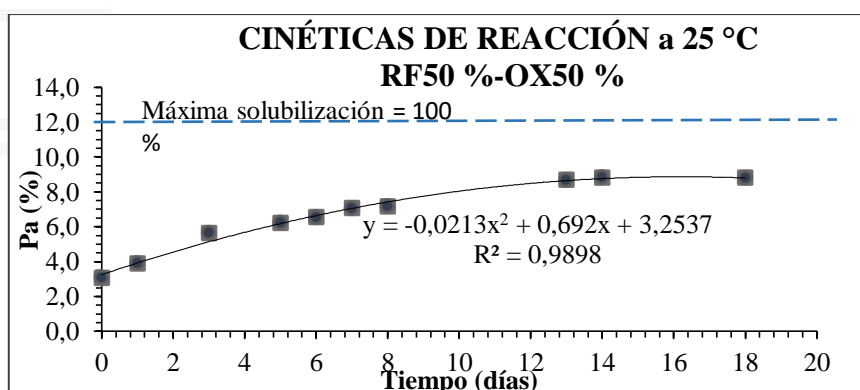
La Figura 7 muestra cómo varía la solubilidad de la roca fosfórica de acuerdo con las proporciones de RF/AO empleadas para el proyecto de investigación.

Con la mejor relación “RF+AO” se realizaron las cinéticas de reacción a las siguientes temperaturas 25, 40, 50, 60 y 70 °C, siguiendo la solubilidad de la roca fosfórica a partir del Pa (% P₂O₅), a los 0, 1, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 13, 14, 18 días, todas las muestras fueron realizadas también por duplicado y cuyos resultados se observan en las siguientes figuras:



Figura 8

Cinética de reacción de solubilización de la Roca Fosfórica a 25 °C

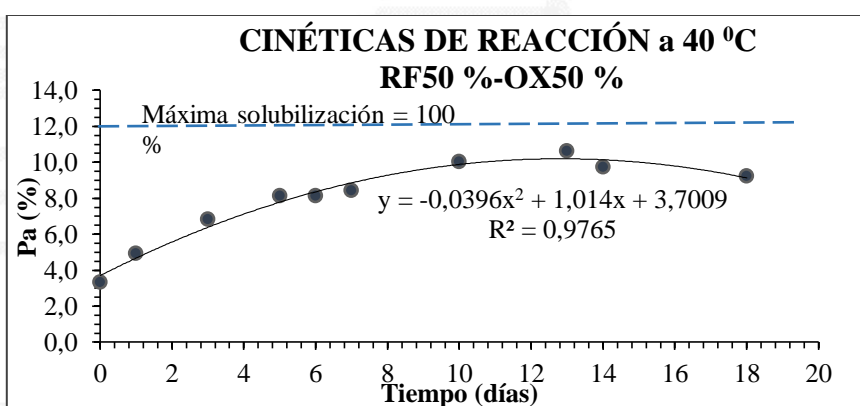


Nota. Las abreviaturas tienen los siguientes significados. Pa: Fósforo asimilable. RF: Roca Fosfórica. OX: Ácido Oxálico

La Figura 8 muestra el comportamiento de la cinética de reacción de la roca a un periodo de 18 días y bajo condiciones de temperatura controladas (25 °C). Se identifica que en el día 13 el porcentaje de fósforo asimilable comienza a estabilizarse, alcanzando un máximo de 8,8 % Pa en el día 14, lo que equivale a un porcentaje de solubilización de la roca fosfórica de 74 %.

Figura 9

Cinética de reacción de solubilización de la Roca Fosfórica a 40 °C



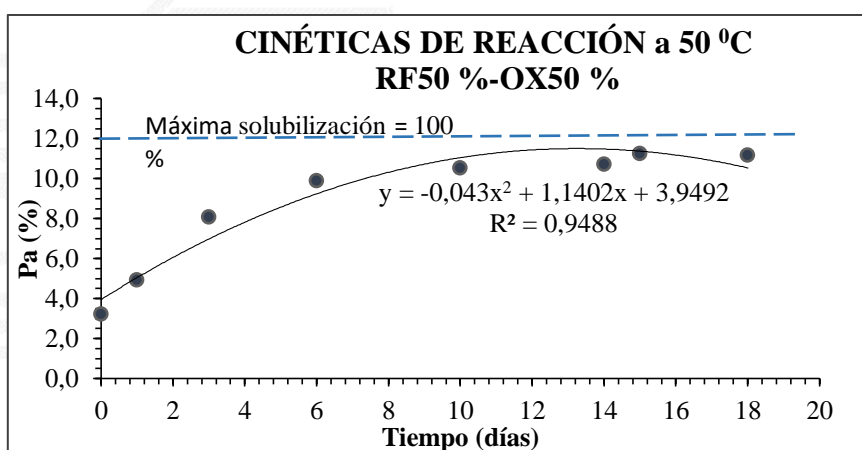
Nota. Las abreviaturas tienen los siguientes significados. Pa: Fósforo asimilable. RF: Roca Fosfórica. OX: Ácido Oxálico



La Figura 9 muestra el comportamiento de la cinética de reacción de la roca a un periodo de 18 días y bajo condiciones de temperatura controladas (40 °C). Se puede ver que el porcentaje máximo de fósforo asimilable es de 10,6 %, lo que corresponde a un porcentaje de solubilización del 89 % que es alcanzado durante el 13avo día. A partir de este día, la capacidad de solubilización decrece o empieza a estabilizarse.

Figura 10

Cinética de reacción de solubilización de la Roca Fosfórica a 50 °C



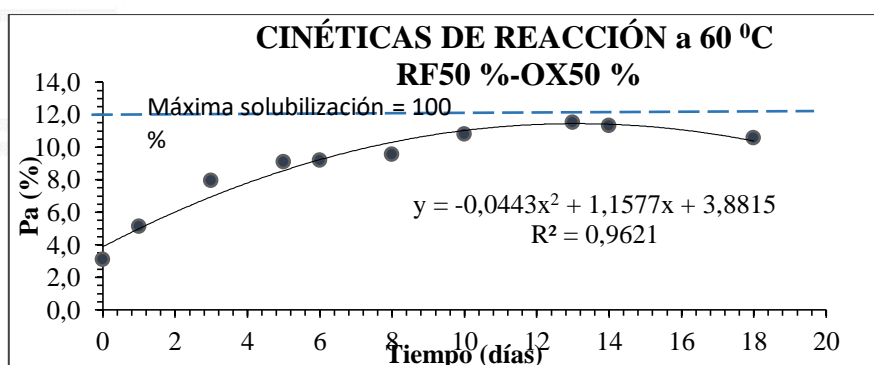
Nota. Las abreviaturas tienen los siguientes significados. Pa: Fósforo asimilable. RF: Roca Fosfórica. OX: Ácido Oxálico

La Figura 10 muestra el comportamiento de la cinética de reacción de la roca a un periodo de 18 días y bajo condiciones de temperatura controladas (50 °C). Se puede ver cómo va en aumento el fósforo asimilable y a partir del día 13, luego de obtener un máximo porcentaje de fósforo asimilable de 11,2 %, que corresponde a un porcentaje de solubilidad de 94 %. La capacidad de asimilar fósforo empieza a tener un comportamiento constante.



Figura 11

Cinética de reacción de solubilización de la Roca Fosfórica a 60 °C

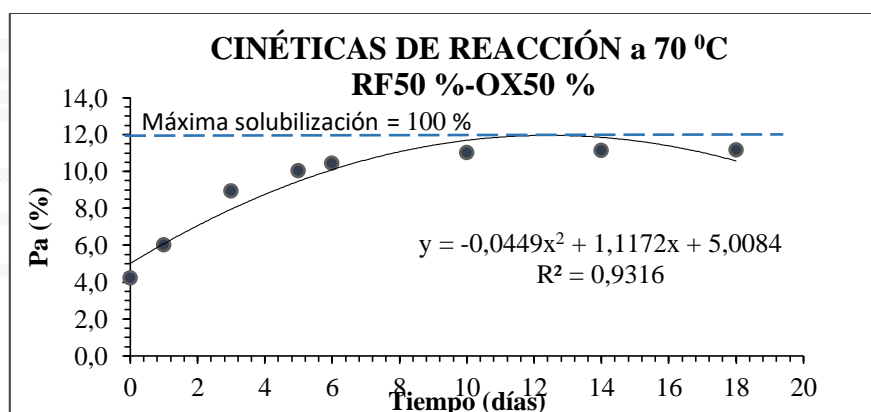


Nota. Las abreviaturas tienen los siguientes significados. Pa: Fósforo asimilable. RF: Roca Fosfórica. OX: Ácido Oxálico

La figura 11 corresponde al comportamiento cinético de reacción de la roca a un periodo de 18 días y bajo condiciones de temperatura controladas (60 °C). En el día 13 se alcanza el mayor porcentaje de fósforo asimilable 11,5 % que corresponde a una solubilización de 97%. Y luego, comienza a disminuir o empieza a estabilizarse el porcentaje de fósforo que puede solubilizarse.

Figura 12

Cinética de reacción de solubilización de la Roca Fosfórica a 70 °C



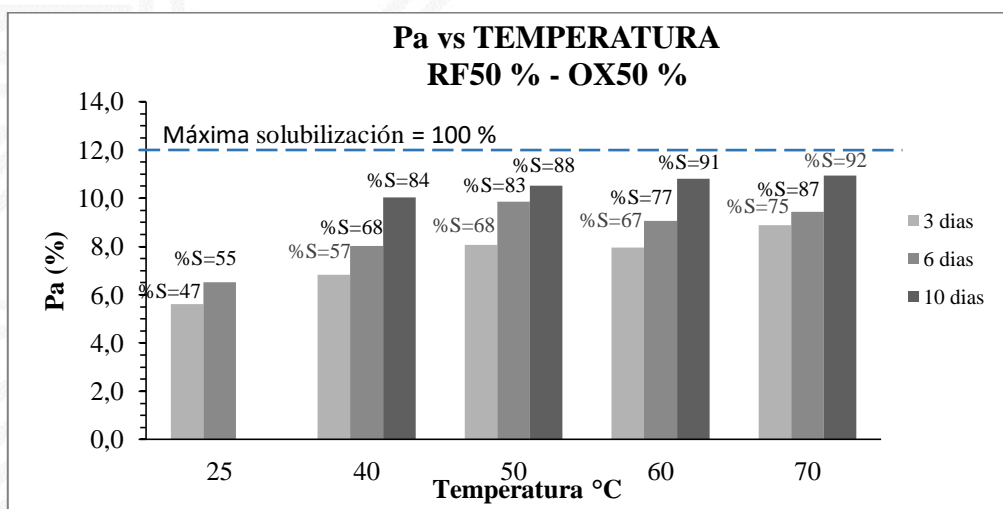
Nota. Las abreviaturas tienen los siguientes significados. Pa: Fósforo asimilable. RF: Roca Fosfórica. OX: Ácido Oxálico



La Figura 12 muestra el comportamiento de la cinética de reacción de la roca a un periodo de 18 días y bajo condiciones de temperatura controladas (70 °C). Aproximadamente en el día 11 se alcanza el mayor porcentaje de fósforo asimilable del 11,95 % que corresponde a una solubilización del 100 % y es la máxima tasa de solubilización de todas las temperaturas a las que fueron sometidas las mezclas (La cinética de solubilización que mejor funciona para la extracción de la roca fosfórica). Desde este día la reacción aparentemente se estabiliza, lo que quiere decir que la capacidad de solubilización empieza a mantenerse constante.

Figura 13

Gráfico comparativo Temperaturas Vs % Pa



Nota. Las abreviaturas tienen los siguientes significados. Pa: Fósforo asimilable. RF: Roca Fosfórica. OX: Ácido Oxálico. % S: Porcentaje de solubilidad

La figura 13 muestra el incremento en el porcentaje de solubilidad dado a 5 diferentes temperaturas: 25, 40, 50, 60 y 70 °C y en 3 específicos momentos: 3, 6 y 10 días. Un comparativo donde se aprecia qué variables, como el tiempo y la temperatura, influyen en la solubilidad del fósforo. Puede apreciarse cómo la obtención de fósforo disponible va en aumento proporcionalmente al aumento de temperatura. Pero a partir de los 50 °C de temperatura, las diferencias entre la cantidad de fósforo capaz de transformar el ácido empiezan a reducirse, principalmente durante el décimo día donde puede observarse un



patrón más bien constante de fósforo asimilable, acercándose al máximo porcentaje de fósforo asimilable logrado. Esto demuestra la influencia del proceso térmico y la variable número de días en el ensayo.

Discusión

Existen diferentes métodos de formulación de fertilizantes, que fortalecen los procesos de transformación de fósforo insoluble a fósforo soluble. Esta propuesta planteó la adición de ácidos orgánicos de bajo peso molecular (AOBPM) para favorecer la obtención o activación de fósforo inorgánico altamente soluble y disponible para la planta. Además, el control de ciertas variables como la temperatura y el tiempo, permite optimizar el proceso de solubilización del fósforo. Lo que define este método como un modelo promisorio para el fortalecimiento de la agricultura sostenible es que los AOBPM son subproductos naturales que se generan a partir de reacciones bioquímicas del suelo durante los procesos de descomposición y meteorización, por lo tanto, el uso del ácido oxálico como agente solubilizador de la Roca fosfórica (RF) resulta ser una alternativa ambientalmente limpia, que a su vez, contribuye a garantizar la seguridad alimentaria para las generaciones futuras.

A partir de los datos arrojados en esta investigación, se encontró que la roca fosfórica usada para este estudio tenía un muy bajo porcentaje de fósforo soluble, cuyo valor corresponde a tan sólo un 10 % del fósforo total contenido por la roca. Mientras que al analizar la proporción que mejor funcionaba para el proyecto, se halló que la relación que mejor se comporta es la 1:1, es decir, Roca Fosfórica 50 % - Ácido Oxálico 50 % donde se alcanzó un porcentaje de fósforo asimilable de un 11 %, lo que mejora el porcentaje de fósforo soluble en un 91 %. Por esta razón es escogida esta relación, con la cual se establecen las diferentes cinéticas de solubilización donde se encuentra que la temperatura y el número de días a los que se obtienen mejores resultados son a partir de los 50 °C y los 13 días, pero la que logra la mayor tasa de solubilidad es la de 70 °C y 11 días, ya que alcanza un porcentaje de solubilización de fósforo de 100 %, lo que significaría mayor cantidad de fósforo que podría ser absorbido por las raíces de la planta para su nutrición y crecimiento; a partir de este trabajo se propone formular fertilizantes que incluyan como fuente de fósforo mezclas de RF:AO logrando de esta manera mitigar el problema por la limitada cantidad de fósforo asimilable en los suelos.



Encontrar la proporción óptima resulta lo ideal, ya que entre menos cantidad de ácido sea aplicado menor es el daño que puede terminar haciéndosele al medio ambiente, porque la adición de ácido a los suelos disminuye su pH, convirtiéndolos en suelos ácidos, que finalmente no son los más aptos para la producción agrícola; se propone investigar la eficiencia de solubilización de la RF con otros ácidos de bajo peso molecular como son: fórmico, acético, propiónico, butírico, malónico, succínico, glutárico, adípico, ftálico, cítrico. Además, según Jalali y Jalali (2020), afirma que 16 días de extracción contribuyen a mejorar la estimación de la solubilidad de fósforo. Para este estudio se escogió un tiempo equivalente a 18 días con el que se pudo obtener resultados satisfactorios y una visión amplia del comportamiento del fósforo asimilable a diferentes temperaturas. En la mayoría de las gráficas se aprecia cómo el fósforo asimilable va aumentando de manera proporcional desde el día cero hasta que alcanza el punto más alto de solubilización de fósforo a los 13 días y por lo regular tiende a estabilizarse o mantenerse constante la cantidad de fósforo disponible hasta que cumple el periodo de tiempo de 18 días, al que fue sometido el ensayo. Conforme a lo expresado anteriormente, encontrar la relación óptima y el tiempo de extracción adecuados permite perfeccionar el método de extracción de fósforo asimilable y obtener mejores resultados, como lo interpreta Jalali y Jalali (2020), quienes plantean que el porcentaje de fósforo asimilable en agua que puede extraerse de fertilizantes fosfatados depende básicamente de factores como la naturaleza de la roca empleada para la producción del fertilizante y la técnica de determinación de la solubilidad usada.

Por otro lado, se pudo verificar que los ácidos orgánicos de bajo peso molecular como el ácido oxálico son importantes agentes activadores de fósforo ya que como se encontró en el estudio de Chuang et al. (2007), la cantidad de fósforo asimilable obtenido a través de la síntesis lograda con el hongo *Aspergillus niger* puede deberse a la liberación de H^+ . Los ácidos orgánicos como el ácido oxálico producidos por bacterias y hongos intercambian protones H^+ acidificando el medio, formando complejos con elementos como el calcio presente en la composición de la roca y favoreciendo de esta manera la liberación de fósforo retenido en ella, permitiendo así la activación del mismo en sus formas disponibles para la planta. Asimismo, en investigaciones como la de Gonzáles (2021), donde se realizó una evaluación sobre la solubilización de fósforo de una roca fosfórica colombiana por *Aspergillus tubingensis* se pudo demostrar que el ácido oxálico es uno de los ácidos orgánicos de bajo peso molecular que mejor potencializa la solubilización de fósforo, se encontró que logra solubilizar más del 90 % de fósforo, porcentaje que coincide con la investigación



planteada por Oliveira Mendes et al. (2007), donde al experimentar con 8 tipos de roca fosfórica y ácidos orgánicos producidos por diferentes microorganismos se concluyó que el ácido oxálico solubiliza el 100 % de fósforo de la roca fosfórica resultando más eficiente que ácidos como el ácido sulfúrico, ya que tienen la facilidad de liberar más fósforo por mol de ácido aplicado. Además, el ácido oxálico reporta ser más estable en presencia de calcio ya que, puede formar complejos de oxalato y a su vez, permitir la solubilización de la roca fosfórica. Resultados que concuerdan con la presente investigación donde se habla de un porcentaje de solubilización cercano al 90 % para las pruebas realizadas a temperaturas mayores de 50 °C y 10 días o más; y aproximadamente a un 100 % de solubilidad para la mezcla que mejor comportamiento tuvo (70 °C y 11 días).

Otra ventaja del ácido oxálico sobre el ácido sulfúrico que es según Oliveira Mendes et al. (2007), el reactivo usualmente aplicado en la solubilización de la roca fosfórica para la fabricación de fertilizantes, es que el ácido oxálico forma oxalatos poco solubles con muchos metales potencialmente tóxicos que pueden estar presentes en la roca fosfórica como el Cobre, Níquel y Plomo, lo que puede reducir el riesgo de contaminación del suelo (Fomina, et al., 2005; Liang y Gadd, 2017). La capacidad del ácido oxálico para formar complejos estables con Calcio (Ca), lo convierte en una opción más eficiente para solubilizar la roca fosfórica. La solubilidad del oxalato de calcio es menor que la del sulfato de calcio, por lo tanto, el anión oxalato actúa como un sumidero de Calcio, más fuerte en la reacción de solubilización (Oliveira Mendes et al., 2007).

Aunque esta investigación tuvo resultados de solubilización de fósforo acordes a lo encontrado en la literatura y además pudo identificarse como variable fundamental para una mejor eficiencia en la solubilización, la proporción Roca Fosfórica/Ácido Oxálico, no se realizó pruebas con relaciones menores de roca fosfórica donde se comprobara lo dicho en investigaciones como la de Oliveira Mendes et al. (2007), donde se evidenció que la concentración de ácido oxálico constituía el factor principal que impulsaba la cinética de la reacción, pero era importante controlar este factor ya que, el exceso de ácido oxálico podría retardar la reacción debido a la incrustación de oxalato de calcio en la superficie de la roca fosfórica, mientras que a una menor cantidad de roca fosfórica, se obtenían mejores resultados, es decir, mayor porcentaje de fósforo solubilizado. No se trabajó con otros ácidos orgánicos de bajo peso molecular, que pudieron haber demostrado mejores resultados como los expuestos en la literatura, donde se dice que entre mayor número de grupos carboxilos tenga el ácido, mayor es su capacidad de solubilización como es el caso del ácido cítrico, el



cual pertenece al grupo de los ácidos tricarboxílicos, por lo cual es importante también realizar estudios que permitan reconocer su eficacia.

Conclusiones

Se logró identificar la suficiencia del ácido oxálico como agente activador de fósforo asimilable en la obtención del mismo, tratando de manera eficiente a la roca fosfórica, mineral reconocido por su gran estabilidad; con diferentes concentraciones de ácido oxálico. Se reconoció como mayor rendimiento en la solubilización de fósforo a la proporción 1:1 de mezcla usada (Roca fosfórica 50 % - Ácido Oxálico 50 %), a una temperatura de 70 °C y un espacio de tiempo de 11 días. Además, se observó que existe una correlación entre el porcentaje de fósforo asimilable y el número de días que se dejó el ensayo, donde hay una tendencia de crecimiento en todos los gráficos a partir del día cero del ensayo y en el día 13 comienza a tomar una tendencia más estable durante el tiempo y se verificó que factores como la temperatura aceleran el proceso de reacción, es decir, a temperaturas más altas para este caso de estudio desde los 50 °C se producen mejores resultados.

También pudo establecerse que, la cinética de solubilización solo con agua no alcanza a realizar la transformación del 100 % de la roca fosfórica a fósforo soluble, ya que con el paso del tiempo el porcentaje solubilizado permanece estable (para el lapso de 10 días y bajo temperatura de 60 °C). Mientras que, bajo estas mismas condiciones de temperatura y tiempo, la roca fosfórica (Tratada con AO) alcanzó un porcentaje de solubilidad de 91 %, lo que equivale a 3 veces el porcentaje máximo alcanzado en la cinética de solubilización solo con agua y a los 13 días logra realizar casi la transformación total de la roca fosfórica a fósforo soluble, alcanzando un porcentaje de 97 %. Es importante destacar que al cuantificar el fósforo soluble que tenía la roca fosfórica inicialmente sin ningún tipo de tratamiento, se encontró un valor muy bajo de solubilización (10 %), razón por la cual técnicas de extracción como la presentada en este trabajo son necesarias para alcanzar una mejor optimización del proceso de transformación del fósforo a formas que sean posibles de asimilar por la planta.



Referencias bibliográficas

- Chernoff, C., y Orris, G. (2002). *Data set of world phosphate mines, deposits, and occurrences: Part A. geologic data; Part B. location and mineral economic data.* USGS, 1-352.
- Chuang, C.-C., Kuo, Y.-L., Chao, C.-C., y Chao, W.-L. (2007). Solubilization of inorganic phosphates and plant growth promotion by *Aspergillus niger*. *Biol Fertil Soils*, pp. 575–584.
- Corrales Ramírez, L. C., Arévalo Galvez, Z. Y., y Moreno Burbano, V. E. (2014). Solubilización de fosfatos: una función microbiana importante en el desarrollo vegetal. *NOVA - Publicación Científica en Ciencias Biomédicas* Vol. 12 (21), pp. 67-79. ISSN: 1794-2470.
- FAO. (2007). Utilización de las rocas fosfóricas para una agricultura sostenible. En *Boletín FAO fertilizantes y nutrición vegetal*, Tema 13. Ext. 154 ISBN: 978-92-5-305030-7.
- Fayiga, A., y Nwoke, O. (2016). Phosphate rock: origin, importance, environmental impacts, and future roles. *Environmental Reviews*, Vol. 24 (4), pp. 403-415.
<https://doi.org/10.1139/er-2016-0003>.
- Fomina, M., Hillier, S., Charnock, J. M., Melville, K., Alexander, I. J., y Gadd, G. M. (2005). Role of oxalic acid overexcretion in transformations of toxic metal minerals by *Beauveria caledonica*. *Appl Environ Microbiol*, Vol. 71(1), pp. 371–381
[doi:10.1128/AEM.71.1.371-381.2005](https://doi.org/10.1128/AEM.71.1.371-381.2005).
- Fuentes de información ANM. (2015). *Producción Nacional de Minerales 2014*. Bogotá.
- González, V. (2021). Evaluación de la solubilización de fósforo de una roca fosfórica colombiana por *Aspergillus tubingensis*. Bogotá.
- Hafez, M., Popov, A., y Rashad, M. (2021). Integrated use of bio-organic fertilizers for enhancing soil fertility-Plant nutrition, germination status and initial growth of corn (*Zea Mays L.*). *Environmental Technology & Innovation*. Vol. 21, pp. 1-13.
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101329>
- Hernández, A., Ascanio, M., Morales, M., Bojórquez, I., García, N., y García, J. (2006). *Fundamentos sobre la formación del suelo, cambios globales y su manejo*. México: Universidad Autónoma de Nayarit. ISBN 968833072-8.



- Huilcapi, J. (29 de marzo de 2007). Aislamiento e identificación de bacterias fosfato solubilizadoras a partir de muestras de suelo y raíz, de diferentes cultivos de rosas de la provincia de Pichincha, Ecuador 2007. Sangolqui, Pichincha, Ecuador.
- Jalali, M., y Jalali, M. (2020). Effect of organic and inorganic phosphorus fertilizers on phosphorus availability and its leaching over incubation time. *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 27, pp: 44045-44058. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10281-6>
- Kauwenbergh, S. J. (2010). *World Phosphate Rock Reserves and Resources*. Muscle Shoals: IFDC Publications.
- Liang, X., y Gadd, G. (2017). Metal and metalloid biorecovery using fungi. *Microb Biotechnol.* Vol. 10 (5): pp.1199-1205. DOI: 10.1111/1751-7915.12767.
- Oliveira Mendes, G., Mansur Murta, H., Vasconcelos Valadares, R., Batista da Silveira, W., Ribeiro da Silva, I., y Dutra Costa, M. (2020). Oxalic acid is more efficient than sulfuric acid for rock phosphate solubilization. *Minerals Engineering*. Vol. 155: pp. 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106458>.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (s.f.). [fao.org](http://www.fao.org). [fao.org: http://www.fao.org/sustainable-development-goals/goals/goal-13/es/](http://www.fao.org/sustainable-development-goals/goals/goal-13/es/)
- Roma INGEOMINAS. (1987). Recursos minerales de Colombia, Tomo II. *Estudio para la caracterización del mercado nacional e internacional de minerales*. Bogotá.
- Sanzano, A. (s.f.). [edafologia.org](http://www.edafologia.org). [edafologia.org: http://www.edafo.com.ar/Descargas/Cartillas/Fosforo%20del%20Suelo.pdf](http://www.edafo.com.ar/Descargas/Cartillas/Fosforo%20del%20Suelo.pdf).
- Zhu, J., Li, M., y Whelan, M. (2018). Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: A review. *Science of the Total Environment*. Vol. 612: pp. 522-537. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.095>



TERCERA PARTE

TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN

Actualmente el uso de tecnologías ha facilitado la gestión y solución de problemáticas, que, si bien parecen cotidianas, el trasfondo que estas pueden poseer es más amplio. La aplicación de estas tecnologías depende ampliamente del campo de aplicación en el cual interactúen, por ello es importante definir el alcance que estas pueden poseer, teniendo en cuenta que los recursos con los que se pueden disponer en ciertos casos son limitados. Además, es necesario e indispensable tener presente que hoy en día todas las tecnologías y herramientas técnico científicas están acompañadas del uso de cierto software o se desarrollan en un ambiente computacional o virtual, las cuales pueden reducir de forma rudimentaria procesos complejos y difíciles de controlar. Estos ambientes computacionales son convenientes no sólo en el momento de afrontar dificultades en un campo en particular, sino también al impartir el debido conocimiento de cómo estos funcionan en áreas más específicas para la debida retroalimentación, en caso de ser necesaria.

La transición que han tenido las tecnologías y herramientas tecno-científicas, con el paso del tiempo ha permitido innovar en los diversos campos que han recurrido al uso de estas mismas, desde contextos relacionados con la virtualidad y las TIC. Esto unido al hecho de que al presentarse diversas problemáticas en las cuales su trasfondo puede generar problemáticas adicionales, es importante que dicha innovación se adapte a la posible resolución de situaciones con las que antes no se contaba.

Además, es importante que el uso de las tecnologías no genere inconvenientes a nivel humano, laboral, ambiental ni académico, por lo que es de gran importancia que en el desarrollo inicial y la aplicación de estas tecnologías se considere el impacto tanto positivo como negativo que estas puedan generar. Es por ello que se deben tener presente la importancia de no generar un conflicto medioambiental, esto se puede lograr al hacer uso de diversas energías renovables y materiales que no sean nocivos para la salud.

Por otro lado, se incentiva a la investigación relacionada no solo al uso de nuevas tecnologías o tecnologías mejoradas, sino con ese componente de conciencia que debería estar adherido a los nuevos desarrollos que implican el uso de la electrónica de vanguardia y lo que se extrae

de ella, como por ejemplo: la virtualidad, las comunicaciones de gran alcance, los nuevos elementos que interconectan a los seres humanos a gran distancia, entre otros.

En este capítulo se presentan diversos proyectos de investigación aplicada haciendo uso de tecnologías de vanguardia, innovando el uso que esta poseen actualmente y dando una solución práctica y efectiva a una problemática específica o un conjunto de estas. Esto en aras de reconocer su importancia para brindar soluciones a nivel laboral, lo que a su vez incentiva la producción académica en el contexto universitario.

Con estos proyectos se da apertura a nuevas investigaciones relacionadas no únicamente con nuevas tecnologías y la virtualidad que estas conllevan, sino también con una conciencia medio ambiental que permita delimitar el uso de diversos componentes que puedan generar un potencial riesgo a futuro para las sociedades venideras.

Además, estos proyectos permitirán interconectar las investigaciones a todos los contextos educativos, no únicamente de educación superior sino también de educación básica, considerando las posibles limitaciones que puedan poseer aquellos y aquellas estudiantes que quieran estar inmersos en el campo de la investigación tecnológica, innovadora y con conciencia.

JHOAN EDUAR PÉREZ VELÁSQUEZ⁴⁶

Docente Ingeniería Mecánica y Electrónica

Universidad INCCA de Colombia

⁴⁶ Físico, Ms. en Física, Doctorado en Ciencias Físicas. Experiencia en educación superior en la Universidad INCCA de Colombia, Universidad Militar Nueva Granada, Universidad de los Andes, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, en los campos de Física Básica, y matemática en los primeros ciclos. Publicación de tres artículos de investigación relacionados con los procesos termonucleares en estrellas. jhoaneduar.perez@uincca.edu.co

CAPÍTULO XII

Simulador desactivación y neutralización de artefactos explosivos para entrenamiento en la Escuela de Ingenieros Militares

Simulator for the deactivation and neutralization of explosive devices for training at the Escuela de Ingenieros Militares

Luis Alfredo Varela Reyes ⁴⁷
Yasser Alfonso Penagos Obando ⁴⁸
Jorge Enrique Fonseca Becerra ⁴⁹
Juan Gabriel Bustos Aldana ⁵⁰
Rubén Alarcón Pabón ⁵¹
Juan Pablo Flórez Torres ⁵²

Resumen

La investigación y el desarrollo tecnológico presentados tienen el fin de brindar a los militares pertenecientes al Ejército Nacional de Colombia, un conjunto de herramientas que permitan la familiarización con las situaciones y elementos a los que se pueden llegar a enfrentar durante los diferentes escenarios, en lo que refiere a su encuentro con Artefactos Explosivos (AE). Los AE son muy utilizados por grupos armados organizados con el fin de atentar contra la fuerza pública y la población civil, es así como la fuerza pública en general debe idear y adoptar métodos para combatir este flagelo. Como resultado del proceso de investigación, se obtuvo un sistema constituido por tres componentes que harán parte oficial de la formación que reciben los militares en el curso militar técnico en explosivos de la Escuela de Ingenieros Militares: Un componente práctico de elaboración de circuitos y maquetas que emulen los AE basados en la inventiva propia del estudiante o de la base de datos de elementos incautados a grupos terroristas o recuperados en acciones terroristas. Dos componentes de simulación, uno en una cabina con efectos controlados en donde se pone en práctica los procesos de desactivación sobre maquetas funcionales; el segundo componente de simulación es en campo abierto, allí también se usan las maquetas elaboradas por los estudiantes las cuales en caso de ser activadas generan unos efectos de explosión basados en elementos pirotécnicos que buscan dar realismo a la situación y reducir al mínimo el riesgo de accidentes en el proceso de formación.

Palabras clave: artefactos explosivos, municiones sin explotar, artefactos explosivos improvisados, minas anti-personal.

⁴⁷ Ingeniero electrónico. Investigador Escuela de Ingenieros Militares. Bogotá, Colombia. <https://orcid.org/0000-0003-3322-752X>. luisvarelareyes@cedoc.edu.co

⁴⁸ Profesional en Ciencias Militares. Oficial Ejército Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. <https://orcid.org/0000-0003-1813-2418>. yasser.penagos_vp@gmail.com

⁴⁹ Químico. Investigador Escuela de Ingenieros Militares. Bogotá, Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-8670-7597>. jorge.fonsecab@esing.edu.co

⁵⁰ Ingeniero de Sistemas. Suboficial MARTE Escuela de Ingenieros Militares. Bogotá, Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-1313-6328>. juan.bustos@buzonejercito.mil.co

⁵¹ Administrador de Empresas. Suboficial MARTE Escuela de Ingenieros Militares. Bogotá, Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-8456-6807>. rubenchoalpa@gmail.com

⁵² Tecnólogo en Ciencias Militares. Suboficial Ejército Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. <https://orcid.org/0000-0001-6513-8754>. juanpabloft.09@gmail.com



Abstract

The research and technological development presented are intended to provide to military members of the Colombian National Army with a set of tools that allow them to become familiar with the situations and elements to be lost that can be learned to experience during the different scenarios, in which refers to his encounter with Explosive Devices (AE). The AE are widely used by organized armed groups in order to try against the public force and the civilian population, this is how the public force in general must devise and adopt methods to combat this scourge. As a result of the investigative process, a system is obtained consisting of these components that will be an official part of the training received by the military in the explosives technical military course of the School of Military Engineers: A practical component for the elaboration of circuits and models that emulate the AE based on the student's own inventiveness or the database of items seized from terrorist groups or recovered in terrorist actions. Two simulation components, one in a cabin with controlled effects in a deactivation process put into practice on functional models; the second simulation component is in the open field, where the models made by the students are also used, which, if activated, generate explosion effects based on pyrotechnic elements that seek to give realism to the situation and reduce the minimize the risk of accidents in the training process.

Keywords: explosive devices, unexploded ordnance, improvised explosive devices, anti-personnel mines.



Introducción

Los artefactos explosivos suelen ser muy utilizados por Grupos Armados Organizados (GAO) al margen de la ley, con el fin de atentar contra la fuerza pública y la población civil causando terror y serias afectaciones físicas y mentales a las víctimas, afectaciones en su mayoría irreversibles. Estadísticamente y acorde a los datos presentados por la Oficina del Alto Comisionado para la Paz - Descontamina Colombia (Descontamina Colombia, 2021) con corte al día 30 de septiembre de 2021, Colombia contabiliza un total de 12.103 víctimas por minas antipersonal y munición sin explotar.

Esta problemática ha dejado heridas al 81 % (9770) de las víctimas y el 19 % (2333) personas han fallecido a causa del accidente, es decir, aproximadamente en 1 de cada 5 casos la víctima fallece. Por otra parte, Colombia ha sido uno de los países del mundo con mayor cantidad de víctimas de la fuerza pública y esto ha significado que del total de víctimas, el 60 % han sido integrantes de la fuerza pública y el 40 % restante, corresponde a civiles. (Descontamina Colombia, 2021, párr. 2)

En el auge del conflicto, más exactamente en el año 2006 se presentó el más alto número de víctimas por año, dejando un total de 1224 víctimas, presentándose 790 de la fuerza pública y 434 civiles. En los años posteriores estas cifras anuales han ido descendiendo notablemente, en especial a partir del año 2016, como se presenta en la tabla 1, esto, gracias al desescalamiento del conflicto. Los incidentes con Artefactos Explosivos se concentran en cinco departamentos, tradicionalmente muy golpeados por el conflicto armado interno de Colombia, estos son: Antioquia, Meta, Nariño, Norte de Santander y Caquetá, con la frecuencia descrita en la tabla 2.



Tabla 1

Víctimas de minas antipersonal por año en Colombia

Año	Civil	Fuerza pública	Total
2006	434	790	1224
2016	38	52	90
2017	40	17	57
2018	94	85	179
2019	65	49	114
2020	109	64	173
2021	72	42	114
Total	4836	7267	12103

Nota. Fuente: Tomada de Descontamina Colombia (2021)

Tabla 2

Frecuencia departamental de víctimas

Departamento	Total
ANTIOQUIA	2621
META	1142
NARIÑO	1037
NORTE DE SANTANDER	950
CAQUETÁ	947

Nota. Fuente: Tomada de Descontamina Colombia (2021)

Los Artefactos Explosivos se clasifican en tres clases:

1. Munición sin Explotar (MUSE). Estos son municiones de diferentes tipos que fueron abandonadas sin haber sido usadas o fueron lanzadas y por alguna razón no explotaron, por lo general tienden a ser muy inestables y su simple



- manipulación puede causar su detonación. Este tipo de elementos permanecen en el sitio sin explotar debido ya sea a su mal funcionamiento, al tipo de diseño o a cualquier otra razón. (Sistema de Información IMSMA del PAICMA, 2014)
2. Minas Antipersonales (MAP). Comúnmente denominadas minas quiebrapatras (Díaz, 2003). Son armas comerciales de tipo estático que se entierran con el fin de ser activadas por una víctima al ser presionadas y su principal problema es que pueden estar activas hasta 50 años después de su instalación. Las minas antipersonales son uno de los instrumentos de guerra más utilizados en el contexto colombiano, artefacto que en la mayoría de los casos ocasiona alteraciones corporales de trascendencia para la población militar o civil afectada por el conflicto armado. Convirtiéndose en un problema de salud pública por la gran cantidad de mortalidad y morbilidad que generan. (Unicef-CGFM, 2000).
 3. Artefactos Explosivos Improvisados (AEI). Tienen el mismo objetivo que una mina antipersonal: destruir, mutilar y matar. Son elementos que como su nombre lo indica son de fabricación artesanal, los hay de todo tipo y son adaptados al tipo de objetivo que el terrorista quiera afectar. En la fabricación de AEI, los grupos armados suelen usar empaques de diferentes productos que, por lo cual los AEI suelen tener formas, materiales y tamaños muy diversos. Según lo expresan miembros del Ejército de Colombia, estos artefactos son tan variados que a su modo de ver no pueden caracterizarse. (Cardona, 2014)

La Convención sobre la Prohibición del Empleo, Almacenamiento, Producción y Transferencia de Minas Antipersonal y sobre su Destrucción, también conocida como la Convención de Prohibición de Minas, o Convención de Ottawa fue adoptada en Oslo, Noruega, el 18 de septiembre de 1997 y se abrió a la firma en Ottawa, Canadá el 3 de diciembre de 1997. Este Tratado prohíbe emplear minas antipersonales; desarrollar, producir, adquirir de un modo u otro, almacenar, conservar o transferir a cualesquiera, directa o indirectamente, minas antipersonales; ayudar estimular o inducir, de una manera u otra, a cualquiera a participar en una actividad prohibida a un Estado Parte, conforme a la Convención. Cada Estado parte se compromete, además, a destruir o a asegurar la destrucción de todas las minas antipersonal. El fin que persigue la Convención es el de poner fin al sufrimiento y las pérdidas humanas causadas por las minas antipersonal. Además de las medidas antes anotadas, los Estados Parte llevan a cabo importantes esfuerzos en los campos de desminado,



educación sobre el riesgo de minas, y asistencia a las víctimas. (Onu-Cancillería de Colombia, s.f., párrs. 1-2)

Colombia se sumó como Estado Parte desde el 1 de abril 2001 de la Convención (Ley 554 del 2000/ Sentencia C-991 de 2000) sobre la Prohibición de Minas Antipersonal.

El país y sus instituciones han hecho grandes esfuerzos para luchar contra este flagelo, buscando limpiar el territorio nacional de la presencia de minas, sin embargo, los grupos insurgentes continúan utilizando artefactos explosivos con el fin de atacar la integridad de la fuerza pública y la población civil.

Es así que el Ejército Nacional y la fuerza pública en general debe idear y adoptar métodos para combatir este flagelo que año a año ocasiona cientos de víctimas.

Desde las diferentes unidades que componen la fuerza pública y la academia a lo largo del territorio nacional se han hecho aportes constantes en pro de una lucha efectiva contra este flagelo, investigando y desarrollando técnicas y herramientas que brinden apoyo a las labores de detección, desactivación, neutralización y destrucción de estas armas.

Vale la pena mencionar aquí la diferencia entre desactivar y neutralizar; la desactivación hace referencia al proceso de manipular y modificar el sistema electrónico y/o mecánico que compone el artefacto explosivo inhabilitando el mismo con el fin de evitar su detonación, para ello se utilizan diferentes técnicas apoyadas por herramientas y conocimiento especializado, el escenario de desactivación es el menos ideal pues se pone en riesgo la integridad del personal antiexplosivos. En cuanto a la neutralización se hace referencia a procesos que también son muy especializados, sin embargo el objetivo es la inhabilitación del artefacto explosivo por técnicas como la destrucción controlada del mismo o el despiece del sistema con herramientas específicas y de manejo a distancia como lo son: Contracargas explosivas, cañones disruptores, robots, drones y herramientas manuales de manipulación a distancia con margen de seguridad.

También es común a nivel global encontrar el acondicionamiento de tecnologías enfocado a la detección y localización de estas amenazas, como lo es el uso de Radars de Penetración Terrestre (GPR) los cuales detectan anomalías en el subsuelo, enviando señales en radiofrecuencia que se reflejan en las discontinuidades. De este modo, el desempeño del GPR está influenciado por las propiedades del suelo y por las propiedades de los materiales con que se fabrican los AEI (Cardona, 2014).



El emplear técnicas como el adiestramiento canino para la detección de explosivos, el acondicionamiento de narices electrónicas, el monitoreo con drones, el uso de robots de exploración, sistemas de inhibición, detectores en base a diversas tecnologías, estudios de degradación de explosivos en el tiempo, estudios de exploración de nuevas tecnologías basadas en diversos principios físicos y químicos, son acciones que se han tomado en las fuerzas militares de Colombia en trabajo cooperativo con diversas empresas y universidades en busca de ofrecer herramientas de lucha y mejorar las capacidades de reacción de todos los cuerpos oficiales que deben enfrentarse día a día a estas amenazas.

En el Ejército Nacional de Colombia es la Escuela de Ingenieros Militares (ESING) quien se encarga de entrenar y capacitar al personal militar que debe poner pecho a esta situación, es así como día a día se buscan métodos más efectivos y eficientes para brindar las herramientas y capacidades adecuadas a dicho personal con el fin de mitigar el daño que estos AE ocasionan al país en general.

Surge como necesidad el empleo de nuevas tecnologías para la formación y capacitación de los diferentes grupos antiexplosivos, esto con el fin de tecnificar procesos con el uso y manejo de artefactos explosivos en diferentes escenarios, partiendo desde el conocimiento que se adquiere en la academia. Para ello es necesario tener el conocimiento de nuevas alternativas que sirvan para optimizar los resultados que se puedan obtener por la aplicación adecuada de sistemas que puedan brindar mejores condiciones en los procedimientos utilizados con el manejo de Artefactos Explosivos de todo tipo.

El fin último de todo el proceso es brindar a la nación, personal militar competente y altamente calificado con amplio conocimiento en todo tipo de artefactos explosivos normalmente usados por los grupos terroristas y de delincuencia común que tradicionalmente han generado graves afectaciones a la comunidad civil y militar a lo largo de todo el territorio colombiano.

Método

La investigación desarrollada es de tipo experimental con enfoque práctico en busca de la capacitación de talento humano. En la construcción de la investigación se promovió el desarrollo de técnicas de investigación, análisis teórico y su consecuente confirmación



práctica, es un soporte real sobre el cual se logra un avance efectivo en los procesos institucionales y la misión constitucional de las fuerzas armadas.

La Escuela de Ingenieros Militares tradicionalmente ha hecho esfuerzos con el fin de brindar soluciones a las necesidades educativas y operacionales de los militares del Arma de Ingenieros del Ejército Nacional de Colombia, en los últimos años se ha enfocado especialmente en escuchar las necesidades y las ideas que vienen de los mismos militares, pues son quienes en últimas se beneficiarían de todos los procesos académicos de la institución.

Es por esto que actualmente se desarrollan proyectos de Investigación, desarrollo e Innovación, abiertos a la comunidad académica en donde los aportes de las personas son recibidos, evaluados y apoyados hasta su feliz término.

El proyecto de investigación y desarrollo aquí presentado no es ajeno a esta realidad, se debe destacar que el mismo cuenta con ideas y aportes hechos por estudiantes de los cursos de formación en explosivos de la institución, algunas de estas ideas se han mantenido hasta hoy, otras han sido mejoradas o reemplazadas por nuevos aportes. La institución a través de su Centro de Investigación y desarrollo se encarga de encaminar estas ideas y hacerlas realidad poniendo a su disposición talento humano interno y si es viable establecer relaciones estratégicas con otras unidades del Ejército, empresas y universidades con las que se tienen convenios.

Originalmente se planteó la construcción de una cabina de simulación para prácticas de desactivación Tipo A, esta hace referencia a desactivación cuando hay una víctima involucrada; generar unos efectos de detonación y monitoreo de la práctica para su evaluación por parte del instructor. Se construyó por parte de estudiantes y militares activos de la Escuela un prototipo que cumple con este objetivo, una vez puesto en operación se entregó a disposición de cursos militares con el fin de escuchar la percepción de los estudiantes, opiniones y posibles opciones de mejora.

Una vez superada esta etapa se armaron mesas de trabajo constituido por el talento humano del Centro de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Militar, personal militar instructor de cursos relacionados con explosivos de la Escuela de Ingenieros Militares, personal militar instructor de cursos de electrónica de la Escuela de Ingenieros Militares, personal militar en formación dentro de los cursos relacionados con explosivos y docentes investigadores con amplia trayectoria de la misma institución.



De estas mesas de trabajo se obtuvo el planteamiento de un sistema más complejo que involucró todas las etapas de formación y fue la oportunidad de fortalecer todos los procesos de formación, entrenamiento y reentrenamiento de los militares que manejan y se ven expuestos en su vida laboral a Artefactos Explosivos. De allí se tomó la decisión de consolidar tres frentes de trabajo que al final se tradujeron en los tres componentes que conforman actualmente el sistema de simulación.

El trabajo se desarrolló en tres partes fundamentales que conforman un planteamiento práctico sobre la aplicación y uso de los Artefactos Explosivos, con especial atención a los AEI, al ser estos los de más alto despliegue en todo el territorio nacional.

Componente 1

Previamente los cursos de electrónica de la Escuela de Ingenieros Militares incorporaban en sus actividades de evaluación la construcción de maquetas no funcionales de artefactos explosivos con el fin de que los estudiantes entendieran la estructura general de los mismos. Se decidió que a partir de este principio utilizaran los conocimientos adquiridos en electrónica básica, más las bases de las actividades evaluativas previas para construcción de maquetas funcionales con la capacidad de acoplarse a un sistema externo, esto es que al activarse el artefacto generara un pulso que sería utilizado como señal de control con el que se acondicionaría a los componentes de simulación.

Para llevar a cabo el objetivo se pone a disposición de los estudiantes un laboratorio dedicado a investigación de la Escuela de Ingenieros Militares que cuenta con bancos de trabajo dotados de equipos de medición, generación de energía y generación de señales; adicional a ello y con el fin de poner todas las herramientas posibles a su alcance se dotaron con cajas de herramientas, herramientas de trabajo, componentes electrónicos, tarjetas de desarrollo, instrumentos de montaje y se incluyó en el curso la enseñanza de su uso.

El Ejército Nacional – Escuela de Ingenieros Militares, cuenta con bases de datos que han sido alimentadas y documentadas con la información obtenida de artefactos explosivos incautados a los grupos terroristas o recuperados en escenas del crimen, sobre estos elementos se realizan procesos de ingeniería inversa con el fin de reconstruir, analizar y perfilar los circuitos y sistemas usados por los grupos al margen de la ley. Con uso de estas bases de datos y la inventiva propia de los estudiantes se construye por parte de ellos replicas funcionales para ser empleados en las maquetas que son parte fundamental de los siguientes componentes.



En este componente también se destaca que el fin principal es que el estudiante pueda analizar y entender plenamente cómo funciona el artefacto, su sistema de activación, su sistema de seguridad y los posibles métodos de desactivación o neutralización.

Componente 2

Como previamente se mencionó este era el único componente que se iba a llevar a cabo, una cabina de simulación con un control centralizado que permitiera unir el artefacto explosivo con una serie de efectos controlados, y solo para llevar desactivación sobre víctimas. Una vez elaborado el primer prototipo y definidos los componentes, se realizaron una serie de mejoras sobre el sistema con el fin de mejorar los efectos, insonorizar la cabina (10 a 20 dB), permitir la comunicación por radio entre el Comandante de la operación (Instructor) y el estudiante, ambientar el sitio con sonido ambiente, acoplar las maquetas funcionales obtenidas del componente 1 con el sistema de control electrónico y ampliar su margen para usar múltiples escenarios según la maqueta a ser empleada.

El fin es aplicar los conceptos vistos en clase, en la elección de técnicas y procedimientos adecuados para inhabilitar de forma manual los sistemas electrónicos ya sean complejos o sencillos que componen el artefacto explosivo.

Componente 3

Finalmente se estableció una mesa de trabajo interdisciplinar que incluía profesionales en el campo de los explosivos, la electrónica y la química, con el fin de valorar las posibles opciones para llevar a cabo este componente. Se descartó el uso de reacciones químicas por dos razones: por un lado podían tener un riesgo innecesario hacia los involucrados en el proceso de transporte, montaje y práctica; por el otro podría requerir conocimiento especializado para su elaboración.

Desde un principio se decidió que el sistema completo en todos sus componentes debía ser seguro y de fácil replicación, con el fin de evitar sobrecostos o el requisito de personal especializado para el montaje de las prácticas; por tal motivo para el componente 3 se optó por hacer pruebas de campo con material pirotécnico (botes de humo, antorchas de humo, bengalas) para el efecto visual y martillos pirotécnicos para el sonido, ambos activados mediante fósforos eléctricos conectados a la salida del pulso de control de los artefactos explosivos (maquetas).



Una vez probada su versatilidad, reducido costo y seguridad en la operación se aprobó el uso de los mismos para la simulación de procesos de neutralización de artefactos explosivos, este componente se desarrolla en espacios abiertos y con restricción de acceso; esto con el fin de poder emplear en el procedimiento las herramientas profesionales usados por los grupos antiexplosivos de la fuerza como lo son: Robots, drones, trajes EOD, sistemas de gancho y cuerda, elementos de manipulación e inspección remota.

Finalmente, se hicieron pruebas piloto de todos los componentes; mediante mesas de trabajo con los estudiantes y todos los involucrados en el proyecto se hicieron mejoras y ajustes a los mismos basados en la percepción subjetiva de los estudiantes y los militares con amplia trayectoria en el campo de desactivación y neutralización de artefactos explosivos.

Resultados

La Escuela de Ingenieros Militares desarrolló un sistema de simulación para la desactivación y neutralización de AE, con el fin de recrear las situaciones y escenarios a los cuales los grupos antiexplosivos se ven expuestos; de forma experimental y con gran realismo permitiendo que de esta manera se resuelvan situaciones casi reales de desactivación y neutralización, con el único propósito de poner a prueba el aprendizaje adquirido sobre artefactos explosivos y así poder mitigar al máximo los actos terroristas de los grupos al margen de la ley.

Se buscó fortalecer el espíritu académico en la realización de actividades que son comprobadas con las teorías aplicadas en las aulas. Determinando las condiciones técnicas para la práctica de desactivación en campo, evaluando las capacidades y el conocimiento que se debe aplicar en la desactivación y neutralización de los artefactos explosivos.

El sistema obtenido está compuesto por tres partes: 1. Componente académico práctico, 2. Simulación de desactivación y 3. Simulación de neutralización.

Primera parte

Esta primera parte, denominada *componente académico práctico*, se basa en el principio de aprender haciendo, se dota a los estudiantes con las bases teóricas en explosivos y electrónica, bases de datos de artefactos explosivos, dispositivos y herramientas con el fin



de que de manera práctica construyeran sus propios artefactos explosivos para ser usados en la simulación de procedimientos.

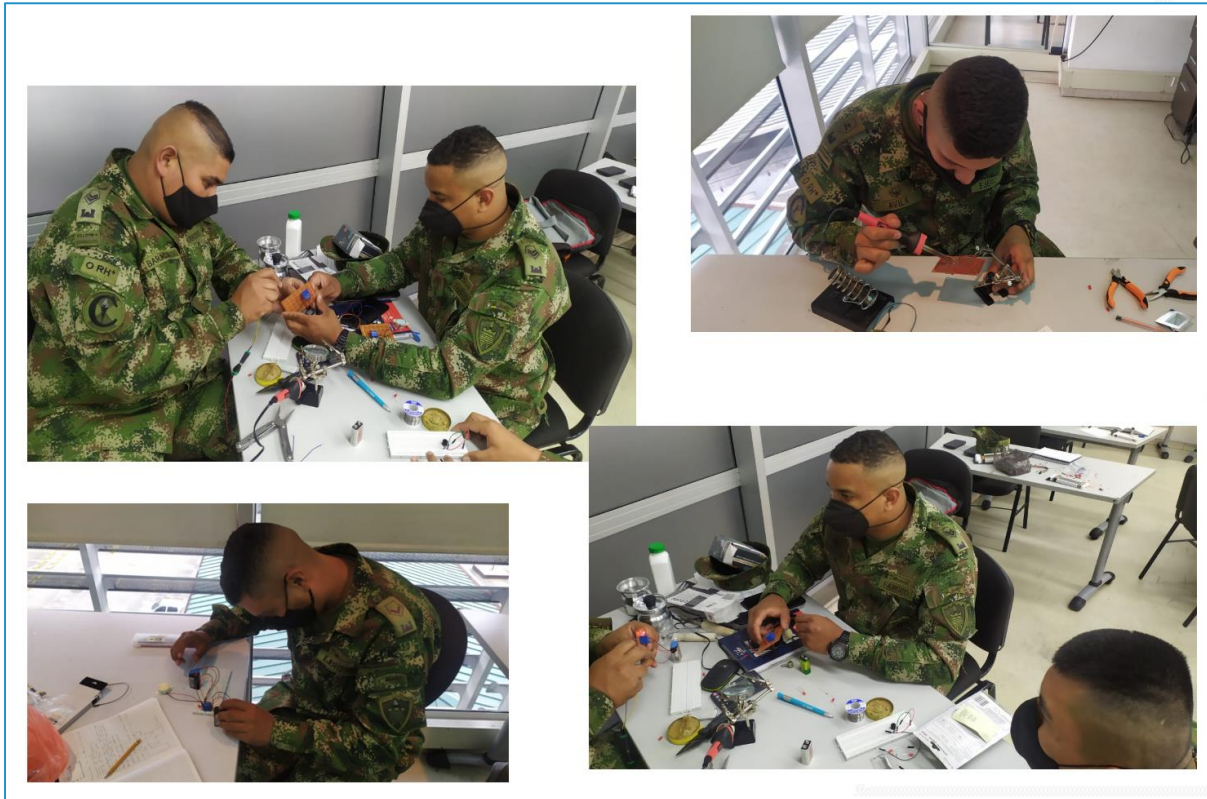
Aquí, los estudiantes a partir de ingeniería inversa construyen maquetas de artefactos explosivos con el fin de conocer de primera mano su funcionamiento y posibles opciones de desactivación.

Como resultado se modificaron las prácticas de la materia de electrónica con el fin de que esta actividad sea parte integral de la misma, todas las maquetas son documentadas con el fin de consolidar la base de datos de Ejército Nacional – Escuela de Ingenieros Militares y sean base para estudiantes futuros. Se dotó el laboratorio de investigación de la institución con herramientas de montaje y componentes electrónicos, complementando así los bancos de trabajo en electrónica. Dicho laboratorio se pone a disposición de los estudiantes para que puedan hacer libremente sus montajes con el acompañamiento de sus instructores.



Figura 1

Estudiantes militares en práctica de montaje de circuitos electrónicos y montaje de artefactos explosivos



Vale la pena destacar que para tomar el curso no se requieren conocimientos propios de electrónica, por tal motivo la formación se hace desde cero, como en cualquier curso técnico de electrónica básica y al final del curso los estudiantes deben estar familiarizados con los principios físicos básicos, el reconocimiento y uso de dispositivos electrónicos y tienen la capacidad de elaborar circuitos básicos y funcionales.

Como resultado se tienen maquetas de artefactos explosivos funcionales en donde además del circuito de activación se debe analizar el modo, tiempo y lugar empleado por el terrorista para hacer uso del artefacto, de esta manera se obtienen elementos como los siguientes:



Figura 2

Vasija bomba, vista 1



Ejemplo 1

Vasija bomba, básicamente es un recipiente que suma un elemento para llamar la atención de la víctima, en poblaciones rurales es posible encontrar este tipo de artefactos que buscan aprovechar la superstición o curiosidad de las personas para causar daño.

Por lo general los artefactos explosivos improvisados como el aquí mostrado están constituidos por un circuito de activación, un explosivo y sumado a ello se incluye metralla (fragmentos de metal), muchas veces contaminada con toxinas, esto con el fin de maximizar el daño a la víctima, como se detalla en la figura 4.



Figura 3

Detalle alimentación (Batería 9V) Vasija bomba



Figura 4

Detalle metralla Vasija Bomba



Muchas veces los circuitos empleados, como en el caso particular, no revisten mayor complejidad, sin embargo, esto no influye en el daño que puede causar a una posible víctima.

Ejemplo 2

Caja Bomba. Los terroristas no escatiman en posibilidades y hasta el elemento más simple puede ser usado como arma, en el ejemplo mostrado se utiliza una simple caja de cartón, que al ser levantada o pateada puede activar el explosivo en su interior.

Figura 5

Caja Bomba



Figura 6

Detalle interno caja bomba.



Segunda parte

La segunda parte denominada *simulador de desactivación* corresponde al desarrollo de una metodología en los procedimientos de desactivación con el uso del simulador A.E orientada hacia los alumnos de la Escuela de Ingenieros Militares en su formación como futuros técnicos en explosivos.

El componente se desarrolla en una cabina cerrada y aislada acústicamente en donde el estudiante debe enfrentarse a un Artefacto explosivo (maqueta) conectado inalámbricamente a un centro de control, todo el proceso es registrado por medio de un circuito cerrado de televisión (CCTV) y monitoreado por el instructor de la practica con el fin de brindar al estudiante la realimentación sobre el proceso hecho; el procedimiento puede ser vigilado por una ventana de observación y a la vez es transmitido en tiempo real a los demás estudiantes por una serie de pantallas conectadas al CCTV. En caso de la activación del artefacto explosivo se hace uso de la señal de control que se comunica con el control centralizado activando así los efectos de la detonación.

Para el desarrollo de la actividad puede o no haber límite de tiempo, esto lo decide el instructor, de acuerdo a las herramientas empleadas el artefacto puede quedar inutilizable, por tal motivo, es importante el apoyo de los estudiantes en formación para alimentar constantemente el stock de artefactos explosivos.



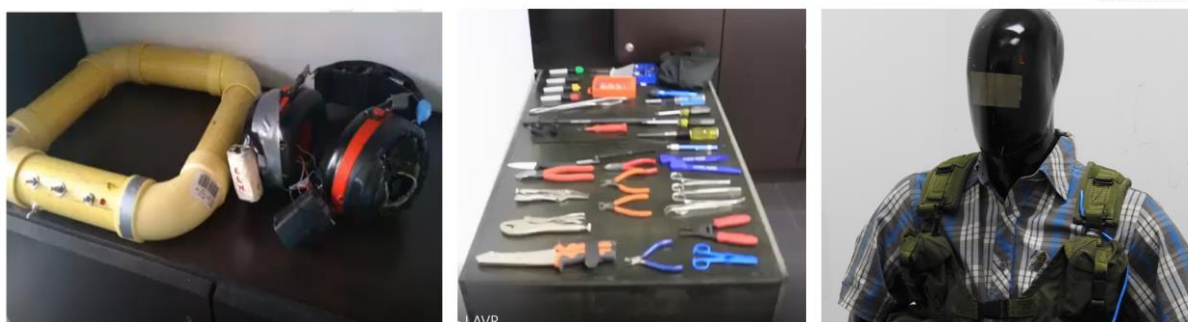
Figura 7

Procedimiento de desactivación grabado



Figura 8

Artefactos Explosivos, herramientas de acceso para procedimientos de desactivación, víctima



En la Figura 8 se muestran dos tipos de artefactos comúnmente usados, por un lado un collar bomba, por el otro unos audífonos bomba. Se dota al estudiante en práctica un kit completo oficial de acceso con el que normalmente se dota a los grupos antiexplosivos.



Figura 9

a. Proceso de desactivación con AE sobre víctima. b. Activación del AE



De igual manera se dota al estudiante con los equipos de protección y comunicación requeridos para el desarrollo del procedimiento, En la Figura 9 a. se muestra al estudiante tratando de acceder a los componentes internos del AE con el uso de una herramienta de mano inalámbrica (mototool), en la Figura 9 b. se evidencia el fallo de la operación y la activación de luces de destello.

La práctica puede terminar por uno de tres motivos: 1. Logra desactivar satisfactoriamente el artefacto, 2. Comete un error que genera la activación del artefacto, 3. Se contaba con un temporizador que al agotar el tiempo activa el artefacto. Una vez finalizada y como se observa en la Figura 10, el instructor o Comandante procede a valorar con el estudiante todo el trabajo hecho y a realimentar sus aciertos y errores a través de los archivos de video.



Figura 10

Realimentación del procedimiento con los registros en video



Tercera parte

Esta tercera parte, *simulación de neutralización*, tuvo como resultado un conjunto de procesos a desarrollarse en campo abierto, que al igual que el anterior estará de principio a fin bajo la supervisión del instructor o comandante, cuenta como insumo principal con los artefactos explosivos (maquetas) y el material pirotécnico custodiado por personal militar y adecuadamente almacenado.

En este componente práctico en campo abierto, se permite al estudiante emplear herramientas profesionales superiores en un campo de entrenamiento con efectos basados en pirotecnia y busca evaluar el desempeño del estudiante en los procesos de neutralización.

Para este caso se busca recrear situaciones que involucran AE de mayor nivel, para lo cual se hacen montajes más complejos y los procedimientos emplean herramientas más robustas (cañones disruptores), de manipulación a distancia de seguridad (Pinzas de manipulación, herramientas de arrastre) o de exploración remota (Robots de reconocimiento, drones); de igual manera se usan otro tipo de indumentaria para protección, mucho más robusta (Trajes EOD), las imágenes referencia se pueden observar en las Figuras 11 a 14.



Figura 11

Imagen de referencia sitio de práctica con explosivos en campo abierto



Nota. Archivo Ejército Nacional de Colombia (s.f.).

Figura 12

Robot MK2T perteneciente a la Escuela de Ingenieros Militares y usado en prácticas



Nota. Fuente: Archivo Escuela de Ingenieros Militares (2019).



Figura 13

Trajes EOD, Escudo de protección, Equipo de manipulación. Grupo Marte Ejército Nacional de Colombia



Nota. Fuente: Periódico ElPais.com.co (2014).

Figura 14

Pruebas con material pirotécnico en campo



Una vez definidos y elaborados los tres componentes del sistema de simulación se pusieron en marcha para validar su correcto funcionamiento. Del sistema se encuentra en desarrollo la creación de una marca y un logo que los agrupe y uno que los identifique, como producto de investigación adicional, también se encuentran en construcción los manuales de usuario y servicio que permita su familiarización con instructores y futuros estudiantes, al igual que buscan brindar la base de conocimiento para poder ser fácilmente reparado, mantenido y replicado.

El proyecto está abierto a mejoras y modificaciones propuestas por los estudiantes de los cursos de explosivos, el personal involucrado en el tema de explosivos del Ejército Nacional y toda la fuerza pública en general, la comunidad académica y científica, pues la afectación con artefactos explosivos es un tema que directa o indirectamente nos afecta a todos.

Discusión

En síntesis como resultado de la investigación se obtuvo:

1. Un componente académico práctico en donde los estudiantes a partir de ingeniería inversa construyen maquetas de artefactos explosivos con el fin de conocer de primera mano su funcionamiento y posibles opciones de desactivación.
2. Un componente práctico, que se realiza en una cabina de simulación controlada, en donde a partir de los procedimientos realizados por el desactivador se evalúa y monitorea el procedimiento completo hasta la activación o desactivación del artefacto.
3. Un componente práctico en campo abierto, en donde se permite al estudiante emplear herramientas profesionales superiores (robots de reconocimiento y trajes EOD) en un campo de entrenamiento con efectos basados en pirotecnia y al igual que el anterior busca evaluar el desempeño del estudiante en los procesos de desactivación.

A la fecha el proyecto se construyó de manera colaborativa, con los estudiantes actuales de los cursos de explosivos y será parte de los cursos de formación siguientes, lo que lleva a plantear una serie de inquietudes objeto de discusión respecto al sistema.



- ¿Cómo evaluar la efectividad real? Si, bien es cierto que se desarrolló a partir de las necesidades y propuestas de los interesados (personal militar que se enfrenta a artefactos explosivos) se debe evaluar que tan efectivo es realmente en términos de mejorar las capacidades del talento humano y la mejora en las curvas de aprendizaje, lo que puede llegar ser muy subjetivo y requiere a futuro un constante monitoreo y evaluación del desempeño.
- ¿Qué tanto impacto tendrán los costos operacionales y de mantenimiento? Para esto es necesario realizar un trabajo comparativo de las técnicas y modelos anteriormente usados vs los aquí desarrollados con el fin de generar estimativos numéricos que permitan validar su impacto positivo a mediano y largo plazo.
- ¿Cómo comparar la mejora versus los métodos de entrenamiento usados previamente? Al igual que los ítems anteriores requiere de un trabajo comparativo y evaluativo, que puede llegar a ser muy subjetivo y su fortalecimiento requerirá del trabajo y compromiso de la comunidad militar y académica de la institución. Es necesario hacer una revisión al interior de la fuerza con el personal militar entrenado y reentrenado que permita evidenciar el impacto del sistema de simulación, teniendo como referente los métodos empleados en sus entrenamientos previos.
- ¿De qué manera impacta los procesos de Ciencia, Tecnología e Innovación de la institución? Para evaluar este aspecto, podemos remitirnos a los modelos de medición efectuados por Minciencias, valiéndonos de productos científicos derivados del proceso investigativo y de desarrollo.
- ¿Puede hacer este desarrollo que el Ejército Nacional de Colombia sea aún más competitivo? El Ejército Nacional de Colombia es referente mundial por sus capacidades militares, es posible que sumando este y otro tipo de desarrollos tecnológicos de la fuerza a la fortaleza, el talento humano y la experiencia que años de conflicto armado le han dejado, permitan que este se convierta en un referente internacional de Ciencia, Tecnología e Innovación a nivel Militar.

Como recomendación es necesario hacer una evaluación constante de los tres componentes desarrollados con el fin de validar la efectividad de los mismos en los procesos de formación, al igual que generar un trabajo colaborativo con otras fuerzas que permita alcanzar mejores resultados en la lucha contra este flagelo que ha afectado durante años al país; a la Escuela de Ingenieros Militares llega personal militar desactivador de AE a



reentrenamiento, su experiencia será fundamental para mejorar el sistema y los procesos asociados.

Conclusiones

La aplicación del principio de aprender haciendo es fundamental para comprender el objetivo del enemigo, conociendo los elementos que usan y el daño que buscan ocasionar.

La construcción de una base de datos amplia y detallada de AE decomisados y recuperados es elemental para el adecuado seguimiento de la evolución de los AE y la implementación de contramedidas.

La elaboración de elementos tecnológicos fáciles de replicar y mantener es útil para el fortalecimiento institucional sin dependencia directa de terceros.

Las acciones que permitan la instrucción con el fin de incrementar las capacidades de operación, con riesgo mínimo o cero es altamente importante para conservar los recursos de la Nación.

Agradecimientos

Agradecimientos a la Escuela de Ingenieros Militares que año a año ha trabajado incansablemente por la construcción y desarrollo de sistemas y herramientas tecnológicas en busca del bienestar de las fuerzas militares y la población civil en general.

Al Ejército Nacional de Colombia por su constante apoyo al mejoramiento del sistema nacional de ciencia, tecnología e innovación SNCTI y el fortalecimiento de sus propias capacidades institucionales a través del Comando de Apoyo Tecnológico (COATE) y la Dirección de Ciencia y Tecnología del Ejército (DITEC).



Referencias

- Cancillería de Colombia. (s.f.). Convención sobre la Prohibición de Minas Antipersonal.
<https://ginebra-onu.mision.gov.co/minas-antipersonal>
- Cardona, L., Jiménez, J., y Vanegas, N. (2014). Caracterización de materiales empleados en la fabricación de artefactos explosivos improvisados. *Revista colombiana de materiales*, (5), pp. 13-19.
<https://revistas.udea.edu.co/index.php/materiales/article/view/19410>
- Centro Nacional Contra Artefactos Explosivos y Minas [CENAM]. (2015). Historia de Artefactos Explosivos en Colombia.
<https://www.ejercito.mil.co/?idcategoria=384951>.
- DanChurchAid, Handicap International, Human Rights Watch, Mines Action Canada. (2015). «Landmines and Explosive Remnants of War» International Campaign to Ban Landmines, Vol. 1 de 2, *Cluster Munition Coalition* (ICBL-CMC).
- Decreto 1290/08, abril 22, 2008. Presidente de la República (Colombia).
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=30431>
- Decreto 2150/07, junio 12, 2007. Presidente de la República (Colombia).
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=69255>
- Decreto 2535/93, diciembre 17, 1993. Presidente de la República (Colombia).
https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=1540#:~:text=DECRETO%202535%20DE%201993%20%28Diciembre%2017%29%20por%20el,la%20Ley%2061%20de%201993%20y%20teniendo%20en
- Decreto 2973/10, agosto 6, 2010. Presidente de la República (Colombia).
https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=40129#:~:text=_DECRETO%202973%20DE%202010%20%28Agosto%206%29%20Por%20el,para%20la%20prestaci%C3%B3n%20de%20los%20servicios%20de%20rehabilitaci%C3%B3n
- Decreto 334/02, febrero 28, 2002. Presidente de la República (Colombia).
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=6048>
- Decreto 3990/07, octubre 17, 2007. Presidente de la República (Colombia).
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=27568>



Department of Defense Dictionary of Military and Associated Terms. (2013). As Amended Through. Department of National Defense. USA.

Descontamina Colombia. (2017). Disposición de artefactos explosivos y manejo de sustancias explosivas. Colombia.

http://www.accioncontraminas.gov.co/AICMA/Documents/Estandares_Nacionales/171128-EN_Disposicion_AE.pdf

Descontamina Colombia. (2021). Estadísticas de Asistencia Integral a las Víctimas de MAP y MUSE. Colombia.

<http://www.accioncontraminas.gov.co/Estadisticas/Paginas/Estadisticas-de-Victimas.aspx>

Díaz, G. (2003). Minas antipersonales (MA) en Colombia costo físico y emocional. Umbral Científico. Colombia.

Ejercito Nacional de Colombia. (2005). «ARTEFACTOS EXPLOSIVOS,». En: *MANUAL DE ARTEFACTOS EXPLOSIVOS*. Bogotá, Colombia.

El País. (2014). Operativo de verificación de falso carro bomba en Corinto. Cali, Colombia.

<https://www.elpais.com.co/multimedia/fotos/operativo-de-verificacion-de-falso-carrobomba-en-corinto.html>

Industria Militar Colombiana – INDUMIL. (2019). Productos Fabrica explosivos Antonio Ricaurte, Colombia <https://www.indumil.gov.co/en/item/carga-dirigida-2/>

Jebens, M. (2010). Environmental Impact on the Functionality of Landmines: Does Aging Matter. *The Journal of ERW and Mine Action*, 14(1). pp. 72 – 81.

<https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol14/iss1/24>

Judge, M. (2003). An investigation of composite propellant accelerated ageing mechanisms and kinetics. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 28(3), pp. 114–119.

<https://doi.org/10.1002/prop.200390017>

Ley 361/97, febrero 7, 1997. Diario Oficial. [D.O.]: 42978. (Colombia).

<https://funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=343>



Ley 418/97, diciembre 26, 1997. Diario Oficial. [D.O.]: 43201. (Colombia).

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=6372>

Ley 554/00, enero 14, 2000. Diario Oficial. [D.O.]: 52130. (Colombia).

http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0554_2000.html

Ley 759/02, julio 25, 2002. Diario Oficial. [D.O.]: 52130. (Colombia).

http://www.secretariassenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0759_2002.html

Mesa de Desplazamiento y Discapacidad (2021). Víctimas de Minas Antipersonal o Municiones Sin Explotar (MAP/MUSE).

<https://mesadesplazamientoydiscapacidad.wordpress.com/victimas-de-mapmuse/>

Naciones Unidas Oficina Contra la Droga y el Delito, Subdivisión de prevención contra el terrorismo. (2006). Prevención de los Actos Terroristas: Estrategia de Justicia Penal que Incorpora las Normas del Estado de Derecho en la Aplicación de los Instrumentos de las Naciones Unidas Relativos a la Lucha Contra el Terrorismo, Documento de trabajo sobre asistencia técnica.

https://www.unodc.org/documents/terrorism/Publications/Module%202/Module_2_Spanish.pdf

Noticias Oriente Antioqueño. (2013). *"Desde montañas de El Retiro, civiles reciben entrenamiento para la remoción de minas antipersona"*, Antioquia, Colombia.

<http://noticiasorientantioqueno.wordpress.com/2013/01/26/desde-montanas-de-el-retiro-civiles-reciben-entrenamiento-para-la-remocion-de-minas-antipersona>

Scheers, B. (2001). *"Ultra-Wideband Ground Penetrating Radar with Application to the Detection of Anti Personnel Landmines"* [Doctoral Thesis]. Université Catholique de Louvain, Laboratoire D'hyperfréquences, Brussels.

Sistema de Información IMSMA del PAICMA. (2014). Situación nacional por minas antipersonal y municiones sin explotar 1990 a 31 de Agosto de 2014. Colombia.

http://www.accioncontraminas.gov.co/Documents/REPORTE%20NACIONALVF_31%20AGOSTO_2014_.pdf



UNICEF Colombia y el Comando General de las Fuerzas Militares de Colombia. (2000)

Compilación de datos de la Campaña Colombiana Contra Minas.

<https://www.yumpu.com/es/document/view/5533388/parte-2-unicef-colombia>

UNMAS. (2015). Manual de Seguridad sobre minas terrestres, restos explosivos de guerra y artefactos explosivos improvisados. Servicio de las Naciones Unidas para la Acción contra Minas. (3 ed.). Nueva York, NY, Estados Unidos.

US-ARMY. (1998). Manual FM 5-250 Explosivo y demoliciones. Cuartel general secretaría del Ejército: Washington D.C. Estados Unidos.

Uscategui A. Centro de Memoria Histórica. (s.f). Sensibilización contra las Minas

Antipersonal. Colombia. <https://centrodememoriahistorica.gov.co/tag/minas-antipersonales/>

Villamil, C. (2016). Ciencia, Tecnología E Innovación En La Policía Nacional De Colombia.

2016. <http://carlosdavidvillamil.blogspot.com.co/>



Diseño de un sistema de recarga solar para sistemas de movilidad eléctrica unipersonal*Design of a solar recharging system for single-person electric mobility systems*

Pedro Luis Muñoz Ochoa ⁵³
Alixdey Andrea Gutiérrez Cárdenas ⁵⁴
Jefferson Parra Capera ⁵⁵

Resumen

La movilidad eléctrica es una realidad que se manifiesta por razones medioambientales, para disminuir la huella de carbono y gases de efecto invernadero, contribuyendo con un desarrollo sostenible que implica el uso de energías renovables. Cada día aumenta el número de equipos que las personas emplean para movilizarse como por ejemplo: patineta, bicicleta, y/o moto; los cuales tienen en común que emplean motores eléctricos, que son más eficientes comparados con los de combustión. Estos sistemas utilizan como fuente de energía primaria una batería recargable, lo que implica el uso de estaciones de recarga de energía, las cuales no son muy numerosas y están disponibles principalmente en grandes centros urbanos, lo que limita la autonomía de estos sistemas de movilidad eléctrica. Una forma para lograrlo es tener en cuenta los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), planteados por la Organización de Naciones Unidas (ONU), tomando como referencia específicamente los siguientes: ODS 7 Energía Asequible y No Contaminante, ODS 9 Industria, Innovación e Infraestructura y ODS 11 Ciudades y Comunidades Sostenibles; para el desarrollo de un proyecto de investigación enfocado en un sistema de recarga solar autónomo para la movilidad eléctrica unipersonal. La metodología empleada consiste en medir con un amperímetro la corriente necesaria para la carga de la batería de patineta, bicicleta y/o moto eléctrica.

Palabras clave: autonomía, movilidad, sistema, recarga, ODS.

⁵³ Licenciado en Electrónica. Fundación Universitaria del Área Andina. Bogotá, Colombia. <https://orcid.org/0000-0001-9894-1295>. plochoa@gmail.com, pmunoz26@areandina.edu.co

⁵⁴ Ingeniera Electrónica. Docente Corporación Universitaria del Meta. Villavicencio, Colombia. <https://orcid.org/0000-0001-8277-877X>. alixdey.gutierrez@unimeta.edu.co, alixdey@gmail.com

⁵⁵ Ingeniero Electricista. Docente investigador Corporación Universitaria del Meta. Villavicencio, Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-8509-4063>. Jefferson.parra@unimeta.edu.co, Jefferson_parra@msn.com



Abstract

Electric mobility is a reality that manifests itself for environmental reasons, to reduce the carbon footprint and greenhouse gases, contributing to sustainable development and involves the use of renewable energy. Every day the number of equipment that people use to move around increases, such as: skateboard, bicycle, and / or motorcycle; which have in common that they use electric motors, which are more efficient compared to combustion engines. These systems use a rechargeable battery as a primary energy source, which implies the use of energy recharging stations, which are not very numerous and are mainly available in large urban centers, which limits the autonomy of these electric mobility systems. One way to achieve this is to take into account the 17 Sustainable Development Goals (ODS), proposed by the United Nations Organization (UN), taking as a reference specifically the following: 7- Affordable and Non-Pollutant Energy, 9- Industry, Innovation and Infrastructure and 11- Sustainable Cities and Communities; for the development of a research project focused on an autonomous solar recharging system for electric mobility sole proprietorship. The methodology used consists of measuring the current necessary to charge the battery of scooter, bicycle and / or electric motorcycle with an ammeter.

Keywords: autonomy, mobility, recharging, system, ODS



Introducción

La movilidad tiene que ver con el desplazamiento de un sitio a otro y de las distancias a cubrir, pero también involucra aspectos como la infraestructura de la ciudad y los sistemas que los usuarios utilizan para estos desplazamientos. En especial ahora con los efectos de la pandemia con medidas de bioseguridad como el distanciamiento social, las personas se han visto en la necesidad de replantearse alternativas y medios para la movilidad que sean amigables con el medio ambiente disminuyendo la huella de carbono, contribuyendo a hacer que las ciudades sean sostenibles.

La movilidad urbana supone aprovechar al máximo el uso de todos los modos de transporte y organizar la “comodalidad” entre los distintos modos de transporte colectivo (tren, tranvía, metro, autobús y taxi) y entre los diversos modos de transporte individual (automóvil, moto, bicicleta, patineta, monociclo y marcha a pie) (Estévez, 2020).

Una forma para lograrlo son los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) planteados por la Organización de Naciones Unidas (ONU). Se toma en consideración como se observa en la figura 1, algunos de los objetivos, específicamente los numerales 7, 9 y 11 para el desarrollo de un sistema de recarga solar para sistemas de movilidad eléctrica unipersonal.

Para ello y teniendo en cuenta la información consolidada, se plantea como objetivo principal el diseño de un sistema de recarga solar para sistemas de movilidad eléctrica unipersonal.

Se indica a continuación los siguientes objetivos específicos dentro del proceso:

- Realizar cálculos de los paneles solares y elementos necesarios para el diseño del sistema.
- Implementar dos (2) prototipos del sistema de recarga solar.
- Realizar mediciones de corriente, voltaje y potencia en el proceso de carga en patineta, bicicleta y motos eléctricas.

Para lo anterior, se procedió a realizar la búsqueda de información relevante relacionada con el proyecto, como por ejemplo:

- Baterías: estado del arte y vigilancia tecnológica 2013 (Padrón, 2014).



- Catálogos de fabricantes: Manual de bicicleta eléctrica Kuo+. (Owner's manual Kuo+ 1. (n.d.)).
- ¿Cómo dimensionar y calcular paneles solares fotovoltaicos necesarios? (<https://plus.google.com/+Sfesolarcom>, 2016).
- Componentes de la bicicleta eléctrica NICHESE (González, J., 2018).
- Ebike batería 48V 20AH 36V 10AH 52V 17AH bicicleta eléctrica Samsung de iones de litio de 18650 células (Aliexpress, 2021).
- Paneles solares ECO GREEN ENERGY. (Group Eco Green Energy, 2018).
- Los 5 mejores vehículos eléctricos urbanos y portátiles (2021).
 - Manual de usuario de moto eléctrica M+ (A. Analysis and U. Manual, 2012).
 - Manual de usuario de patineta STARKER S1 (Auteco, 2013).
 - Manual de garantía y mantenimiento AUTECO, patineta STARKER S1 Auteco, Starker (2021).

Figura 1

ODS 7, 9 y 11 y Sistemas de Movilidad eléctrica unipersonal



Nota. Fuente: Naciones Unidas, ODS (2018); Westbrook, C. (2019)

Los sistemas de movilidad eléctrica unipersonal utilizan moniciclos, patinetas, bicicletas, motos o vehículos eléctricos que son más eficientes que los motores de combustión; tienen acogida actualmente gracias a las ventajas que presentan en reducción de impuestos, ahorro de tiempo en los trancones y embotellamientos, pero tienen la necesidad de la recarga de la batería periódicamente, lo que implica la necesidad de estaciones o puntos de recarga de energía.



La mayoría de las alternativas de movilidad eléctrica, son sistemas que emplean un motor eléctrico integrado a la rueda, el primer patinete de este tipo se lanzó en 1985 (Westbrook, 2019), pero el origen se debe al clásico monopatín, el cual fue fundado por Mickey Muñoz y Phil Edwards en 1963 (MiniPitBikeS, 2015).

El patinete eléctrico se clasifica como micro movilidad electrónica, siendo un medio de transporte de baja velocidad, pequeño y ligero que funciona con energía eléctrica y que es típicamente utilizado en viajes de corta distancia (Estévez, 2020).

También pertenecen a los Vehículos de Movilidad Personal (VMP), los cuales se definen según la Dirección General de Tráfico como “vehículos capaces de asistir al ser humano en su desplazamiento personal y que, por su construcción, pueden exceder las características de los ciclos y estar dotados de motor eléctrico” (Martin, 2018, párr. 2).

Una bicicleta eléctrica es una bicicleta normal a la que se le ha instalado un motor eléctrico de alta eficiencia (85 % o más), un pack de baterías y otros accesorios como controlador, cargador de baterías, acelerador y frenos con corte de energía, etc. (Ver figura 2.a.). El vehículo resultante combina sin problemas tracción humana y eléctrica, permitiendo un desplazamiento de este sistema.

Los motores eléctricos empleados en los diferentes sistemas de movilidad trabajan con voltajes de trabajo de 24 V, 36 V, y 46 V; con potencias de 250 W, 300 W y 500 W de diferentes fabricantes como Bosch, Yamaha, Panasonic, Bewo y otros, como se observa en la figura 2. b. El controlador determina la cantidad de energía que se suministra al motor de tal forma que este tipo de vehículos no superen una velocidad de 20 km/h y 25 km/h, según regulaciones de tránsito.



Figura 2

Partes de la bicicleta y tipos de motores



Nota. a. Bicicleta eléctrica partes que la componen. Fuente: Losada (2007). b. Diferentes motores eléctricos empleados en sistemas de movilidad eléctrica. Fuente: Los mejores Motores de 2020 para Bicicleta Eléctrica (2020)

Pero el aspecto más importante de sistema de recarga es la batería que determina la autonomía de los sistemas eléctricos. Las baterías que utilizan las patinetas bicicletas y motos, por lo general, son de Ion litio con voltajes típicos de 36 V y 48 V. Otro aspecto importante es la corriente o amperios hora (Ah) que la batería puede entregar al motor. Este parámetro se expresa en la potencia en Wh de la batería que oscila entre 300 Wh y 700 Wh. Estas baterías están conformadas por pilas 3,6 V que se conectan en serie y paralelo para lograr diferentes voltajes y potencias según su conexión (*ver figura 3*).



Figura 3

Diferentes tipos de Baterías empleadas en sistemas de movilidad eléctrica con pilas de Ion Litio



Nota. Fuente: miniPitBikeS, E. (2015)

Método

Para el desarrollo del proyecto se revisó la información técnica correspondiente a las baterías que se emplean en las patinetas, bicicletas y motos eléctricas. Se analizaron los catálogos de los fabricantes y se realizaron mediciones con un multímetro y pinza amperimétrica para determinar la corriente de carga necesaria para la batería; con la pinza se midió la corriente de carga para la batería de una patineta eléctrica marca Starker. Como se observa en la figura 4, el sistema se conectó a una toma de voltaje de 120 VAC, 60 Hz y con el amperímetro se midió la corriente de carga para la batería.



Figura 4

Mediciones de la corriente de carga para patineta eléctrica Starker de 36V DC, 500 W



Especificación:

- Normal Volt: V/36V/48V/52V
- Celdas de batería: Celdas importadas y celdas 3 C chinas
- Peso de la batería: 2,8-5,5 KG (incluye el cargador)
- Corriente máxima de descarga constante: 30^a
- Corriente máxima: 85^a
- 36V voltaje de carga de la batería: 42 V
- 48V voltaje de carga de la batería: 54,6 V
- Voltaje de carga de la batería de 52 V: 58,8 V
- 36V voltaje de corte de descarga de la batería: 28V
- 48V voltaje de corte de descarga de la batería: 36,4 V
- 52V voltaje de corte de descarga de la batería: 39 V
- Ciclo de Vida: 800 veces
- Forma de carga: CC/CV
- Temperatura de carga: 0-45 °C
- Temperatura de descarga: -20-65 °C
- Función de protección: sobrecarga, sobredescarga, sobrecorriente, cortocircuito, equilibrio.

Nota. Fuente: Aliexpress, E., Unidos, E., Unido, R., y Kit, B. D. M. (2021)

Sistemas fotovoltaicos de recarga

Los sistemas fotovoltaicos se suelen dividir en dos grandes grupos: sistemas interconectados a la red eléctrica y sistemas aislados o autónomos (Sánchez Maza, 2008). Los sistemas interconectados permiten entregar a la red eléctrica toda la electricidad producida por el sistema solar durante el día; Es un sistema sin almacenamiento, es decir, no requiere un sistema de acumulación o batería (Castrillon, 2019). Los sistemas autónomos o aislados son aquellos que están eléctricamente desconectados de la red de distribución eléctrica; pueden estar constituidos por un conjunto de paneles para proporcionar más potencia o un solo panel solar conectado a una batería y a un regulador (Castrillon, 2019).

Alternativas para el diseño del sistema de recarga fotovoltaico

Se analizan las diferentes alternativas para el diseño del sistema de recarga fotovoltaico de las baterías de los distintos vehículos de movilidad eléctrica unipersonal.

Una primera alternativa es cuando la batería se puede desmontar o desinstalar del sistema y se conoce o tienen los datos técnicos o características de la misma, lo que facilita el



diseño, porque requiere un menor número de elementos y se denomina sistema fotovoltaico autónomo de DC para movilidad eléctrica. Los componentes del sistema, como se observa en la figura 5, están determinados por 3 bloques principales que son: los paneles solares (flexibles o rígidos), el regulador DC y la batería que se desea cargar.

Según las características de las baterías, ver Figura 5, los paneles deben proveer un voltaje de 42 V, 45 V y 59 V para poder cargar las baterías de 36 V, 48 V, y 52 V. Por ello se determina el voltaje y la potencia necesaria de los paneles fotovoltaicos comerciales (los cálculos se realizan más adelante). En este sistema se utiliza un proceso de carga lenta que trabaja con 2 o 3 V, por encima del voltaje nominal de las baterías, para un mayor tiempo de vida de la batería, lo que requiere de un tiempo de carga de 4 horas. También es posible la carga rápida de las baterías pero esto reduce el tiempo de vida de las baterías a un ciclo de vida de 800 cargas. Posteriormente, se calcula las características del regulador que alimenta las diferentes baterías.

Figura 5

Sistema fotovoltaico autónomo de DC para movilidad eléctrica unipersonal a. Con panel plegable flexible. b. Con panel fijo



La otra alternativa, que es la más común pero que requiere un mayor número de elementos, es cuando no se puede desmontar la batería por razones de garantía o porque viene como una unidad sellada y el fabricante provee un adaptador para su conexión a una toma de



voltaje de 120 VAC 60 Hz, como las que existen en las redes eléctricas domiciliarias normales.

Por ello, tal como se observa en la Figura 7, el sistema de recarga fotovoltaico necesita de cinco (5) elementos básicos: los paneles solares, un regulador comercial DC, una batería de almacenamiento de energía del sistema, un circuito inversor para la conversión de DC a AC y el adaptador que acompaña a la patineta, bicicleta o motos; aquí se utiliza una batería para el almacenamiento de energía y que el sistema pueda funcionar en la noche cuando no se tiene radiación solar (el cálculo de la batería se realiza más adelante). También es necesario el inversor para poder proveer una señal de AC de 120V y 60Hz donde se conecta el adaptador de voltaje que provee el fabricante. Como se ve en la figura 6, el adaptador que provee el fabricante de la patineta starker tiene los siguientes datos:

Figura 6

a. Medición de corriente, proceso de carga de la batería. b. Adaptador AC, datos y características



a.

Entrada de voltaje de 100 a 240 voltios AC, entre 50 y 60 HZ y una corriente de 2 o 2,5 amperio, tiempo de carga 2 a 4 h



b.

Nota. Fuente: a. construcción propia. B. Auteco, “Manual de garantía y Mantenimiento” (2013)

La metodología empleada consiste en medir con un amperímetro la corriente necesaria para la carga de la batería de la patineta, bicicleta y/o moto eléctrica. Estas



mediciones permiten calcular la cantidad de potencia (vatios) para el diseño del sistema solar de recarga, determinando la cantidad y tipo de paneles fotovoltaicos a emplear; igualmente, se calcula el regulador y la batería para el sistema autónomo, así como sus posibles formas de implementación. Como resultado se tiene dos prototipos de estación de recarga: prototipo uno compuesto por paneles fotovoltaicos, un regulador, y las baterías de la patineta, bicicleta y/o motor; el prototipo dos compuesto por paneles fotovoltaicos, el regulador, la batería, y el inversor.

La entrada de voltaje de un adaptador es de 100 a 240 VAC, entre 50 y 60 HZ y una corriente de 2 o 2,5 amperios, con las pruebas realizada en el proceso carga de la patineta la corriente de carga varía desde un valor de 1.5 amperios y se va reduciendo sustancialmente hasta que la batería alcanza su carga completa.

Resultados

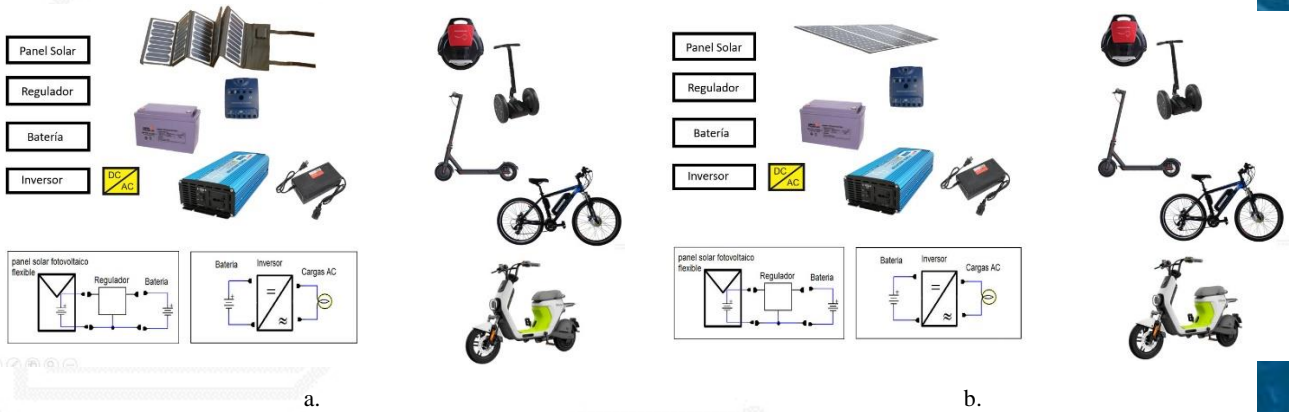
Para el cálculo de la Energía máxima diaria (E_d) que necesita el equipo, se multiplica el consumo en vatios del dispositivo por el número de horas que esté conectado ($500\text{ W} * 2\text{ h} = 1000\text{ W}$) y se emplea la ecuación (1) para determinar la potencia de los paneles fotovoltaicos a utilizar. Con la ecuación (2) se determina la capacidad en Amperios hora (Ah) de la batería para el sistema fotovoltaico autónomo de AC 120 que se observa en la figura 7.

Se tienen en cuenta consideraciones técnicas y económicas para el empleo de paneles fijos o plegable flexibles, dependiendo de si se desea que el sistema sea fijo o móvil (portátil).



Figura 7

Sistema fotovoltaico autónomo de AC 120V 60Hz para movilidad eléctrica unipersonal a. Con panel plegable o flexible. b. Con panel fijo



$$P_p = \frac{E_d * 1,15}{R_\beta * \eta_r} \quad (1)$$

Cálculo de potencia de sistema FV, donde:

P_p = Potencia pico del panel fotovoltaico en W

E_d = Energía máxima diaria (Wh/d)

1,15 = Factor de seguridad

R_β = Radiación máxima diaria Kwh m²/d

η_r = Rendimiento del cargador en (%)

$$C = \frac{E_d * A}{V * D} \quad (2)$$

Capacidad de la batería sistema FV, donde:

C = Capacidad de la batería (Ah)

E_d = Energía máxima diaria (Wh)

A = Autonomía en días (d)



V = Voltaje de la batería (V)

D = Profundidad de descarga admisible (%) (Braun Jean, 1999).

De forma similar se procede con la información de una moto eléctrica. Parámetros asociados a las motocicletas, como se aprecia en la figura 8.

Figura 8

Motocicleta eléctrica



Tipo de vehículo: Motocicletas
Motor: 1200 W
Peso: 120 kg aproximado
Autonomía: 45 km +/-10
Costo: recarga menos de \$10000 al mes
Velocidad: 45 km/h



El sistema se puede implementar con 3 o 4 paneles de 300 W, una batería de 12 V, 20 Ah y un inversor de onda pura de 1000 W.

Discusión

Teniendo en cuenta las actividades desarrolladas y el análisis realizado se plantea lo siguiente:

- Los prototipos se pueden implementar en varios diseños dependiendo de los diferentes voltajes de trabajo de los equipos, como por ejemplo: la batería de la bicicleta, moto y patineta.
- En la ciudad de Villavicencio no es común encontrar sistemas de recarga de energía en exteriores y requieren hacerlo en sus casas. Por lo anterior, es imprescindible la implementación de sistemas de recarga de energía eléctrica de fácil acceso y de dominio público.



- Como parte de las ventajas de implementación de estos sistemas de recarga de energía, se tienen las siguientes:
 - Repercute en el mejoramiento de la calidad de aire.
 - Descongestión vehicular.
 - Generación de otras alternativas de transporte diferentes a las tradicionales.
 - Fomento del uso de energías limpias favoreciendo el cumplimiento de lo estipulado por los ODS.
 - Ayuda a mitigar los efectos del cambio climático.
- Dependiendo de la cantidad de potencia que requiera el sistema de recarga de energía, se puede implementar de manera móvil y económica en cualquier lugar.
- A futuro, estos sistemas de recarga se pueden implementar para vehículos eléctricos pero se requerirá un número mayor de paneles solares y de interconexión a la red eléctrica, como por ejemplo, los sistemas que ya se han implementados en las ciudades de Bogotá y Medellín por la empresa Oasis Group (2022).

Conclusiones

Es importante para tener una ciudad sostenible e inteligente, pensar en que los sistemas de movilidad eléctrica necesitan de una infraestructura para recargar los diferentes vehículos eléctricos como patinetas, monociclos, bicicletas, motos o vehículos eléctricos y que estos sistemas pueden ser diseñados empleando energías renovables, en particular, con sistemas fotovoltaicos autónomos o interconectados a la red, de tal manera, que sean amigables con el medio ambiente evitando la contaminación por CO₂ y mitigando los efectos del cambio climático.

En la medida que se asuma el cumplimiento de los ODS y se dé facilidades para el cambio del parque automotor, así como la construcción de ciclo vías y estaciones de carga, como electrolinerías y sistemas de carga conectados a red, permiten una masificación de los sistemas de movilidad eléctrica unipersonal. Cuando estos sistemas se utilizan en Vehículos Eléctricos (VE) las potencias son más altas y requieren de sistemas de Media tensión, como se observa en la figura 9 de una electrolinería, para recarga de vehículos eléctricos en la que existen cuatro (4) formas de carga: súper lenta, lenta, rápida y súper rápida.



- Recarga súper lenta, cuando la intensidad de corriente se limita a 10 A o menos por no disponer de una base de recarga con protección e instalación eléctrica adecuada.
- Recarga lenta se realiza a 16 A, demandando unos 3,6 kW de potencia.
- Recarga rápida, la potencia que se demanda es muy alta, entre 44 y 50 kW.
- En la recarga súper rápida, la recarga de 22 a 24 kWh se puede efectuar en media hora.

Figura 9

Sistemas de recarga para vehículos eléctricos Ve



Nota. Fuente: E. Aragón (2018)

Estos sistemas hasta ahora se empiezan a implementar en el país con la llegada de sistemas masivos de transporte con movilidad eléctrica, principalmente en Bogotá y Medellín.



Referencias bibliográficas

- A. Analysis and U. Manual. (2012). “User Manual User Manual,” *Data Base*, 3304 (January), pp. 1–148.
- Aliexpress (2022). *Batería Ebike 48V 20AH 36V 10AH 52V 17AH bicicleta eléctrica Samsung Lithium ion* [en línea]. [Consulta: 06-10-2021].
<https://es.aliexpress.com/item/1005003679034442.html>
- Aliexpress, E., Unidos, E., Unido, R., y Kit, B. D. M. (2021). IEBIKE Motor Battery Store
Nuestras Ventajas: Especificación: 1–12.
- Aliexpress. (2021) *Kit de conversión de bicicleta eléctrica, 36V, 500W, batería de litio de 36V10AH* [en línea]. [Consulta: 06-10-2021]. Recuperado de:
<https://es.aliexpress.com/premium/electric-bike-conversion-kit.html>
- Alonso, J. A. (2021, diciembre 19). *Calcular placas solares necesarias para instalación aislada SunFields*. SunFields Distribuidor fotovoltaico: placas solares, inversores.
<https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/calcular-paneles-solares-necesarios-para-sistemas-aislados/>
- Andrés, R. (2015, octubre 15). *Los 5 mejores vehículos eléctricos urbanos y portátiles*. ComputerHoy. <https://computerhoy.com/listas/internet/5-mejores-vehiculos-electricos-urbanos-portatiles-35365>
- Aragón, E. (2018). “Qué necesito saber sobre modos y tipos de carga de un vehículo eléctrico” [Online]. Available: <https://movilidadelectrica.com/modos-y-tipos-de-carga-de-un-vehiculo-electrico/>
- Auteco, Starker (2021). *Manual de guía y mantenimiento* [en línea]. [Consulta: 06-10-2021].
https://media.autecomobility.com/recursos/pdf/manuales/Starker/Manual_de_garantia_y_mantenimiento_STARKER_S1_17_09_2021_linea.pdf
- BIOBIKE, E. E. (2020, febrero 20). *Los mejores motores de 2020 para bicicleta eléctrica*. BIOBIKE - bicicletas eléctricas. <https://www.biobike.es/2020/02/20/los-mejores-motores-de-2020-para-bicicleta-electrica/>
- Blog Bikelec. (2014, enero 22). *Sanyo llena Tokyo con estaciones de recarga y bicis para elegir*. <https://www.bikelec.es/blog/sanyo-llena-tokyo-con-estaciones-de-recarga-y-bicis-para-elegir>



Braun J. (1999). *Celdas solares*. Editorial Trillas.

CEPAL. (2018). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible Una oportunidad para América Latina y el Caribe. [En línea]. [Consulta: 06-10-2021].

<https://www.cepal.org/es/publicaciones/40155-la-agenda-2030-objetivos-desarrollo-sostenible-oportunidad-america-latina-caribe>.

Estévez, R. (2020, enero 17). ¿En qué consiste la micro movilidad urbana? ecointeligencia - cambia a un estilo de vida sostenible

<https://www.ecointeligencia.com/2020/01/micromovilidad/>.

González, J. (2018). *Diseño y construcción de un marco prototipo de una bicicleta urbana*. [Trabajo de grado, Universidad Técnica del Norte, Ingeniería en Mantenimiento Automotriz].

<http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/8088/1/04%20MAUT%20049%20TRABAJO%20DE%20GRADO.pdf>

Group Eco Green Energy, L. (2018). Building a Greener World EGE-100P-36. 2.

https://es.ensolar.com/pv/panel-datasheet/crystalline/48362?utm_source=ENFyutm_medium=panel_profileyutm_campaign=enquiry_company_directoryutm_content=29525

Korthauer, R. (2018). Lithium-ion batteries: Basics and applications. Lithium-Ion Batteries: Basics and

Losada, R. (2007). *Componentes De La Bicicleta*, pp. 19–29.

Martin, J. (2018, septiembre 5). Patinetes eléctricos: Toda la información sobre una solución de movilidad que nadie parece saber regular. Motor pasión Moto.

<https://www.motorpasionmoto.com/tecnologia/patinetes-electricos-toda-informacion-solucion-movilidad-que-nadie-parece-saber-regular>

Martin. (2018). *Todo sobre vehículos de movilidad personal*. [En línea]. [Consulta: 06-10-2021]. <https://www.consumoteca.com/motor/vehiculos-de-movilidad-personal/>

MiniPitBikeS. (2015, mayo 13). Patinete eléctrico, un nuevo concepto de transporte.

miniPitBikeS. <https://www.minipitbikes.es/blog/patinete-electrico-un-nuevo-concepto-de-transporte/>



Oasis Group. (s. f.). *Biciparqueaderos y Estaciones de Carga Eléctrica*.

<https://oasisgroup.online/>

Owners. Kuo. (2021). *Manual del propietario bicicleta eléctrica*.

<https://manualzz.com/download/5553378>

Padrón, F. (2014). *Baterías: Estado del Arte y Vigilancia Tecnológica 2013* [Trabajo de grado]. Universidad Pontificia Bolivariana.

Potenza. (s. f.). *PATINETA ELÉCTRICA STARKER S1 – NEGRO 2020*

<https://potenza.com.co/producto/patineta-electrica-starker-s1-negro-2020/>

Reiner Korthauer. (2019). *Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications Applications*, 1–413. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-53071-9>

Sánchez, M. (2008). *Energía solar fotovoltaica*. Editorial Limusa.

Westbrook, C. (2019, Julio 14). What is an electric scooter and where can you use one in the

UK? Metro. <https://metro.co.uk/2019/07/14/electric-scooter-can-use-one-uk-10288885/>



CAPÍTULO XIV

Una mirada a las Telecomunicaciones y las TIC. Su expresión en el proceso pedagógico universitario

A look at Telecommunications and ICT. Its expression in the university pedagogical process

Alexander Frank Pasquel Cajas ⁵⁶
Marco Villavicencio Cabrera ⁵⁷
Amancio Ricardo Rojas Cotrina ⁵⁸
Yojan Roy Alarcon Cajas⁵⁹

Resumen

Las telecomunicaciones se han convertido en una de las actividades más dinámicas alrededor del mundo, la evolución tecnológica ha transformado la industria de las telecomunicaciones. Por lo tanto, el objetivo del presente estudio es analizar las ventajas de la revolución tecnológica en los profesores y estudiantes para elevar la cultura científica investigativa en función de los intereses profesionales. En cuanto a la metodología es de tipo descriptivo con revisión bibliográfica y diseño no experimental ya que hay una condición de estímulo al que fueron expuestos la muestra. Asimismo, se considera como población de estudio a estudiantes de los programas de Ingeniería Industrial e Ingeniería de Sistemas de la Universidad Nacional Hermilio Valdizan, Huánuco ya que se desempeña la práctica docente en este ámbito. Los resultados señalan que las telecomunicaciones se han convertido en un mecanismo indispensable del desarrollo económico y social de cualquier país. Además, constituyen el conjunto de medios tecnológicos de comunicación y las aplicaciones de las ciencias de la información que permiten la captura, producción, almacenamiento, tratamiento y presentación de informaciones en forma de audio, imágenes y datos distribuidos a través de señales de naturaleza acústica, óptica de forma analógica o digital. Esto permite concluir que los espacios de acceso al conocimiento han alcanzado un alto nivel de desarrollo tecnológico y su influencia en los procesos de desarrollo social ha logrado un protagonismo acelerado. Estas formas de acceder al conocimiento traen consigo la introducción de la tecnología de información y comunicación en los procesos educativos que se desarrollan en las instituciones escolares.

Palabras clave: telecomunicaciones, TIC, proceso pedagógico.

⁵⁶ Ingeniero de Telecomunicaciones. Universidad Nacional Hermilio Valdizan. Huánuco, Perú. <https://orcid.org/0000-0002-0603-0329>. apasquel89@gmail.com

⁵⁷ Ingeniero Industrial. Universidad Nacional Hermilio Valdizan. Huánuco, Perú. <https://orcid.org/0000-0002-8879-9421>. marcovillavicencio@unheval.edu.pe

⁵⁸ Abogado. Universidad Nacional Hermilio Valdizan. Huánuco, Perú. <https://orcid.org/0000-0002-5767-8416>. arojas@unheval.edu.pe

⁵⁹ Ingeniero de Sistemas. Universidad Cesar Vallejo, Lima, Perú. <https://orcid.org/0000-0001-5382-3754>. alarcon1147@hotmail.com



Abstract

Telecommunications have become one of the most dynamic activities around the world, technological evolution has transformed the telecommunications industry. Therefore, the objective of this study is to analyze the advantages of the technological revolution in teachers and students to raise the scientific research culture based on professional interests. Regarding the methodology, it is of a descriptive type with a bibliographic review and a non-experimental design since there is a stimulus condition to which the sample was exposed; likewise, students from the faculty of industrial engineering and systems are considered as the study population, since they carry out teaching practice in this area. The results indicate that telecommunications have become an indispensable mechanism for the economic and social development of any country; In addition, they constitute the set of technological means of communication and the applications of information sciences that allow the capture, production, storage, treatment, and presentation of information in the form of audio, images, and data distributed through signals of an acoustic nature. optical, analog or digital. This allows us to conclude that the spaces of access to knowledge have reached a high level of technological development and their influence on the processes of social development have achieved an accelerated role, these forms of access to knowledge bring with them the introduction of information and communication technology. in the educational processes that take place in school institutions.

Keywords: telecommunications, ICT, pedagogical process



Introducción

En los momentos actuales, el desarrollo de la microelectrónica, la digitalización y las redes de transmisión a altas velocidades están acaeciando una revolución tecnológica de grandes dimensiones a nivel universal. Los conmutadores electrónicos y los sistemas inteligentes se han extendido por todo el mundo, de hecho, el negocio de las telecomunicaciones se ha transformado en una red de redes: un sistema entrelazado de medios inalámbricos, satélites, cable de cobre coaxial y fibra óptica reflejado en el crecimiento de Internet, que genera innovaciones tecnológicas.

En la actualidad, el crecimiento de los usuarios del servicio de Internet sobrepasa ampliamente el crecimiento de servicios como la telefonía celular y la telefonía básica. Pero las condiciones del mundo actual, de los pueblos caracterizado por la desigualdad demuestra que falta mucho por hacer en cuanto a los beneficios de la revolución tecnológica y su uso; se reconoce que aún son insuficiente los esfuerzos realizados para que los beneficios de las telecomunicaciones lleguen a todos los rincones del mundo e impacte en el desarrollo sustentable.

Las telecomunicaciones se han convertido en una de las actividades más dinámicas alrededor del mundo, la evolución tecnológica ha transformado la industria de las telecomunicaciones, marcando la velocidad de esta transformación en cada uno de los países.

Los sujetos al comunicarse emplean un conjunto de recursos para hacer que la transferencia de información sea exitosa; están de acuerdo en la forma en que hacen llegar la información de uno al otro, mediante el lenguaje hablado o escrito, señas, mímica o alguna otra técnica que permita codificar el mensaje que queremos hacer llegar; por ejemplo, los antepasados se comunicaban, mediante señales de humo, tambores, entre otras formas de comunicación. En la actualidad, estas formas de comunicación han quedado superadas por la comunicación a través de impulsos eléctricos, debido a que se pueden transmitir las señales eléctricas a distancias mayores en todo el mundo a una velocidad extremadamente alta.

La comunicación puede ser mediante señales ópticas, eléctricas o electromagnéticas. Por otro lado, existen métodos básicos de comunicación: en papel, personal y electrónico. Algunos tipos de comunicación son combinaciones de estos métodos. Un ejemplo del pasado es el Fax, un equipo capaz de transmitir imágenes de documentos en papel sobre la línea telefónica y reproducirlas en un lugar distante. Actualmente, la mayor parte del proceso se puede hacer en forma electrónica al escribir directo a la computadora, transmitirlo y



almacenarlo en otra computadora para ahí revisarlo directamente. La impresión viene a ser un paso opcional. Estos aspectos revisten gran importancia para el logro de la pertinencia universitaria en los momentos actuales.

Es por todo lo expuesto que los profesores y estudiantes deben aprovechar las ventajas de esta revolución tecnológica para elevar la cultura científica investigativa en función de los intereses profesionales, utilizar la diversidad de las herramientas que proporciona este sistema de comunicación moderna en función de la búsqueda novedosa del conocimiento; propiciar intercambios científicos entre los sujetos, modo de elevar su cultura científica profesional y el desarrollo de las competencias investigativas.

Por otro lado, se decidió incluir en este texto un sistema de contenidos relacionados con las telecomunicaciones con el propósito de que los estudiantes universitarios puedan emplear algunas de las herramientas y dispositivos de esta gama tecnológica en el desarrollo de los contenidos incluidos en el plan de estudio la carrera universitaria que cursan durante el proceso pedagógico con un uso educativo y no verlo solamente como un medio de información sino de aprendizaje, reflexión y regulación de los procesos cognitivos afectivos como componentes de su personalidad.

Finalmente, el presente estudio permite profundizar y reflexionar acerca de la valía que tiene el empleo pedagógico sobre las facilidades del desarrollo tecnológico y de las telecomunicaciones en los momentos actuales como fuentes para ampliar la cultura científica investigativa.

Método

La investigación desarrollada es de tipo descriptivo de revisión bibliográfica referente al desarrollo y empleo de las tecnologías de la información y comunicación y las telecomunicaciones en el proceso pedagógico universitario. El diseño de la investigación es no experimental, porque no se hizo manipulación de las variables, por lo que, no hay condición de estímulo al que fueron expuestos las personas de la muestra, como lo señalan Hernández, Fernández y Baptista (2014): “estudios que se realizan sin la manipulación deliberada de variables y en los que sólo se observan los fenómenos en su ambiente natural para después analizarlos” (p. 149). En cuanto a la población fueron, estudiantes de la facultad



de Ingeniería Industrial y de Sistemas por razones de desarrollar la práctica docente en ese ámbito.

Asimismo, la técnica utilizada para la recolección de datos fue la revisión bibliográfica y el instrumento utilizado el de las fichas de recogida de datos, esto debido a que se realizó un análisis a la documentación registrada por los diferentes docentes a través de la plataforma de Gestión Docente, dicha plataforma permite conocer si los docentes suben las clases, realizan asesorías o cualquier otra actividad relacionada al curso, de esta manera se pudo conocer el nivel de manejo de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) por parte de los docentes, el Intranet de alumnos de las Facultades de Ingeniería de Sistemas y de Ingeniería Industrial, permitió conocer si el alumno ingresaba a la plataforma para descargar las clases o ingresar a sus clases virtuales, solicitar asesorías, subir trabajos, etc. Ello permitió conocer también el uso y manejo de la plataforma.

El texto está estructurado en cuatro secciones, en la primera se abordan algunas generalidades acerca de las telecomunicaciones; en la segunda se hace un análisis de la TIC en el proceso pedagógico, visto este como proceso extramuros que va más allá de lo que se percibe internamente como parte del proceso docente; en la sección tres se abordan las exigencias didácticas del uso de la TIC en el proceso de enseñanza aprendizaje, se destaca el empleo de la computadora y del celular con fines didácticos; la cuarta sección refiere la utilidad de la telecomunicación en las clases, su expresión en el desarrollo de curso y el comportamiento organizacional de la Universidad Nacional Herminio Valdizán de Huánuco, por último, se anexan algunos términos que se utilizaron durante el desarrollo de este texto.

Finalmente, el estudio que se realizó al ser del tipo descriptivo solo contó con una única etapa. Dentro de esta etapa se contó con dos fases: la primera para recopilar la información sobre el uso de la plataforma de Gestión docente e Intranet alumnos, esto mediante una solicitud al área de informática de la Universidad Hermilio Valdizán de Huánuco al finalizar el semestre académico. La segunda fase para la aplicación del instrumento a la información obtenida por parte del área de informática y posteriormente se realizó el procesamiento de datos.



Resultados

Las telecomunicaciones se han convertido en un mecanismo indispensable del desarrollo económico y social de cualquier país. Su impacto, se refleja en todos los sectores de la sociedad a partir de la difusión de los medios o herramientas tecnológicas que favorecen la comunicación entre personas e instituciones a largas distancias. Gracias a los avances que estas han tenido en la actualidad, se ha logrado establecer conexión directa entre medios tecnológicos dedicados a la investigación astronómica y los propios investigadores.

Las herramientas tecnológicas como las computadoras, los teléfonos fijos, inalámbricos y móviles, la radio, la televisión analógica, digital y satelital son partes intrínsecas del desarrollo de las telecomunicaciones y constituyen en la actualidad TIC.

Las telecomunicaciones y su impacto social

Es por ello, que en la actualidad tanto los países, más desarrollados, como aquellos en vía de desarrollo, asumen modelos de innovación tecnológica mediante la actualización de los medios y herramientas de las telecomunicaciones y su aplicación a servicios básicos como: la salud, la educación, la infocomunicación, el agua, la cultura, así como otros satisfactores sociales que favorecen la calidad de vida. De esta manera, se comprende hoy día que una adecuada organización e implementación de las telecomunicaciones en el sector productivo, genera efectos positivos a otros y viceversa.

Las telecomunicaciones, se apoyan en instrumentos y técnicas de diversas ciencias, y sus avances más significativos contribuyen a su enriquecimiento y actualización, de ahí que este campo científico revoluciona constantemente. Es por ello que, las telecomunicaciones asumen como principio fundamental los componentes establecidos dentro del modelo clásico de la comunicación, pero ajustado a un enfoque tecnológico progresivo, y que hacen posible la eficiencia del proceso comunicativo.

Las TIC como herramientas básicas de las telecomunicaciones

En la actualidad, los espacios de acceso al conocimiento han alcanzado un alto nivel de desarrollo tecnológico y su influencia en los procesos de desarrollo social han logrado un protagonismo al punto que es prácticamente imposible organizar una actividad intelectual o empresarial en las que no estén presente con un carácter interactivo, las TIC, en las que se destaca el uso de los teléfonos móviles, las computadoras, el internet y sus herramientas de comunicación, la televisión digital, aplicaciones como Google, entre otros medios.



Dada la vigencia que han adquirido el uso de las TIC en la actualidad, sumado a las necesidades que impone su constante actualización científico-tecnológica, resulta necesario acercarse cada vez más a la comprensión del concepto. Es decir aquellos medios tecnológicos que caracterizan, describen, explican y argumentan su utilidad en la práctica social, lo que posibilitará un acercamiento acertado y específico al conocimiento teórico-metodológico del uso y generalización de las TIC en la vida cotidiana.

Como se puede apreciar en las definiciones anteriormente analizadas sobre el concepto TIC, se ponen en consonancia criterios de algunos investigadores destacados en su estudio y caracterización. Estos coinciden en que estas tienen como característica más significativa, considerarlas en primer orden como un producto tecnológico de alta prestación surgido del conocimiento, cuya función principal es almacenar, organizar datos, generar información y divulgarla.

Por tanto, se puede asumir que las TIC constituyen el conjunto de medios tecnológicos (radio, televisión y telefonía convencional) de comunicación y las aplicaciones de las ciencias de la información que permiten la captura, producción, almacenamiento, tratamiento, y presentación de informaciones en forma de audio, imágenes y datos distribuidos a través de señales de naturaleza acústica, óptica o electromagnética de forma analógica o digital. Es por ello que, las TIC incluyen la electrónica como tecnología base que soporta el desarrollo de las telecomunicaciones, la informática y el audiovisual.

En un segundo plano, se considera que en el afán de organizar y divulgar el conocimiento, se logra una característica propia de los grupos humanos y de la comunicación que de ellos se genera a partir de la interactividad que se puede lograr gracias a su utilidad; la cual tiene un sentido pleno para su utilización en el ámbito educativo y didáctico, ya que estas permiten crear mensajes e imágenes, decidir la secuencia de la información, establecer el ritmo, cantidad y profundización de la información que se desea.

A partir del análisis realizado de las definiciones de TIC, dada la naturaleza que caracteriza a dicho concepto, se considera que los elementos esenciales que se identifican son los siguientes:

- Deben florecer de nuevos conocimientos, o la aplicación innovadora del conocimiento existente.
- Conducen al rápido desarrollo de nuevas capacidades.



- Tienen impacto significativo en la esfera económico, social y políticos de los países.
- Crean nuevas oportunidades tanto laborales como comerciales, así como nuevos retos sociales para tratar los problemas mundiales relacionados con el medio ambiente, la industrialización y la población en general.
- Favorecen el potencial en la adquisición de nuevos conocimientos, en empresas, industrias y plataformas tecnológicas.
- Constituye una herramienta indispensable para el desarrollo de la educación a distancia y uso como medio de enseñanza en los procesos instructivos y educativos durante el proceso pedagógico.

Otras características que se pueden enunciar de las TIC, es que estas son instrumentos cognitivos que mejoran las capacidades mentales y permiten el desarrollo de nuevas formas de pensar, gracias a su uso y explotación se obtiene fácil acceso a todo tipo de información o conocimiento formado, debido a que proporcionan instrumentos para todo tipo de procesamiento de datos, mediante ellas se obtienen canales de comunicación inmediata, que posibilitan difundir información, socializar el conocimiento estableciendo contacto directo con cualquier persona o institución del mundo.

Del mismo modo, una de las ventajas más reconocidas y significativas de las TIC, es su capacidad de almacenamiento en un mínimo espacio, lo que posibilita concentrar gran cantidad de datos en forma de: imágenes, representaciones gráficas, formularios, textos literarios, audios, videos u otros. También a través de estas, se puede garantizar el intercambio de estos datos mediante programas de gestión, videojuegos, materiales formativos multimedia, sistemas expertos específicos, entre otros.

Otro aspecto de gran significatividad y resaltada en las definiciones analizadas, es la capacidad que poseen las TIC para identificar cualquier información, procesarla y finalmente convertirla en formatos más simples para almacenarla o distribuirla. Entre ellos programas de identificación de caracteres que leen y convierten en voz los textos, programas de reconocimiento de voz que cifran al dictado, escáneres y cámaras digitales que digitalizan imágenes entre otros.

Todas estas características, hacen de las TIC una herramienta importante para su implementación como medio de enseñanza del proceso de enseñanza aprendizaje; a partir de su utilización se alcanza una mayor motivación por el estudio por parte de los estudiantes,



debido a la capacidad de gestión del conocimiento de manera independiente, les brinda posibilidades de ir desarrollando sus propias iniciativas; poseer además, un alto grado de gestión del conocimiento desde un enfoque interdisciplinario que favorece el desarrollo de una cultura general integral y el descubrimiento de nuevas formas de autoaprendizaje.

Discusión

Las formas de comunicación entre las personas que se encuentran a larga distancia han revolucionado considerablemente, gracias a mecanismos inducidos a través de impulsos eléctricos y electromagnéticos, los medios antiguos de comunicación han sido superados y solo utilizados en ocasiones en actividades específicas como el caso de las maniobras militares. Desde el punto de vista semántico, la palabra telecomunicación comprende todas las formas de comunicación a distancia. Por lo tanto, desde este punto de vista la telecomunicación es una técnica que consiste en la transferencia de un mensaje desde un punto hacia otro, prácticamente con la característica adicional de ser bidireccional y utilizando mecanismos tecnológicos que transmiten información a través de impulsos eléctricos. Desde el punto de vista científico, también se han aportado diferentes definiciones de esta categoría, entre ellas prevalecen las de Anttalainen (2003), Huidobro (2004), Villafaña (2008), entre otros. Como se aprecia, en las definiciones anteriormente acotadas, las telecomunicaciones se producen mediante medios o instrumentos técnicos que originan impulsos electromagnéticos a grandes velocidades y esto es lo que hace posible la validez de estos servicios en la sociedad, su aplicación industrial y en los diversos servicios básicos parte de la sociedad, los cuales hacen que los países que asumen la informatización de la sociedad atemperado al desarrollo de las telecomunicaciones, logren un nivel de calidad de vida acorde a los estándares establecidos en la agenda internacional para el desarrollo.

La influencia de las nuevas tecnologías de la información y comunicación en la sociedad actual se considera un elemento fundamental y por consiguiente un necesario e imprescindible factor de desarrollo. Aspectos que exigen del individuo un conocimiento acertado y una actualización constante en los medios tecnológicos que se constituyen en TIC, lo que exige a su vez la necesidad de que cada individuo profesional o no se involucre en el proceso de aprendizaje y actualización de los modos de interacción con las TIC para participar de forma activa y proactiva en la construcción y el desarrollo de la sociedad. Martínez (1996), considera que todos aquellos medios de comunicación y de tratamiento de



la información van surgiendo de la unión de los avances propiciados por el desarrollo de la tecnología electrónica y las herramientas conceptuales, tanto conocidas como aquellas otras que vayan siendo desarrolladas como consecuencia de la utilización de estas mismas nuevas tecnologías y del avance del conocimiento humano (Adell, 1998) las TIC son el conjunto de procesos y productos derivados de las nuevas herramientas, soportes de información y canales de comunicación relacionados con el almacenamiento, procesamiento y transmisión digitalizados de la información.

Por tanto, se puede asumir que las TIC constituyen el conjunto de medios tecnológicos (radio, televisión y telefonía convencional) de comunicación y las aplicaciones de las ciencias de la información que permiten la captura, producción, almacenamiento, tratamiento, y presentación de informaciones en forma de audio, imágenes y datos distribuidos a través de señales de naturaleza acústica, óptica o electromagnética de forma analógica o digital. Es por ello que, las TIC incluyen la electrónica como tecnología base que soporta el desarrollo de las telecomunicaciones, la informática y el audiovisual.

A partir del análisis realizado, se considera necesario acotar como una idea esencial, el análisis realizado por Marín y Cabero (2000) el cual luego de hacer una valoración crítica de la problemática de la conceptualización y delimitación del término TIC, concluye: la denominación de Nuevas TIC es utilizada para referirse a una serie de nuevos medios como los hipertextos, las multimedias, Internet, la realidad virtual o la televisión por satélite, y termina diciendo en definitiva son instrumentos técnicos que giran en torno a los nuevos descubrimientos de la información.

El uso de las TIC, provoca en muchos casos la mejora de las habilidades de expresión y creatividad, al facilitar el desarrollo de competencias de: expresión escrita, gráfica y audiovisual. Con las TIC se obtiene acceso a múltiples recursos educativos y entornos de aprendizaje, aprendiendo en menos tiempo y con posibilidad de autoevaluarse. Se abre un espectro de posibilidades para su uso en el proceso pedagógico que puede ubicarse tanto en el contexto de la educación a distancia, como en el de modalidades de enseñanza presencial y semipresencial.

A pesar de las características de las TIC, enunciadas además, como ventajas dado su valor didáctico, varios investigadores en este campo entre ellos: Bartolomé (1996), Gallego (1997), Colom (1998), Avila (1999) y Ollivier (1999) han enunciado un conjunto de desventajas que aunque no las hacen perder valor científico pedagógico, si hay que tener en



cuenta a la hora de su utilización como medio de enseñanza, en función de no desviar la atención de los estudiantes del objeto de aprendizaje y de los propios objetivos y contenidos de la educación.

Los colectivos pedagógicos de las instituciones educativas deben elaborar estrategias, recomendaciones y alternativas didácticas con orientaciones precisas para que se demuestre y enseñe el uso racional de las TIC por parte del estudiantado, de modo que esta herramienta no pierda su esencia y se convierta como fuente idónea de elevar la cultura científica investiga e innovadora en la adquisición de los conocimientos y el desarrollo de las competencias cognitivas, procedimentales actitudinales y profesionales en los estudiantes.

La carrera de Ingeniería Industrial y de Sistema debe buscar fortalecer su objetivo de formar profesionales que resuelvan problemas complejos de todo tipo de organización para mejorar, optimizar e innovar procesos y sistemas para que sean sustentables. La implementación de las TIC en el proceso pedagógico de la asignatura Comportamiento Organizacional se convierte en una herramienta para desarrollar las competencias profesionales que exige el currículo de la carrera Ingeniería Industrial y de Sistemas mediante procedimientos y medios que favorecen el intercambio y la comunicación entre los estudiantes y profesores

Los ejemplos de actividades concebidas apoyadas en el uso de la tecnología de la información y la comunicación, pueden ser espacios novedosos para que los estudiantes desarrollen las competencias cognitiva y profesionales mediante la investigación, la reflexión, la comunicación y el intercambio durante el proceso pedagógico de comportamiento organizacional

Conclusiones

Los espacios de acceso al conocimiento han alcanzado un alto nivel de desarrollo tecnológico y su influencia en los procesos de desarrollo social ha logrado un protagonismo al punto que es prácticamente imposible organizar una actividad intelectual en la que no estén presentes las TIC.

Las telecomunicaciones se producen mediante medios o herramientas técnicas que producen impulsos electromagnéticos a grandes velocidades que hace posible la eficiencia de estos servicios en la sociedad, su aplicación industrial y en las diversas infraestructura parte



de la sociedad hacen que los países que siguen un modelo tecnológico basado en el desarrollo de las telecomunicaciones, alcancen un nivel de calidad de vida acorde a los estándares establecidos en la agenda internacional para el desarrollo.

La Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC) en el campo de la educación nace como un desafío en las metodologías y práctica pedagógica y de la educación en general dentro de cualquier país. Mediante esta integración se establecen cambios en los roles que desempeñan cada uno de los sujetos involucrados en el proceso de enseñanza – aprendizaje como parte del proceso pedagógico.

La implementación de las herramientas tecnológicas en los proceso educativos y formativos institucionales tienen mucha valía para el desarrollo social, político y económico del país; desde el contexto pedagógico institucional, los estudiantes se insertan a la vida, económica-productiva, política- social -cultural de su nación apoyado en la diversidad de herramientas tecnológicas que ofrece la TIC desde su uso en el salón de clase.



Referencias bibliográficas

- Addine, F. (2012). *Didáctica de la Educación Superior*. La Habana : Pueblo y Educación.
- Adell, J. (1998). “Redes y educación”. En *Nuevas tecnologías, comunicación audiovisual y educación*. Barcelona: Cedecs.
- Anttalainen, T. (2003). *Introduction to telecommunications network engineering*. Reino Unido: Artech House.
- Avila Muñoz, P. (1999). Aprendizaje con Nuevas Tecnologías Paradigma Emergente. Revista electrónica de tecnología educativa, pp. 16-24.
http://investigacion.ilce.edu.mx/panel_control/doc/c37aprendizaje.pdf
- Balart, C., y Cortés, S. (2012). *Una mirada histórica del impacto de las TIC en la sociedad del conocimiento en el contexto nacional actual*. Santiago de Chile: UMCE.
- Bartolomé Pina, A. R. (2006). Preparando para un nuevo modo de conocer. Edutec. Revista Electrónica De Tecnología Educativa, (4), a004.
<https://doi.org/10.21556/edutec.1996.4.573>
- Bermúdez, R., y Pérez, L. M. (2002). *La personalidad, su diagnóstico y desarrollo*. La Habana: Pueblo y Educación.
- Blanco, L. (2008). *Sistema de información para el economista y el contador*. Mexico: ILCE.
- Blau, G., y Boal, K. (1987). *Conceptualizing How Job involvement and Organizational Commitment Affect Turnover and Absenteeism*”. New York: Academy of Management Review.
- Brunner, J. (2015). *Globalización y el futuro de la educación: Tendencias, desafíos, estrategias. Seminario sobre Prospectiva de la Educación en la Región de América Latina y el Caribe*. Santiago de Chile: UNESCO.
- Cabero, J. (1994). Nuevas tecnologías, comunicación y educación. En. Grupo de Tecnología Educativa. *EDUTEK Revista electrónica de tecnología educativa*, 3. pp. 137-149.
<https://www.redalyc.org/pdf/158/15800304.pdf>
- Cabero, J., y Marín, V. (2014). Miradas sobre la formación del profesorado en tecnologías de información y comunicación TIC. *Revista Venezolana de Información de Tecnología*



y *Conocimiento*, pp. 11-24, ISSN 1690-7515, Vol. 11, N°. 2, 2014

<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5101939>

Caicedo Tamayo, A. M., & Rojas Ospina, T. (2014). Creencias, conocimientos y usos de las TIC de los profesores universitarios. *Educación y Educadores*, 17(3), 517–533.

<https://doi.org/10.5294/edu.2014.17.3.7>.

Castells, M. (1999). *La era de la información: economía, sociedad y cultura*. México: Siglo XXI.

Chiavenato, I. (2004). *Introducción a la teoría general de Administración*. Colombia: McGraw-Hill.

Colom, A. (1998). Pedagogía tecnológica para la educación a distancia en los nuevos escenarios educativos y las transformaciones tecnológicas. *ILCE*, pp. 25-40, ISSN 0187-0785 año 12.No 27, enero a junio 1998.

http://investigacion.ilce.edu.mx/panel_control/doc/tecycomeduno27.pdf

Deal, T., y Kennedy, A. (2006). *Corporate Culture*. Casa Nueva.

Defourny, V. (2010). La TIC en la Educación. *Impacto de la TIC en la Educación*. Brasilia: UNESCO.

del Toro-Rodríguez, Mundefined., (2010). Tendencias en la utilización de las tecnologías de la información y la comunicación por los profesionales de la educación. *VARONA*, (51),29-35. ISSN: 0864-196X.

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=360635569005>

Delors, J. (1996). *La educación encierra un tesoro. Informe a la UNESCO de la Comisión Internacional sobre la Educación para el siglo XXI*. UNESCO.

Duart, J. M., & Lupiáñez, F. (2005). E-strategias en la introducción y uso de las TIC en la universidad. *RUSC. Universities and Knowledge Society Journal*, 2(1),5-31. ISSN: .

Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=78017141006>

ECURED. (12 de junio de 2020). *Qué es una pizarra interactiva*. <http://www.ecured.edu.com>

Enciwordpredia, L. (22 de 8 de 2017). <https://lawebdetuvida.com> . Recuperado el 7 de 6 de 2021, de <https://lawebdetuvida.com>



- Fernández Aedo, R. R., Server García, P. M., & Cepero Fadruga, E. (2001). El aprendizaje con el uso de las nuevas tecnologías de la información y las comunicaciones. *Revista Iberoamericana De Educación*, 25(1), 1-9. <https://doi.org/10.35362/rie2512912>
- Festinger, L. (1967). *A Theory of Cognitive Dissonance*. Stanford: Stanford University Press.
- Fernández Collado, C. (1997). *Comunicación en las Organizaciones*. Trillas.
- Fernández, A. M. (2003). *Comunicación Educativa*. La Habana: Pueblo y Educación.
- Gallego, M. (1997). *Cuestiones y polémicas en la investigación sobre medios de enseñanza en La Tecnología Educativa en acción*. Granada: FORCE. Universidad de Granada.
- Huidobro, J. M. (2004). *Manual de telecomunicaciones*. Madrid: Alfaomega, Ra-Ma.
- James, R. (1998). *Information and Communication Technology (ICT) and the Quality of Learning»*. CERI.
- Klingberg, L. (1978). *Introducción a la Ddidáctica General*. La Habana: Pueblo y Educación.
- Larousse. (2011). *Diccionario básico de la Lengua Española*. Barcelona: Ediciones Larousse.
- Llorens, F. (2012). Tendencias TIC para el Apoyo a la Docencia Universitaria. Informe CRUE,. *tendencias TIC para el Apoyo a la Docencia Universitaria. Informe CRUE*, (pp. 329-333). Brasil: Educar en Curitiba.
- Mena, M. (7 de julio de 2014). *Características y servicios de la internet*. Características y servicios de la internet: <http://www.prezi.com>
- MINED. (2012). Pedagogía. En C. d. autores, *Pedagogía*. La Habana: Pueblo y Educación.
- Moreira, M. (2009). *Introducción a la tecnología educativa*. San Cristóbal de La Laguna, España: Universidad de La Laguna.
- Navarro, E. (10 de junio de 2021). *PRODEL Pizarra interactiva*. PRODEL Pizarra interactiva: <http://www.prodel.es>
- NeoAttack. (3 de junio de 2021). *Mass Media*. Mass Media-NeoAttack: <http://www.neoattack.com>



- Ollivier, B. (1999). “La universidad y la educación, entre el multimedia y la mundialización ¿Hacia una nueva ideología?”. En *Tecnología y Comunicación Educativas (12)*. México: ILCE.
- Pasquel, A. F. (2021). *Comportamiento Organizacional*. Huanuco: Universidad Nacional Hermilio Valdizán.
- Phablet. (7 de junio de 2021). *Qué es una Phablet Tecnología+Informática*.
<http://www.tecnologia-informatica.com>
- Prado, A., y Jimenez. (2016). Una visión completa de las TIC en el sistema Universitario Español para una evolución necesaria. Conferencia de Rectores de las Universidades Españolas (CRUE). *Conferencias de Rectores de las Universidades Españolas*. España: CRUE.
- Rico, P., Santos, M., y Viaña, M. (2004). *Proceso de enseñanza aprendizaje desarrollador en la Esc. p*. La Habana: Pueblo y Educación.
- Robbins, S. P., y Judge, T. A. (2009). *Comportamiento Organizacional*. Mexico: Penson Educacion.
- Villafaña, D. F. (2008). *Fundamentos de Telecomunicaciones*. Mérida: Instituto Tecnológico de Mérida.
- Wikipedia libre. (10 de diciembre de 2019). <https://www.Significados.com>actitud>
- Wikipedia. (10 de mayo de 2021). *Ley de Snell-Wikipedia, la enciclopedia libre*. Ley de Snell-Wikipedia, la enciclopedia libre: <http://www.es.m.wikipedia.org>
- Wikipedia. (16 de junio de 2021). *Add-on- Wikipedia*. Add-on- Wikipedia:
<http://www.es.m.wikipedia.org>
- Wikipedia. (23 de junio de 2019). *Tableta computadora. computadora portatil de pantalla táctil*. Tableta computadora. computadora portatil de pantalla táctil:
<http://www.m.wikipedia.org>
- Wikipedia. (25 de mayo de 2021). *Hardware-Wikipedia, la enciclopedia libre*. Hardware-Wikipedia, la enciclopedia libre: <http://www.es.m.wikipedia.org>
- Wikipedia. (5 de junio de 2021). *Códec-wikipedia, la enciclopedia*. Códec-wikipedia, la enciclopedia: <http://www.es.wikipedia.org>



Wikipedia. (7 de mayo de 2014). *El video. Características esenciales*. El video.

Características esenciales: <http://www.wikipedia.org>

Wikipedia. (8 de junio de 2021). *Appe II- Wikipedia, la enciclopedia libre*. Appe II-

Wikipedia, la enciclopedia libre: <http://www.es.m.wikipedia.org>



Buscopoli Motor de Búsqueda basado en tecnologías semánticas para el SIUMAR*Buscopoli Search engine based on semantic technologies for SIUMAR*Marlon Alexis Quenoran Chara⁶⁰Valeria Aroca Paz⁶¹Yerson Adrian Insuasty Rosero⁶²Wilmer Santiago Lasso Cussi⁶³**Resumen**

Desarrollar habilidades como el análisis, generación de pensamiento crítico, creatividad, gusto por la investigación y facilidad para expresar pensamientos es fundamental. Por esto es importante resaltar el servicio que presta SIUMAR (Sistema de Investigaciones de la Universidad Mariana), como medio de apoyo de procesos formativos y académicos, que dispone de herramientas adecuadas permitiendo el acceso a la información y con ello posibilita el cumplimiento de los objetivos trazados por esta dependencia. El SIUMAR no dispone de un sistema de búsqueda web de todo tipo de información, por lo que la búsqueda se realiza a través de Excel y Word, una tarea tediosa y compleja que no arroja los resultados deseados. Por consiguiente, en este trabajo se presenta un proyecto denominado “BUSCOPOLI MOTOR DE BÚSQUEDA BASADO EN TECNOLOGÍAS SEMÁNTICAS PARA EL SIUMAR”, basado en una ontología específica que permita buscar información de una manera más específica permitiendo realizar consultas con sentido semántico, presentando resultados eficientes y más aproximados a lo que cada usuario busca. Se describe de manera general componentes del modelo, interfaces de usuario y resultados de evaluación. Se contempla la evaluación en cuanto a la precisión del sistema, aplicando métricas utilizadas en recuperación de información y pruebas de aceptación para posteriormente emitir las conclusiones de la investigación.

Palabras clave: ontología, SIUMAR, motor de búsqueda, motores de búsqueda, consulta semántica.

⁶⁰ Ingeniero de Sistemas. Universidad Mariana, Pasto. Colombia. <https://orcid.org/0000-0001-8098-3534>. mquenoran@umariana.edu.co

⁶¹ Ingeniera de Sistemas. Universidad Mariana, Pasto. Colombia. <https://orcid.org/0000-0003-0985-4099>. varoca@umariana.edu.co

⁶² Ingeniero de Sistemas. Universidad Mariana, Pasto. Colombia. <https://orcid.org/0000-0003-2838-0036>. yinsuasty@umariana.edu.co

⁶³ Ingeniero de Sistemas. Universidad Mariana, Pasto. Colombia. <https://orcid.org/0000-0002-3507-5913>. wcussi@umariana.edu.co



Abstract

Develop skills such as analysis, generation of critical thinking, creativity, love of research and facility to express thoughts. For this reason, it is important to highlight the service provided by SIUMAR (Mariana University Research System), as a means of supporting training and academic processes, for which it is essential that it has adequate tools that allow access to information and with it can meet the objectives set by this dependency. SIUMAR does not have a web search system for all types of information, so the search is carried out through Excel and Word, a tedious and complex task that does not yield the desired results. Therefore, in this work a project called "BUSCOPOLI SEARCH ENGINE BASED ON SEMANTIC TECHNOLOGIES FOR SIUMAR" is presented, based on a specific ontology that allows searching for information in a more specific way, allowing queries with semantic meaning, presenting efficient results and closer to what each user is looking for. Components of the model, user interfaces and evaluation results are described in a general way. The evaluation regarding the precision of the system is contemplated, applying metrics used in information retrieval and acceptance tests to later issue the conclusions of the investigation.

Keywords: ontology, SIUMAR, search engine, semantic query



Introducción

La investigación parte del hecho que la búsqueda en el SIUMAR, Sistema de Investigaciones de la Universidad Mariana, es un fenómeno de gran relevancia donde se ve necesario asumir desafíos como la brecha semántica que contiene conceptos con alto nivel de abstracción que describen dichos contenidos como lo hace el buscador árabe CASONTO (An efficient and scalable Arabic semantic search engine based on a domain specific ontology and question answering) y también el método MODS (Marco Ontológico Dinámico Semántico) echo en Chile, en la Web Semántica la consulta para el MODS, es un elemento que aporta información útil para formarse una idea del tipo de usuario de una manera más exacta a una respuesta que cada vez sea más certera para satisfacer las necesidades del usuario en un lenguaje natural, perfeccionando sus esquemas internos frente a la dinámica de la web. Lo cual Buscopoli también pretende alcanzar, y que son usados por los usuarios para buscar información.

Se optó por seleccionar herramientas libres para el desarrollo del motor de búsqueda. Por un lado, se empleó Django como herramienta de desarrollo, es un framework web de alto nivel que permite el desarrollo rápido de sitios web seguros y sustentables, mientras que como motor de base de datos se decidió por MongoDB, que facilita el control del acceso a su base de datos. Se detalla cada una de estas herramientas, planteando los motivos por los cuales fueron seleccionadas para este proyecto: Ontología MODS, donde dentro de estas se encuentran ontología específica, ontología mixta y ontología lingüística.

Otro desafío es entregar a los usuarios una interfaz que facilite la búsqueda, logrando así complacer las necesidades de información a través del motor de búsqueda (Buscopoli) que se espera, logre fortalecer y promover la visibilidad de la comunidad académica Institucional, en los ámbitos científico, académico y tecnológico.

La Universidad identificó la necesidad de integrar un motor de búsqueda con tecnologías semánticas acorde a las necesidades del centro de investigaciones de la Universidad Mariana (SIUMAR) para que los investigadores y administrativos tengan un mejor manejo de información y tener seguimiento a esta misma de tal forma que esta les sea útil, de fácil manejo y un buen rendimiento, de una manera rápida y confiable.



Método

En este proyecto se realiza un Motor de Búsqueda que útil, de fácil manejo y buen rendimiento, el cual es el primer buscador para el sistema de investigaciones de la Universidad Mariana, vinculándose como medio de apoyo a los procesos formativos y académicos; ya que desafortunadamente la Universidad Mariana cuenta con un banco de datos muy obsoleto donde dichos datos se manejan en archivos de Word y Excel de acuerdo a testimonios de docentes, estudiantes y semilleristas; por lo tanto, se considera indispensable que el SIUMAR disponga de herramientas adecuadas que permitan el acceso y buen manejo de la información.

Para seguir el desarrollo de este software se aplicó la metodología Scrum dado a que es ágil y totalmente flexible con el desarrollo de proyectos; esta metodología consiste en potenciar las relaciones interpersonales del equipo de desarrollo como clave del éxito mediante el trabajo en equipo, el aprendizaje continuo y el buen ambiente de trabajo; además es una metodología que se basa en la comunicación y la reutilización de códigos ya desarrollados.

Metodología SCRUM

La metodología utilizada para el desarrollo de este software fue Scrum dado que es una metodología ágil y totalmente flexible con el desarrollo de proyectos, consiste en potenciar las relaciones interpersonales del equipo de desarrollo como clave del éxito, mediante el trabajo en equipo, el aprendizaje continuo y el buen clima de trabajo; además es una metodología que se basa en la comunicación y la reutilización de códigos ya desarrollados.

1. Selección de herramientas y análisis

Las instancias de la base de datos se implementan en una nube privada virtual (VPC) única para garantizar el aislamiento de la red, e igualmente utiliza un marco Ontológico Dinámico Semántico (MODS), tiene el desafío de interpretar y formalizar la consulta realizada por el usuario en lenguaje natural, como refinar sus esquemas internos frente a la dinámica de la Web para tratar futuras consultas (para lo cual requiere de mecanismos de adaptación). A continuación, se detalla cada una de estas planteando los motivos por los cuales fueron seleccionadas para este proyecto.



Ontología. A propósito de la definición de ontología Tom R. Gruber (1993) dice: Una ontología es un sistema de representación del conocimiento que resulta de seleccionar un dominio o ámbito del conocimiento, y aplicar sobre él un método con el fin de obtener una representación formal de los conceptos que contiene y de las relaciones que existen entre dichos conceptos. Además, una ontología se construye en relación a un contexto de utilización. Esto quiere decir que una ontología especifica una conceptualización o una forma de ver el mundo, por lo que cada ontología incorpora un punto de vista. Además, una ontología contiene definiciones que proveen el vocabulario para referirse a un dominio. Estas definiciones dependen del lenguaje utilizado para describirlas. Todas las conceptualizaciones (definiciones, categorizaciones, jerarquías, propiedades, herencia, etc.) de una ontología pueden ser procesables por máquina.

Según el ámbito del conocimiento al que se apliquen:

- **Ontologías específicas:** son ontologías especializadas que describen los conceptos para un campo limitado del conocimiento o una aplicación concreta.

Según el tipo de agente al que vayan destinadas:

- **Ontologías lingüísticas:** se vinculan a aspectos lingüísticos, esto es, a aspectos gramáticos, semánticos y sintácticos destinados a su utilización por los seres humanos.
- **Ontologías mixtas:** combinan las características de las anteriores.

A la hora de diseñar una ontología deben tener en cuenta 3 cuestiones clave:

- **Coherencia:** una ontología debe permitir hacer inferencias que sean consistentes con las definiciones.
- **Especificidad:** se debe especificar a nivel de conocimiento, sin que dependa de una codificación particular a nivel de símbolo.
- **Precisión:** debe hacerse la menor cantidad de "suposiciones" acerca del mundo modelado.

2. División en Iteraciones

El proyecto fue dividido en 6 iteraciones, por consiguiente, se obtuvo un total de seis entregas para las cuales se desarrollaron partes de la aplicación completamente funcionales.



La primera iteración se refirió al módulo de POST mientras las demás iteraciones se relacionaron con la manipulación de diseño y programación. Este orden se eligió debido a la naturaleza del proyecto. En la planeación de iteraciones se tomaron 4 semanas como período. En la última iteración también se tomó la decisión de trabajar tres semanas procurando ser la medida más adecuada, debido a que se incrementara el ritmo de trabajo en dichas semanas.

3. Diseño

El diseño se realizó durante todo el tiempo de vida del proyecto, siendo constantemente revisado y modificado debido a cambios durante el desarrollo, se observa para cada uno de los elementos constitutivos de dichas etapas, una serie de ideas que describen la teoría contrastada del proyecto. Entre los elementos más importantes que menciona SCRUM referentes al diseño está la simplicidad, las tarjetas denominadas conjuntos de índices estándar que son propuestas para diseñar softwares relacionados con objetos (CRC), el refactoring y Spike Solution.

La ontología es parte fundamental en este proyecto, con la construcción de esta ontología específica se consigue contextualizar, ordenar y categorizar la base de datos que contiene datos, valga la redundancia, importantes de los recursos bibliográficos contenidos en el SIUMAR. Además, permite enriquecer y dar un sentido semántico alguna búsqueda específica.



Figura 1

Arquitectura del modelo planteado



Nota. Fuente: Sicelo.cl, s.f.

La implementación del servicio de un motor de búsqueda con tecnologías semánticas dentro del SIUMAR mejora características tales como:

- I. Ayudar a solucionar las falencias de información debido a que las bases de datos se manejan de manera manual en Word y Excel, lo cual es un trabajo muy complejo y no adecuado.
- II. Se está desarrollando el frontend del motor de búsqueda y consiguiente a esto el backend integrándole algoritmos ontológicos de manera que pueda indexar la información de una manera más lógica.
- III. Permite a investigadores y administrativos aumentar la producción en el seguimiento de productos, disminuir la pérdida de registros y tener una mejor clasificación y gestión de información.

4. Desarrollo Aplicación WEB

Modelo de Desarrollo de Software Prototipado Evolutivo. En este modelo de ciclo de vida se construye el concepto del sistema a medida que avanza el proyecto, desarrollando los aspectos más visibles del sistema.

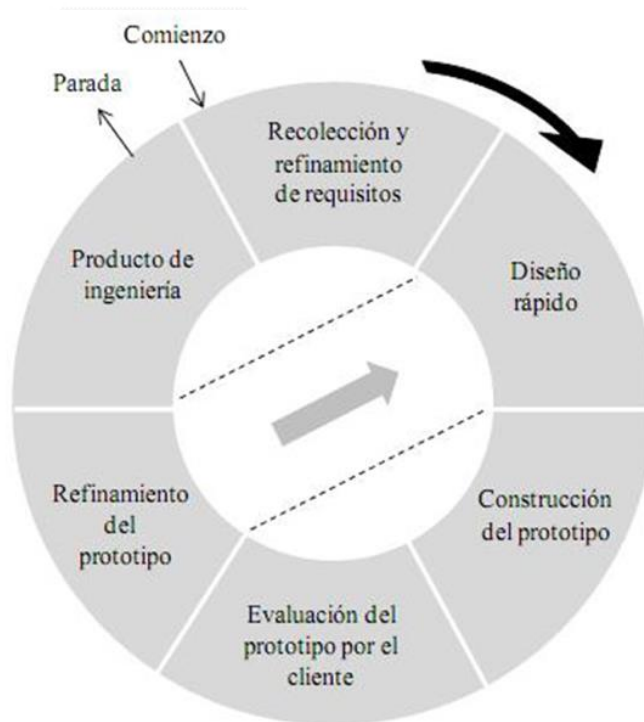


Se presenta al cliente la parte ya desarrollada del proyecto y se continúa el desarrollo del prototipo con base en la realimentación que se recibe del cliente.

El ciclo continúa hasta que el prototipo se convierte en el producto final de ingeniería como la siguiente gráfica lo presenta:

Figura 2

Prototipado evolutivo



Ventajas:

- Ideal para proyectos cuyos requerimientos cambian con rapidez.
- Cuando el cliente no puede especificar el conjunto total de los requerimientos.
- Cuando no se logra identificar de forma apropiada el área de aplicación.
- Cuando los desarrolladores no están seguros de la arquitectura o los algoritmos adecuados a utilizar.



Diseño de Capa de Lógica de Negocios. Modelado UML. Los diagramas que se han elaborado para el desarrollo del proyecto son:

Tabla 1

Modelado UML


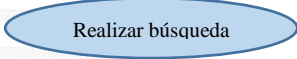





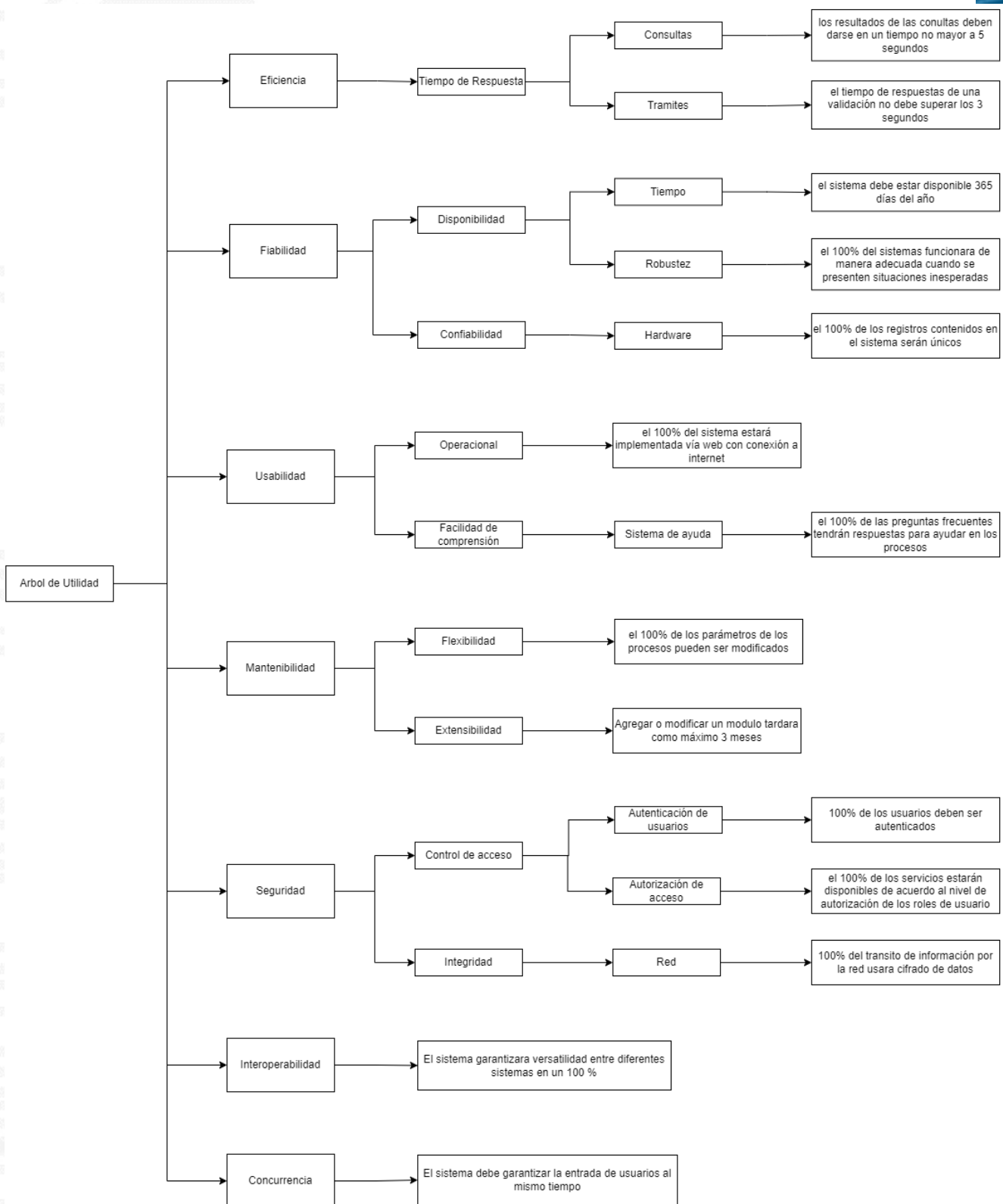
OBJETO	NOMBRE	DESCRIPCION
 Usuario consulta	Usuario consulta	Es el usuario que se debe registrarse en el sistema para proceder a realizar las búsquedas que él desea.
	Realizar Consulta	El usuario ingresa los datos para realizar la búsqueda que desea.
	Desplegar resultados	El sistema presenta los resultados obtenidos de la búsqueda.
	Consultar resultados	El usuario selecciona resultados de la búsqueda de su interés.
	<Extends>	Esta relación denota cuando un caso de uso es una especialización de otro.
	<Include>	Una relación en la que un elemento requiere otro para su correcto funcionamiento.
	Asociación	La línea de comunicación entre un actor y un caso de uso en el que participa.



Figura 3

Diagrama Utilidad

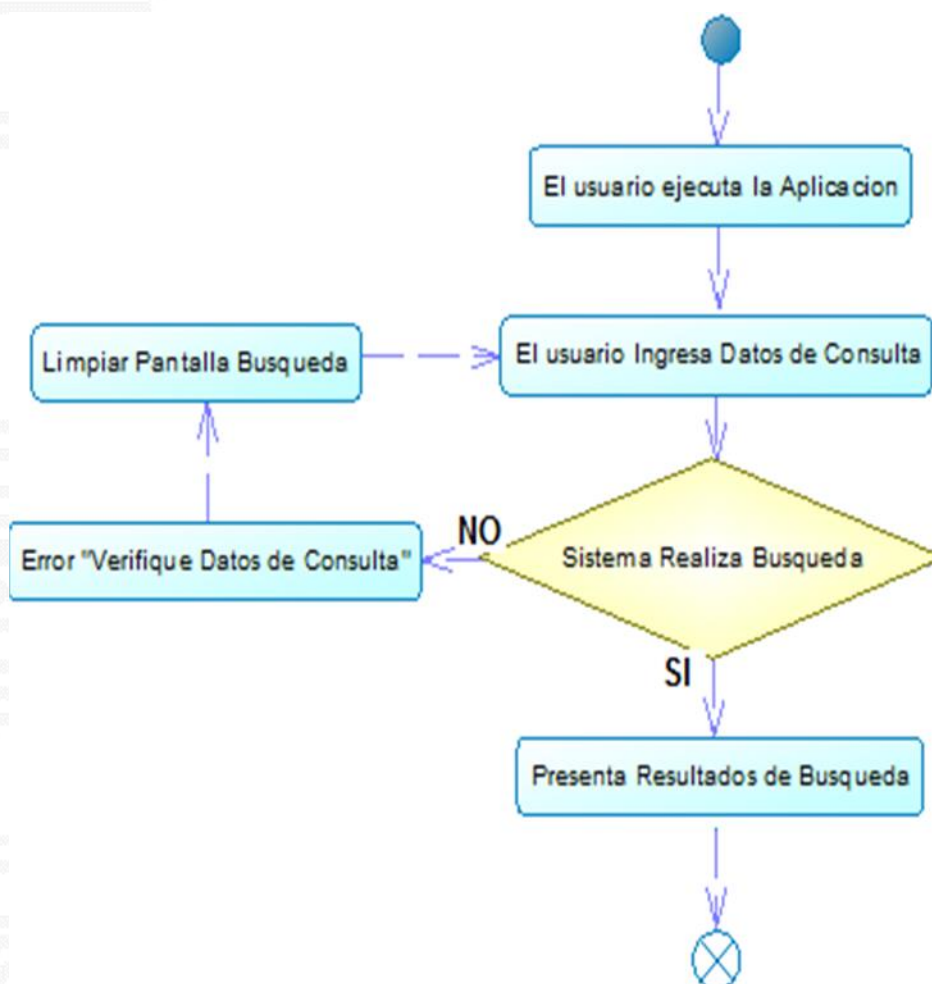


Nota. Diagrama realizado en el año 2015



Figura 5

Diagrama de Actividades



5. Pruebas

SCRUM se enfoca en la realización de numerosas pruebas a lo largo del proyecto, esto con el fin de asegurar en todo momento la realización de lo planteado en el diseño. Cabe señalar que el diseño de pruebas se realiza para todas las partes del sistema como una práctica para garantizar el buen funcionamiento, este capítulo se divide en partes que corresponden a las pruebas unitarias, de aceptación.

Pruebas Unitarias. La metodología intenta disminuir los cuellos de botella, no aumentarlos. El desarrollo de los métodos del sistema implica un proceso de diseño previo. Esto se considera una ventaja ya que se destina tiempo en la construcción de la prueba. También se destaca la autonomía que deben tener dichas pruebas a la hora de su ejecución, lo



que implicará la manipulación de la base de datos y la recuperación de su estado inicial al finalizar la prueba. En este caso se recurrió a Unittest de Python, una herramienta de Django especializada para la creación de unidades de prueba, que resulta ser una elección apropiada a la hora de probar las clases y métodos.

Resultados

En esta sección se presentan los resultados del trabajo para el diseño del buscador (Buscopoli) con los diferentes pasos a realizar, y la ontología MODS sobre la cual se ha basado el aplicativo. Además, de presentar la interface de uso por parte de los usuarios.

Aplicativo Web

Para la comprobación de hipótesis se desarrolló el aplicativo web, donde el usuario procede a realizar una consulta.



Figura 5

Ventana Administrador



Figura 6

Ventana Agregar Proyecto

The image shows the 'Agregar Proyecto' form in the administrator interface. The form is titled 'Agregar Proyecto' and includes a search bar and a 'Administrador' label. Below the title, there are tabs for 'Agregar Proyecto', 'Ver Proyectos', 'Autores', and 'Facultades'. The form contains several input fields and dropdown menus for project details. On the right side, there are checkboxes for 'Tipo de Proyecto' and a section for 'Objetivos del Proyecto' with text input areas.

Información general del proyecto de investigación

Código Proyecto:

Título Proyecto:

Código del Grupo:

Facultad:

Programa:

Grupo de Investigación:

Fecha Aprobación:

Estado:

Fecha Finalización:

Tipo de Proyecto

Investigación Científica Desarrollo Innovación

Investigación Aplicada Desarrollo Tecnológico En Producto

Desarrollo experimental Desarrollo Experimental En Proceso

Objetivos del Proyecto

Objetivo General:

Objetivos Específicos:



Figura 7

Ventana Generar Matriz

Constancia

Firmas (Participantes de Universidad Mariana)

Rol de Integrantes

Nombre

Firma

Agregar

Rol Integrantes Nombre Firma

Modificaciones

Responsables

Cargo

Nombre

Firma

Agregar

Cargo Nombre Firma

Guardar Cambios **Cancelar**

Figura 8

Convocatorias SIUMAR

Administrador

Investigación en Sentido Estricto Formación Investigativa **Convocatorias** Grupos

Convocatorias Externas Serch

Se han Encontrado 123 Registros:

Externa	INVITACION PARA LA CREACION DE BANCO DE PROYECTOS PARA EL FORTALECIMIENTO DE LABORATORIOS	Estado: En Curso	Editar	Eliminar
Externa	CONVOCATORIA JESUS ANTONIO BEJARANO 2021 FACULTAD DE CIENCIAS ECONOMICAS	Estado: Terminada	Editar	Eliminar
Externa				



Como se observa el nuevo aplicativo es intuitivo y fácil de usar, la interfaz gráfica se adapta a la familiaridad acostumbrada por los usuarios encuestados. Además, es un elemento que aporta de una manera muy útil información al usuario, de una manera más exacta y cada vez sea más certera para satisfacer las necesidades de manera natural, perfeccionando sus esquemas frente a la web.

Discusión

El desarrollo de este proyecto lleva consigo beneficios como el de estructurar la consulta realizada por el usuario, considerando los tipos de necesidades del mismo, entregando resultados en múltiples vistas, contemplando el tipo de información, aportando una exploración de manera intuitiva para mejorar los niveles de usabilidad en la Universidad Mariana. Tarea que implica reunir, describir, dar acceso, divulgar y preservar la producción intelectual desarrollada para el centro de investigaciones de la Universidad Mariana. Abordando un nuevo contexto tecnológico en el que la Web Semántica juega un papel fundamental, haciendo uso de los respectivos estándares y recomendaciones, con el fin de entregar resultados más acordes y aproximados a las necesidades de información del usuario.

Los datos deberán convertirse en información que la Web Semántica pueda leer y transformar y así poder dejar de ser invisibles para la web, logrando que los usuarios pertenecientes a la Universidad Mariana tengan la sensación de acceso y control sobre la información y que, en términos generales, se sientan satisfechos con la búsqueda. Logrando una importante contribución a la eficiencia de la búsqueda de información en la Universidad Mariana.

Conclusiones

La implementación del aplicativo brindará un servicio de valor agregado que sin duda marcará un referente ante el SIUMAR del cual pueden beneficiarse todo tipo de usuarios.

Existen nuevas formas de consultar y/o representar información que son usadas según las necesidades, ámbito o requerimientos, en este caso fue posible mediante el uso de una ontología específica, dotando la formulación de una consulta con significado semántico para



que el sistema la interprete con el fin de obtener información precisa y resultados aproximados a lo que cada usuario desea.

Características como escalabilidad y usabilidad son determinantes en la construcción de una solución informática, su ausencia puede influir de manera directa en el rendimiento y éxito de la herramienta.

Al percibir que no se dispone de herramientas útiles, el usuario buscará otros medios de consulta y se perderían las inversiones realizadas en infraestructura, material y/o recursos.



Referencias bibliográficas

- Abad, K., Carvallo, J., Espinoza, M., y Saquicela, V. (2016). Hacia la Creación de un Repositorio Semántico de Modelos de Contexto Basados en i* y el método DHARMA. *RISTI - Revista Iberica de Sistemas e Tecnologias de Informacao*, 17, pp. 41–56. <https://doi.org/10.17013/risti.17.41-56>
- Ardila, J. A. G. (2021). Fundación Dialnet (Dialnet foundation). Dialnet. Database. *Renaissance and Reformation*, 43(4), pp. 250–254. <https://doi.org/10.33137/rr.v43i4.36398>
- Chin, N., Tutor, B., y Septiembre, A. (2019). *Como mejorar la visibilidad y el posicionamiento en los motores de búsqueda de un repositorio digital mediante el uso de Schema.org*. <http://hdl.handle.net/2445/146779>
- Espinoza, M., Montiel-Ponsoda, E., Aguado de Cea, G., y Gómez-Pérez, A. (2012). Ontology localization. En (Suárez Figueroa, Mari Carmen; Asunción Gómez-Pérez; Erico Motta y Aldo Gangemi, eds.) *Ontology Engineering in a Networked World*. Berlin-Heidelberg: Springer, pp. 171-191.
- Fernández-López, M., Gómez-Pérez, A. y Juristo, N. (1997). Methontology: From ontological art towards ontological engineering. En (Farquhar, A. y M. Grüninger, eds.) *Ontological Engineering: Papers from the AAI Spring Symposium*. Palo Alto, CA: AAI Press. p. 33-04.
- Fiallos, V. (2016). *Aplicación para Gestión de Procesos de Desarrollo de Software Basados en la Metodología Ágil XP Extreme Programming para Software de la Sierra S. A.* [Tesis de Maestría]. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. <https://repositorio.pucesa.edu.ec/handle/123456789/1640>
- Figueroa, S., y Lozano, V. (2016). Organización de documentos mediante grafos de relaciones semánticas. *Inteligencia Artificial*, 19(57), pp. 1–21. <https://doi.org/10.4114/ia.v18i56.1038>
- Gruber, T. R. (1993). Knowledge acquisition. A translation approach to portable ontology specifications, 5(199-220), 10-1006. <https://brapci.inf.br/index.php/res/v/8169>



- Grüninger, Michael y Mark. S. Fox. 1995. Methodology for the design and evaluation of ontologies. En Workshop on Basic Ontological Issues in Knowledge Sharing: IJCAI-95. Montreal: IJCAI. [Consulta: 15 mayo 2017].
- Lopezosa, C., Codina, L., y Caldera-Serrano, J. (2018). SEO semántico: Framework ISS para la optimización de sitios intensivos en contenidos. *Cuadernos de Documentación Multimedia*, 29(1), pp. 97–122. <https://doi.org/10.5209/cdmu.60607>
- Niño-Zambrano, M. (2015). Interacción Semántica de Objetos en la Web de las Cosas. XI *Coloquio Doctoral de CLADEA*.
http://www.cladea.org/home/index.php?option=com_phocadownload&view=category&id=157&Itemid=570
- Ordoñez, H., Cobos Lozada, C., y Leon, E. (2011). Modelo de un meta-buscador web semántico basado en una taxonomía general de conocimiento, una ontología de dominio general, ontologías específicas y perfil de usuario. *Revista UIS Ingenierías*, 10(1), pp. 23–28.
<https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistauisingenierias/article/view/23-38>
- Universidad Mariana. (2007). *Reglamento de investigaciones y publicaciones, Universidad Mariana* - Artículo 71. Pasto: Unimar, 2007.
- Reyes-Lillo, D. (2018). Integración semiautomática de tecnologías de la web semántica en bases de datos de patentes. *Palabra Clave (La Plata)*, 8(1), e057.
<https://doi.org/10.24215/18539912e057>
- Rodríguez, A., Trilla, E., Rodríguez, J., y Heredia, R. (2018). Análisis De La Evolución De Las Búsquedas Simples Hasta La Innovación De Las Búsquedas Relacionadas, Una Web Semántica. *Pistas Educativas*, 39(127), pp.535–547.
<http://www.itcelaya.edu.mx/ojs/index.php/pistas/article/view/1043>
- Rodríguez, T., y Aguilar, J. (2017). Implementación del Marco Ontológico Dinámico Semántico. *Ingeniare*, 25(3), pp. 430–448. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052017000300430>
- Sayed, A., y Al Muqrishi, A. (2017). IBRI-CASONTO: Ontology-based semantic search engine. *Egyptian Informatics Journal*, 18(3), pp. 181–192.
<https://doi.org/10.1016/j.eij.2017.01.001>



Sust, E., Simón-Cuevas, A., Olivas, J. A., y Romero, F. (2018). Aproximación a un modelo de recuperación de información personalizada basado en el análisis semántico del contenido. *Procesamiento de Lenguaje Natural*, 61, pp. 31–38.

<https://doi.org/10.26342/2018-61-3>

Sust, E., Simón-Cuevas, A., Olivas, J., y Romero, F. (2018). Aproximación a un modelo de recuperación de información personalizada basado en el análisis semántico del contenido. *Procesamiento de Lenguaje Natural*, 61, pp. 31–38.

<https://doi.org/10.26342/2018-61-3>

Meléndez, S., Gaitán, M. y Pérez, N. (2016). *Metodología ágil de desarrollo de software programacion extrema*. [Trabajo de grado, Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua]. Archivo digital. <http://repositorio.unan.edu.ni/1365/1/62161.pdf>



Este libro fue elaborado por la Universidad INCCA de
Colombia, en el año 2022
Bogotá, D.C., Colombia.