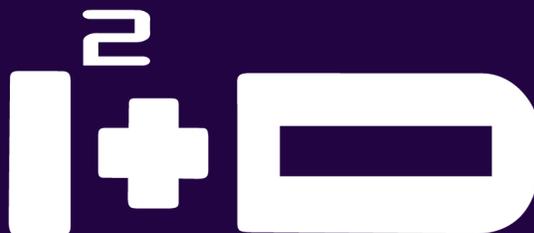




**Uptc**<sup>®</sup>  
Universidad Pedagógica y  
Tecnológica de Colombia



# INGENIERÍA, INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO

# REVISTA I2+D

## Ingeniería, Investigación y Desarrollo

Vol. 23 - No. 2 Julio - Diciembre 2023

### RECTOR

*Enrique Vera López*

### VICERRECTORA ACADÉMICO

*Ruth Maribel Forero Castro*

### VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN

*Carlos Mauricio Moreno Téllez*

### VICERRECTOR ADMINISTRATIVO Y FINANCIERO

*Luis Ángel Lara González*

### DECANO FACULTAD

*Héctor Antonio Fonseca Peralta*

### DIRECTOR CIFAS

*Oscar Oswaldo Rodríguez Díaz*

### EDITOR

*Hugo Fernando Castro Silva*

*Ph.D. Maurício Gonçalves Vieira Ferreira*

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil

*Ph.D. Raúl Iván Sánchez Alarcón*

Universidad de Valencia, España

*Ph.D. Carlos Arturo Ávila*

Universidad de los Andes, Colombia

*Ph.D. José Ignacio Marulanda Bernal*

Universidad EAFIT, Colombia

*Ph.D. Andrés Fernando Jiménez López*

Universidad de los Llanos, Colombia

*Ph.D. Ramiro Alejandro Plazas Rosas*

Universidad del Valle, Colombia

*MSc. Luis Carlos Olmos Villalba*

Institución Universitaria Pascual Bravo, Colombia

*MSc. Christian Ricardo Zea Forero*

Pontificia Universidad Javeriana, Colombia

### COMITÉ EDITORIAL Y CIENTÍFICO

*Ph.D. Juan María Menéndez Aguado*

Universidad de Oviedo

*Ph.D. Fernando Trejo Zágarra*

Instituto Politécnico Nacional

*Ph.D. Gabriel Peña Rodríguez*

Universidad Francisco de Paula Santander

*Ph.D. Raúl Iván Sánchez Alarcón*

Universidad de Valencia

*Ph.D. Jorge Julián Moreno Rubio*

Universidad de Cardiff

### ASISTENTE EDITORIAL / CORRECTOR DE ESTILO

*MSc. Karol Lizeth Roa Bohórquez*

### DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN

*Esp. Vivian Espíndola Carvajal*

### Correspondencia Canje y Suscripciones a nombre

**de:** Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo UPTC  
Sogamoso-Boyacá, Colombia Calle 4 A Sur N° 15-134  
Edificio Administrativo - Tercer Piso

**Tel:** (57+8) 770 5450 Ext. 2606

**E-mail:** [revistaiid@uptc.edu.co](mailto:revistaiid@uptc.edu.co)

**DOI:** <http://dx.doi.org/10.19053/issn.1900-771X>

Los conceptos expresados en los artículos son de exclusiva responsabilidad de sus autores y no comprometen a la publicación.

ISSN 1900-771X e-ISSN 2422-4324

Revista Ingeniería Investigación y Desarrollo

### COMITÉ DE ARBITRAJE

*Ph.D. Walter Abrahão Dos Santos*

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil

*Ph.D. Fátima Mattiello-Francisco*

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil

## TABLA DE CONTENIDO

CONTROL DE EMISIONES DE OLORES OFENSIVOS EN EL SECTOR PECUARIO: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA <i>Control of offensive odors emissions in livestock farms: a systematic review</i> Ana María Rivera Bautista, José Luis Cárdenas Talero .....	5
COLORIMETRIC ANALYSIS OF THE LEAVES OF PLANTS EXPOSED TO CADMIUM <i>Análisis colorimétrico de hojas de plantas expuestas a cadmio</i> Andrés Felipe Rodríguez Acevedo, Lina Tatiana Velandia Torres, Jorge Andrés Ramírez Rincón, Yulieth Catherine Reyes Roa .....	17
EVALUACIÓN TÉCNICA Y ENERGÉTICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES EN SOGAMOSO–BOYACÁ, COLOMBIA <i>Technical and energy evaluation of municipal solid waste in Sogamoso–Boyacá-Colombia</i> Ariam Lozano Pérez, Javier Chaparro Barajas .....	28
MODELO SEDIMENTARIO-DEPOSICIONAL DE LA FORMACIÓN GIRÓN EN LA SECCIÓN DEL KM 42 VÍA GIRÓN-ZAPATOCA, SANTANDER, COLOMBIA <i>Sedimentary-depositional model of the Girón Formation in the section of km 42 road Girón-Zapatoca, Santander, Colombia</i> Diego Fernando Jaramillo Minorta, Keila José Barba Gonzales, Elías Ernesto Rojas Martínez, Jenny García González, Dino Carmelo Manco Jaraba, Frank David Lascarro Navarro .....	37
ANÁLISIS DE LAS VIBRACIONES EN EL BRAZO DE UN DRON CONSTRUIDO CON ESTRUCTURAS ISOGRID Y FIBRA DE CARBONO <i>Vibration analysis on the arm of a drone built with Isogrid structures and carbon fiber</i> Brayan Noel Ceniceros Jáquez, Oralia Solano Maya, Alfredo Villanueva Montellano, José Omar Dávalos Ramírez .....	50
THE IMPORTANCE OF ADDITIVE TECHNOLOGY AND MANUFACTURING PROCESSES FOR LABORATORY EXPERIMENTS IN AERONAUTICS <i>La importancia de la tecnología aditiva y los procesos de fabricación para los experimentos de laboratorio en aeronáutica</i> Shehret Tilvaldyev, Uzziel Caldiño Herrera, José Omar Dávalos Ramírez, Manuel Alejandro Lira Martínez, Edgar Alfonso Muñoz Avitia .....	56
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE TURBINA DE VAPOR <i>Design and construction of a steam turbine prototype</i> Carlos A. Moreno Montañez, Jhon F. Gonzalez Rios, Williams S. Hincapie Campos, Víctor M. Carrillo Alvarez .....	65

## EDITORIAL

Estimados colegas, investigadores y académicos:

En un mundo en constante evolución, donde las nuevas tecnologías y la inteligencia artificial están redefiniendo los límites de la innovación, es un placer extenderles una cordial invitación a explorar el volumen 23 en su segunda edición, de la Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo adscrita a la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia – UPTC facultad Seccional Sogamoso. Nuestra revista cumple con la divulgación de resultados de investigación, reflexión y revisión, enfocados en las áreas de ingeniería y tecnología. En esta oportunidad, la segunda edición del año representa una ventana a las más recientes contribuciones y avances que la comunidad académica y científica ha logrado en el ámbito de ingeniería, investigación y desarrollo. Cada artículo en este volumen ha sido cuidadosamente seleccionado por su contribución única y valiosa al campo. Los autores, expertos en sus respectivas áreas, comparten sus conocimientos y experiencias para fomentar un diálogo enriquecedor y catalizar futuras investigaciones.

La segunda edición encapsula una diversidad de perspectivas y enfoques, abordando cuestiones críticas y desafíos en diversas áreas de investigación, dando prioridad a siete artículos de investigación que reúnen los resultados de profesionales provenientes de Colombia, España, Perú y México. Entre los temas destacados se encuentran: “Control de emisiones de olores ofensivos en el sector pecuario: una revisión sistemática”, un estudio de buenas prácticas y tecnologías que permiten reducir o eliminar los olores ofensivos en el sector pecuario. En seguida, el artículo titulado “Colorimetric analysis of the leaves of plants exposed to cadmium”, comprende una investigación que presenta resultados de una caracterización como estrategia para detectar y analizar la bioacumulación de contaminantes en plantas. Por otro lado, la investigación titulada “Evaluación técnica y energética de los residuos sólidos municipales en Sogamoso–Boyacá, Colombia” reporta un caso de estudio que realiza una evaluación técnica del potencial de aprovechamiento de los residuos sólidos municipales como fuente de energía. Posteriormente, el artículo titulado “Modelo sedimentario-deposicional de la Formación Girón en la sección del km 42 vía Girón-Zapatoca, Santander, Colombia”, desarrolla la presentación de novedosa información petrográfica, sedimentológica, estratigráfica y geoquímica de la formación Girón, con el objetivo de determinar el modelo sedimentario, deposicional y procedencia. En quinto lugar, el artículo titulado “Análisis de las vibraciones en el brazo de un dron construido con estructuras Isogrid y fibra de carbono” presenta un análisis al brazo de un dron construido con estructuras Isogrid y fibra de carbono para evaluar su frecuencia natural y respuesta a frecuencias. Seguido del trabajo “The importance of additive technology and manufacturing processes for laboratory experiments in aeronautics” en el cual se ofrece al lector la oportunidad de aprender más sobre el uso de tecnologías de fabricación aditiva para suplir las necesidades de actividades experimentales en aeronáutica. Por último, el sétimo artículo del volumen titulado “Diseño y construcción de un prototipo de turbina de vapor” se aborda el diseño y desarrollo de prototipo de turbina de vapor utilizando diversos materiales y procesos de mecanizado, logrando un diseño eficiente.

Al sumergirse en las páginas del volumen, los lectores encontrarán no solo un compendio de conocimientos de vanguardia, sino también un argumento sólido de cómo la colaboración interdisciplinaria y la aplicación de nuevas tecnologías están dando forma al futuro de la ingeniería, la investigación y el desarrollo. Agradecemos a los autores por su dedicación y excelencia, así como a la comunidad académica por su continua contribución a la investigación y el desarrollo. Juntos, estamos dando forma al futuro de la ingeniería y la ciencia en esta emocionante antesala de la quinta revolución industrial.

**PhD. Hugo Fernando Castro Silva**

 <https://orcid.org/0000-0001-6020-402X>

**Editor**

## CONTROL DE EMISIONES DE OLORES OFENSIVOS EN EL SECTOR PECUARIO: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA

### Control of offensive odors emissions in livestock farms: a systematic review

Ana María Rivera Bautista, José Luis Cárdenas Talero

Universidad Santiago de Cali, Facultad de Ingeniería, Grupo de investigación en Ingeniería Electrónica, Industrial y Ambiental-GIEIAM, Colombia. E-mail: [jose.cardenas03@usc.edu.co](mailto:jose.cardenas03@usc.edu.co)

(Recibido 25 de Octubre de 2023 y aceptado 07 de Diciembre de 2023)

#### Resumen

Las emisiones de olores ofensivos de las unidades pecuarias pueden generar molestias y afectaciones en la salud de las personas que residen en el área de influencia de estas instalaciones. Con el propósito de reducir dicha problemática es necesario que en las granjas se implementen buenas prácticas y tecnologías que permitan reducir o eliminar los olores ofensivos. En el presente análisis bibliométrico para identificar las tendencias de investigación en el campo del control de olores ofensivos en unidades pecuarias. La búsqueda bibliográfica se llevó a cabo en la base de datos Scopus y el análisis de co-ocurrencia se realizó con el software VOSviewer (versión 1.6.18). Como resultado de la estrategia de búsqueda se obtuvieron 518 documentos publicados entre los años 2012 y 2022. El análisis de palabras clave reveló que las principales actividades pecuarias investigadas son la porcícola, avícola y bovina. Adicionalmente, las tecnologías para el control, mitigación y/o reducción de los olores ofensivos en actividades pecuarias con mayor número de investigaciones corresponden a digestión anaerobia, biofiltración, biopercolación, adsorción con biocarbón y procesos de oxidación avanzada. Cabe resaltar que las investigaciones aplicadas en este sector productivo indican que estas tecnologías son efectivas para la reducción de las emisiones de olores y de sustancias odorantes como  $\text{NH}_3$  y  $\text{H}_2\text{S}$ .

**Palabras clave:** *olores ofensivos, unidades pecuarias, biofiltración, biopercolación, digestión anaerobia.*

#### Abstract

Offensive odors emissions from livestock farms can cause nuisance and health effects to the persons who live in influence of the facilities. With the purpose to reduce this conflict is necessary that farms implement good practices and technologies which allow them to reduce or eliminate offensive odors. In the present work, a bibliometric analysis was done to identify the trends around offensive odors control in livestock farms. Scopus database was used to do the bibliometric search and VOSviewer (version 1.6.18) software was used to do a co-occurrence analysis. As a result of the search strategy, 518 documents published between the years 2012 and 2022 were found. The keyword analysis reveals that the main livestock activities are swine, poultry and cattle raising. Further, the most researched technologies to control, mitigate and reduce unpleasant odors are anaerobic digestion, biofiltration, biotrickling, biochar adsorption and advanced oxidation processes. It is worth noting that research applied in this productive sector indicates that these technologies are effective in reducing odor emissions and odorant substances such as  $\text{NH}_3$  and  $\text{H}_2\text{S}$ .

**Keywords:** *offensive odors, livestock, biofiltration, biotrickling, anaerobic digestion.*

## 1. INTRODUCCIÓN

La actividad pecuaria es un sector importante de la economía agrícola de los países en desarrollo, puesto que permite la obtención de alimento y de materias primas tales como fibras, pieles, fertilizantes y combustibles [1]. De acuerdo con la Encuesta Nacional Agropecuaria en Colombia se cuenta con 50,1 millones de hectáreas destinadas para el sector agropecuario, de las cuales el 77,9% tiene un uso pecuario [2], siendo las principales actividades la cría de aves, de ganado bovino y de cerdos [3].

Las actividades pecuarias se caracterizan por impactar negativamente la calidad del aire, puesto que este sector emite el 14,5% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero [4]. Adicionalmente, emiten sustancias volátiles generadores de olores ofensivos como lo son compuestos de azufre, amoníaco, ácidos orgánicos, p-cresol y escatol [5–7]. De estas sustancias el amoníaco es el compuesto odorante más común producido en las explotaciones pecuarias [7].

Los olores ofensivos son catalogados como contaminantes atmosféricos [8–11]. Además de impactar negativamente al ambiente, la exposición a sustancias odorantes causa incomodidad y afectaciones a la salud tales como dolores de cabeza, náuseas, irritación de ojos, garganta y nariz [12]. También la exposición a largo plazo a algunas sustancias odorantes puede representar un riesgo para desarrollar patologías como asma, dermatitis atópica y daño neurológico [13].

La molestia por olores ofensivos ocurre cuando un individuo se expone de manera intermitente y a largo plazo a un olor desagradable [14]. En consecuencia, cuando las unidades pecuarias se localizan cerca de áreas residenciales se crean conflictos con los vecinos de estas instalaciones [15]. Factores como el aumento de unidades pecuarias confinadas a gran escala y la expansión de áreas residenciales cerca de zonas con usos agropecuarios, podría incrementar el número de conflictos y de quejas presentadas [16, 17].

Si bien la emisión de olores no puede ser completamente eliminada de las actividades productivas, si es posible implementar mecanismos que permitan minimizar estos contaminantes y así reducir su impacto y las molestias generadas a las poblaciones vecinas [18]. El control de olores ofensivos se puede realizar mediante la prevención, la minimización del impacto y la remoción de sustancias odorantes de las emisiones [19, 20, 21].

La prevención de la formación de olores ofensivos se logra mediante la implementación de diseños adecuados en las granjas y buenas prácticas operativas [21]. Para lograr la minimización del impacto se emplean mecanismos que permitan la dispersión de las sustancias odorantes tales como barreras vivas o zonas buffer; también se puede lograr mediante el enmascaramiento del olor desagradable, a través de la aplicación de olores aromáticos [16].

La remoción o reducción de la concentración de las sustancias odorantes antes de la descarga de la fuente, se realiza mediante la implementación de tecnologías al final del tubo, estas tecnologías pueden ser físicas, químicas o biológicas [7]. Dentro de las tecnologías físicas, se encuentran la adsorción, en la cual la sustancia odorante se transfiere a una fase líquida o sólida [22]. Dentro de las tecnologías químicas se encuentran el depurador húmedo, la combustión, el plasma no térmico y la oxidación fotocatalítica [7]. En los métodos biológicos se emplean microorganismos para degradar las sustancias odorantes; dentro de las tecnologías más desarrolladas se tienen los biofiltros convencionales, los biofiltros percoladores y los biodepuradores [23].

En el presente artículo se realizó un análisis bibliométrico para identificar las tendencias de investigación en el campo de la mitigación y control de emisiones de olores ofensivos generados en las prácticas pecuarias. Adicionalmente, se describen las tecnologías de control de olores ofensivos que han sido principalmente estudiadas en la última década en el sector pecuario.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

El análisis bibliométrico es una técnica que permite resumir grandes cantidades de datos bibliométricos para presentar el estado de la estructura intelectual y las tendencias emergentes de un tema o campo de investigación [24]. Se realizó un análisis bibliométrico para identificar las tendencias en el área de la mitigación y control de olores ofensivos en actividades pecuarias. La recolección de datos bibliográficos se realizó con la base de datos Scopus. La búsqueda se limitó a artículos de investigación, revisiones o reviews publicados entre los años 2012 y 2022, que contuvieran en su título, resumen o palabras clave las palabras relacionadas en la siguiente estrategia de búsqueda: TITLE-ABS-KEY (manure OR farm OR livestock) AND (odor) AND (control OR mitigation OR reducing OR removal OR treatment).

A partir de estos datos, se identificaron tendencias como el número de publicaciones realizadas por año, las principales áreas temáticas y los países con mayor número de publicaciones. Adicionalmente, se empleó el software VOSviewer© (versión 1.6.18) para realizar un análisis de co-ocurrencia de las palabras clave de los autores; como número mínimo de ocurrencia de una palabra clave se seleccionó 5.

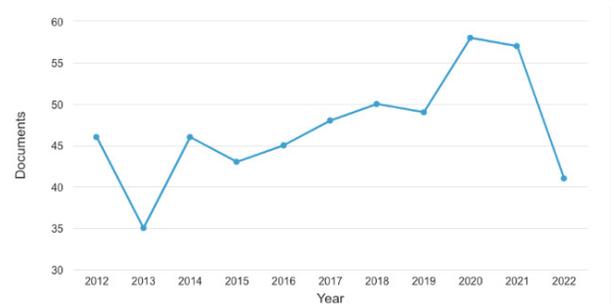
## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Análisis bibliométrico

Como resultado de la búsqueda bibliométrica se obtuvieron 518 documentos, de los cuales el 90,3% corresponden a artículos de investigación y el 9,7% a artículos de revisión bibliográfica. De acuerdo con la base de datos Scopus estos documentos están distribuidos en 25 áreas temáticas, las 5 principales áreas correspondieron a ciencias ambientales (25,1%), ciencias agrícolas y biológicas (21,9%), ingeniería (10,4%), bioquímica, genética y biología molecular (5,8%) e ingeniería química (4,9%).

La tendencia anual de publicaciones se presenta en la Figura 1. Se observa que el número de publicaciones se redujo de 2012 a 2013 y posteriormente presentó un

crecimiento progresivo pasando de 35 publicaciones en el 2013 a 57 en el año 2021, lo cual indica que existe interés por parte de la comunidad científica el estudio del control de olores ofensivos en el sector pecuario. Se resalta que la tendencia decreciente en el 2022 se debe a que el análisis bibliométrico refleja solo el primer semestre del año.



**Figura 1.** Artículos de investigación y reviews publicados en el periodo 2012-2022. **Fuente:** Elaboración con datos de [www.scopus.com](http://www.scopus.com).

En cuanto a la distribución espacial de las publicaciones, en la Tabla 1 se observa que Estados Unidos es el país con mayor número de publicaciones con un total de 143 seguido de China con 98 y de Corea del Sur con 54. A nivel de Latinoamérica la producción científica es menor con un total de 30 publicaciones concentradas principalmente en Brasil.

**Tabla 1.** Producción científica por país.

Posición	País	N° de publicaciones
1	Estados Unidos	143
2	China	98
3	Corea del Sur	54
4	Polonia	31
5	Dinamarca	29
10	Brasil	13
18	Argentina	5
18	Chile	5
19	México	4
20	Colombia	3
22	Costa Rica	1
22	Ecuador	1

**Fuente:** Elaboración con datos de [www.scopus.com](http://www.scopus.com).



### 3.2 Tecnologías para el control y mitigación de los olores ofensivos en el sector pecuario

#### 3.2.1. Digestión anaerobia

El estiércol generado en las unidades pecuarias puede ser empleado como fertilizante puesto que este contiene nutrientes como nitrógeno, fósforo y materia orgánica que mejora las propiedades físicas del suelo [26]. Sin embargo, la aplicación de estiércol al suelo es una de las principales fuentes de olores ofensivos en la actividad pecuaria [27]. Frente a lo anterior, la digestión anaerobia se ha propuesto como alternativa para reducir el impacto por olor de esta práctica agropecuaria.

La digestión anaerobia es un proceso biológico en el cual la materia orgánica se degrada en ausencia de oxígeno [28]. Como productos finales del proceso se obtiene biogás (60-70% de metano) el cual puede ser empleado como combustible y un digestato rico en nutrientes el cual puede ser transformado en un biofertilizante [29].

Diversos estudios han encontrado que la digestión anaerobia reduce el impacto por olor del estiércol o purín, dado que como resultado del proceso se obtiene un digestato con menor tasa de emisión de olor que la del ingestato [30, 31, 32, 33, 34]. La reducción en la concentración del olor se explica porque el proceso biológico permite la degradación de la materia orgánica y la obtención de un producto con alta estabilidad biológica [31, 32].

En cuanto a la aplicación del digestato al suelo, [30] reportaron que la emisión de olor del digestato desapareció completamente después de 30 horas de aplicación, mientras que el olor generado por la aplicación del purín sin tratamiento continuó por 60 horas. [35] encontraron que la emisión de olor del digestato 6 horas después de la aplicación superficial al suelo fue menor en un 76 y 86 % que la emisión de olor generada por la aplicación superficial del purín de cerdo. Por otra parte, [33] concluyeron que la aplicación de la fracción líquida del digestato de estiércol de ganado bovino con cultivos energéticos, permite reducir el impacto por olor en 82 y 88% con respecto a la aplicación de purín sin tratar.

#### 3.2.2. Biofiltración

Los biofiltros son biorreactores de lecho fijo, en el cual los microorganismos inmovilizados permiten la oxidación de sustancias odorantes [36]. En la biofiltración la corriente gaseosa se conduce a través del lecho poroso y húmedo del reactor, donde los contaminantes se transfieren a la fase líquida y posteriormente son degradados por los microorganismos dentro de la biopelícula [37, 38]. La biopelícula contiene microorganismos como bacterias, hongos, levaduras, protozoos, amebas, nematodos y algas [23].

Dentro de las ventajas de los biofiltros se encuentra que presentan bajo costo de capital y de operación, no producen corrientes secundarias de residuos y permiten tratar grandes volúmenes de gas con bajas concentraciones de compuestos orgánicos volátiles (COVs) y compuestos odorantes. Dentro de las limitantes de esta biotecnología se encuentra la obstrucción del lecho debido a las partículas de la corriente gaseosa, el deterioro del medio, la reducción de la eficiencia de remoción al operar a altas concentraciones de contaminantes y la dificultad en el control de la humedad y el pH [38].

En Tabla 2 se evidencia que la biofiltración es una tecnología efectiva para la remoción de olores, de amoníaco y de compuestos de azufre en el sector pecuario. Adicionalmente, [39] reportó que mediante la implementación de un biofiltro de tres etapas en un módulo de producción porcina se removió entre 80 a 99% de ácidos carboxílicos, aldehídos, cetonas, fenoles e indoles.

#### 3.2.3. Biopercolación

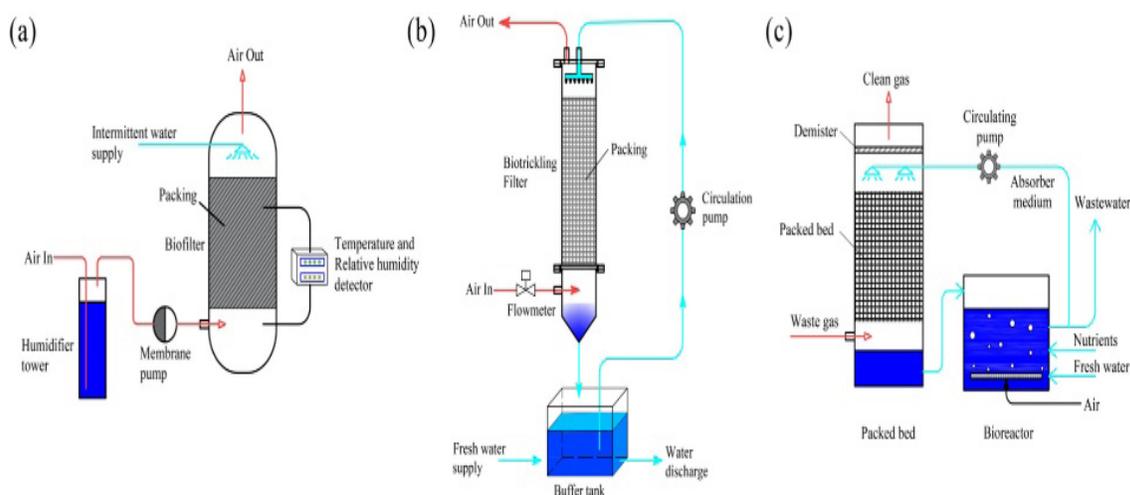
Los filtros biopercoladores son reactores de lecho fijo, en los cuales los microorganismos inmovilizados en el lecho oxidan las sustancias odorantes contenidas en corrientes gaseosas [44]. Como se observa en la Figura 3 la principal diferencia entre los biofiltros y los filtros biopercoladores es que en el último reactor una fase acuosa se irriga constantemente sobre el lecho; mientras que los biofiltros convencionales no tienen fase líquida móvil [44, 45].

**Tabla 2.** Desempeño de biofiltros en la remoción de olores amoníaco y compuestos que contienen azufre.

Unidad pecuaria	Material del lecho	Eficiencia de remoción de NH <sub>3</sub>	Eficiencia de remoción de olor	Eficiencia de remoción de H <sub>2</sub> S	Referencias
Secador de estiércol de gallina	Astillas de madera	74%	62%	-	[40]
Módulo de producción de cerdo	Astillas de madera	42%	52%	-	[40]
Módulo de producción de cerdo	Astillas de madera	38%	43%	-	[40]
Tanque de separación sólido-líquido en sistema de tratamiento de aguas residuales porcinas.	Carbón activado granular	-	86%	-	[41]
Módulo de producción de cerdo	Astillas de madera	64-92%	88- 95%	-	[42]
Módulo de producción de cerdo	Almohadillas de celulosa	-	-	64%	[43]
Módulo de producción de cerdo	Almohadillas de celulosa	-	-	75%	[39]

La fase líquida de los filtros biopercoladores suministra nutrientes y microelementos necesarios para el crecimiento de los microorganismos y al igual que asegura las condiciones de humedad para el mantenimiento de la biopelícula [45]. Además, en la fase líquida se encuentran microorganismos suspendidos que permiten la degradación de parte de las sustancias odorantes [23]. Los filtros biopercoladores se caracterizan por tratar una gama más amplia de contaminantes que los biofiltros convencionales; presentando altas eficiencias para la remoción de H<sub>2</sub>S, amoníaco y COVs solubles en agua [38, 46]

Los filtros biopercoladores presentan como ventajas que sus costos de operación son bajos, la facilidad de control de procesos y tienen la capacidad de tratar los productos de degradación ácida de los COVs. Sin embargo, dentro de las desventajas de esta tecnología se encuentra que su construcción es compleja, como resultado del proceso se generan corrientes secundarias de residuos y en el lecho se presenta acumulación de excesos de biomasa lo cual puede causar taponamiento, aumento de la caída de presión, canalización del lecho y creación de zonas anaeróbicas [38].



**Figura 3.** Diagrama de a) biofiltros y b) filtros biopercoladores. **Fuente:** Adaptado de [7].

En cuanto a aplicaciones de filtros biopercoladores a escala real en unidades pecuarias, se encuentra el estudio realizado por [47] en la cual emplean dos filtros biopercoladores para tratar los olores generados en módulos de producción porcícola, como resultado obtuvieron eficiencias de remoción de amoníaco de 50.51% para el filtro biopercolador 1 y de 70.02% para el biofiltro percolador 2. [48] emplearon dos filtros biopercoladores para tratar el gas producido durante el compostaje aeróbico de estiércol animal, como resultado obtuvieron eficiencias de remoción de amoníaco, de COVs y de olor de 88.78%, 70.25% y 88.10%, respectivamente.

#### 3.2.4. Adsorción con biocarbón

El biocarbón es un producto rico en carbono generado durante la degradación termoquímica de la biomasa mediante procesos como pirólisis, torrefacción y gasificación [49, 50]. Este material ha sido empleado como mejorador de suelos, biocombustible y adsorbente para la remoción de contaminantes en agua, suelo y aire [51, 52]. A nivel de contaminantes gaseosos, el biocarbón puede remover efectivamente vapores metálicos, gases ácidos, ozono, óxidos de nitrógeno y contaminantes orgánicos como COVs y sustancias odorantes [51].

Características como el área superficial, la estructura porosa, los grupos funcionales de la superficie y la alta capacidad de intercambio catiónico permiten que el biocarbón sea un adsorbente potencial de contaminantes [53, 54]. Dichas características dependen de la materia prima empleada y de las condiciones de operación como tiempo de residencia, tasa de calentamiento y temperatura [55]. Adicionalmente, este biomaterial se puede someter a activación, el cual es un proceso químico o físico en el que se mejoran algunas características físicas del biocarbón como el área superficial y la densidad de poros, lo que contribuye a aumentar su capacidad de adsorción [50].

De acuerdo con [56] el biocarbón ha sido empleado en la remoción de olores ofensivos mediante siete aplicaciones: como aditivo en el proceso de compostaje, medio de biofiltración, biocubierta, suplemento

dietario, aditivo al suelo, sustrato para la producción de adsorbentes y directamente como adsorbente. En la Tabla 3 se presentan algunas aplicaciones del biocarbón para el control de olores ofensivos en actividades pecuarias dentro de las cuales se destaca el uso de este material como biocubierta de estiércol, aditivo de alimento de animales y aditivo en el proceso de compostaje.

#### 3.2.5. Oxidación avanzada

Los procesos de oxidación avanzada corresponden a tecnologías en las que se generan especies altamente reactivas como el radical hidroxilo ( $\bullet\text{OH}$ ), las cuales interactúan con los contaminantes logrando su degradación [61]. Dentro de estos procesos de oxidación avanzada se encuentra la fotocatalisis, la cual es una tecnología que se ha empleado para la remoción de contaminantes en fase gaseosa y cuenta con aplicaciones en unidades pecuarias [62]. La fotocatalisis se basa en una serie de reacciones indirectas de fotooxidación las cuales generan oxidantes en el aire [63].

En esta tecnología se emplea un semiconductor el cual al exponerse a radiación produce la transición de un electrón de la banda de valencia a la banda de conducción, formando pares electrón-hueco, los electrones de la superficie interactúan con el oxígeno para producir radicales de superóxido ( $\text{O}_2^-$ ) y los huecos oxidan el agua formando radicales hidroxilos ( $\bullet\text{OH}$ ); estos radicales libres reaccionan con los contaminantes gaseosos mineralizándolos en  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  [64].

Dentro de las ventajas de esta tecnología se destaca que no se requieren químicos o energía externa en los casos que se emplea luz solar, su operación es segura puesto que se opera a condiciones ambiente y su alta capacidad para mineralizar completamente COVs a  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ . Sin embargo, presenta limitaciones como baja eficiencia de utilización de fotones, tasa lenta de eliminación, es difícil de escalar y ensuciamiento y desactivación de los fotocatalizadores durante la operación prolongada [63].

**Tabla 3.** Aplicaciones del biocarbón en el control de olores ofensivos de unidades pecuarias.

Tipo de aplicación	Materia prima	Condiciones de elaboración	Observaciones y eficiencias de remoción	Referencias
Aditivo dietario en pollos de engorde.	Madera de haya	No reporta	La emisión de NH <sub>3</sub> del estiércol se redujo 15% y 14% empleando porcentajes máxicos de biocarbón en la alimentación de 2% y 4% respectivamente.	[56]
Biocubierta de estiércol líquido de ganado lechero.	Astillas gruesas de corteza de abeto de douglas y fibra de madera.	Pirólisis lento a ~600°C	Al emplear una cubierta de biocarbón obtenido mediante pirólisis lenta se logró reducir la concentración promedio de NH <sub>3</sub> en un 80% y 72%.	[57]
Biocubierta de estiércol de cerdo.	Madera de pino	Pirólisis entre 495°C y 505°C.	Al aplicar dosis de biocarbón de 4.56 kg m <sup>-2</sup> se obtuvo una reducción en las emisiones de NH <sub>3</sub> entre 12,7% y 22,6% comparado con las emisiones del control.	[58]
Mezcla de biocarbón en compostaje de camas de aves de corral.	Astillas de pino	Reactor <i>batch</i> a 400°C.	Al emplear una mezcla de compost con 20% de biocarbón, se evidenció una reducción de H <sub>2</sub> S de 71% y de NH <sub>3</sub> de 64% comparado con las emisiones generadas por la mezcla de compostaje sin biocarbón.	[59]
Mezcla de biocarbón durante el compostaje de estiércol de gallinas ponedoras.	Tallo de maíz. Madera. Estiércol de gallina ponedora.	Pirólisis entre 450°C y 500°C.	Se encontró que la producción acumulativa de NH <sub>3</sub> comparada con el control se redujo en 24.8% al emplear biocarbón de tallo de maíz, en 20.1% al emplear biocarbón de madera y en 14.2% empleando biocarbón estiércol de gallinas ponedoras.	[60]

En cuanto aplicaciones de esta tecnología en granjas, [62] evaluaron la remoción de sustancias odorantes generadas por el estiércol de cerdo empleando una unidad móvil de fotocatalisis con TiO<sub>2</sub>. En dicha investigación se encontró que al emplear radiación UV-A a 367 nm se logró una reducción de olor de 63%, de p-cresol de 67% y de indol de 32% y al emplear radiación UV-C el porcentaje de reducción fue de 54% de p-cresol y 47% de indol. [65] evaluaron la fotocatalisis con radiación UV-A en el control de emisiones de olores generados en fosas de estiércol de cerdo localizadas bajo los módulos de producción, como resultado se encontró una reducción de olor entre el 32% y 63% y cambios en la percepción del carácter del olor, obteniendo un olor a estiércol más débil con notas de pasta de dientes y menta.

En la literatura, se reportan otros procesos de oxidación avanzada para la remoción de sustancias odorantes. [66] evaluaron la remoción de dimetilsulfuro (DMS) empleado un proceso de oxidación avanzada en fase homogénea con O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, como resultado se obtuvo una remoción entre el 95% y 99% de este contaminante, además concluyeron que esta tecnología acoplada con un depurador húmedo

compacto permitiría obtener altas eficiencias de remoción de olores ofensivos. [67] concluyeron que el proceso de oxidación avanzada que combina radiación UV con Ozono es efectivo para reducir la concentración de amoniaco, alcanzando remociones de este contaminante de 97% empleando una baja concentración (30ppm) y un bajo flujo de aire (28m<sup>3</sup>/h). Para la remoción de compuestos de azufre reducidos se reporta que empleando procesos de oxidación avanzada en fase gaseosa con ozono y luz UV-C se obtuvieron remociones de H<sub>2</sub>S de 24,5 % [68]. En otra investigación evaluaron la tecnología de plasma no térmico para la reducción de olores en unidades porcícolas, encontrando altas eficiencias de remoción para indol and 3-metil-1H-indol [69].

#### 4. CONCLUSIONES

Las actividades pecuarias, al emitir olores ofensivos, impactan negativamente la calidad del aire y afectan la salud y comodidad de las comunidades circundantes. Se identificaron 518 publicaciones científicas sobre control y mitigación de olores ofensivos en actividades como la porcícola, avícola y bovina. En la última década, las

tecnologías más investigadas fueron la digestión anaerobia, biofiltración y biopercolación, así como adsorción con biocarbón y procesos de oxidación avanzada. Se subraya que estas tecnologías, especialmente la digestión anaerobia, demostraron ser efectivas en la reducción de emisiones de olores y sustancias odorantes como  $\text{NH}_3$  y  $\text{H}_2\text{S}$ .

Se destaca la eficacia de la biofiltración, una opción de bajo costo, y la biopercolación, que trata una amplia gama de contaminantes. En tecnologías físicas, el uso de biocarbón como adsorbente y su aplicación en la dieta animal y compostaje se han investigado. Asimismo, se exploró la fotocatalisis heterogénea con  $\text{TiO}_2$  como una forma avanzada de oxidación para cambiar la percepción del olor y eliminar compuestos como p-cresol e indol. En general, las investigaciones resaltan la factibilidad de implementar prácticas y tecnologías para minimizar el impacto de los olores ofensivos en las actividades pecuarias, contribuyendo así a la mejora del entorno y la salud de las comunidades cercanas.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Santiago de Cali por su apoyo financiero en la elaboración de la presente investigación.

#### CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores no declaran conflictos de interés.

#### REFERENCIAS

- [1] R. Sansoucy, "A Driving Force for Food Security and Sustainable Development," *Livestock*, vol. 13–14, pp. 4–11, 1997. <https://doi.org/10.1109/MSP.2006.1593340>
- [2] DANE. Departamento Administrativo Nacional de Estadística, "Boletín Técnico. Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA)," 2019. <https://doi.org/10.1109/5.771073>
- [3] ICA. Instituto Colombiano Agropecuario, "Censos Pecuarios Nacional," Retrieved July 20, 2022, [https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/epidemiologia-](https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/epidemiologia-veterinaria/censos-2016/censo-2018, 2022)
- [4] P. J. Gerber et al., "Tackling Climate Change through Livestock: A Global Assessment of Emissions and Mitigation Opportunities," *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)*, 2013. <https://doi.org/10.1109/ICPR.2014.424>
- [5] W. E. Burnett, "Determination of Malodors by Gas Chromatographic and Organoleptic Techniques," *Environmental Science & Technology*, vol. 3, no. 8, pp. 744–749, 1969. <https://doi.org/10.1021/AC60024A014>
- [6] D. Hanajima et al., "Key Odor Components Responsible for the Impact on Olfactory Sense during Swine Feces Composting," *Bioresource Technology*, vol. 101, no. 7, pp. 2306–2310, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.026>
- [7] Y. C. Wang et al., "Emissions, Measurement, and Control of Odor in Livestock Farms: A Review," *Science of the Total Environment*, vol. 776, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145735>
- [8] K. Sucker et al., "Odor Frequency and Odor Annoyance. Part I: Assessment of Frequency, Intensity and Hedonic Tone of Environmental Odors in the Field," *International Archives of Occupational and Environmental Health*, vol. 81, no. 6, pp. 671–682, 2008. <https://doi.org/10.1007/s00420-007-0259-z>
- [9] L. Capelli et al., "Measuring Odours in the Environment vs. Dispersion Modelling: A Review," *Atmospheric Environment*, vol. 79, pp. 731–743, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.07.029>
- [10] T. Zarra et al., "Environmental Odour Management by Artificial Neural Network – A Review," *Environment International*, vol. 133, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.104939>
- [11] D. Majumdar, "Chapter 4. Air, Noise and Odour Pollution and Control Technologies," in *Environmental Management: Issues and Concerns in Developing Countries*, P. Sikdar, Ed. New Delhi, India: Capital Publishing Company, 2021. [https://doi.org/10.1109/978-93-5110-201-5\\_4](https://doi.org/10.1109/978-93-5110-201-5_4)
- [12] S. S. Schiffman et al., "Potential Health Effects of Odor from Animal Operations, Wastewater

- Treatment, and Recycling of Byproducts,” *Journal of Agromedicine*, vol. 7, no. 1, pp. 7–81, 2000. [https://doi.org/10.1300/J096v07n01\\_02](https://doi.org/10.1300/J096v07n01_02)
- [13] M. T. Piccardo et al., “Odor Emissions: A Public Health Concern for Health Risk Perception,” *Environmental Research*, vol. 204, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112121>
- [14] A. P. Van Harveld, “From Odorant Formation to Odour Nuisance: New Definitions for Discussing a Complex Process,” *Water Science and Technology*, vol. 44, no. 9, pp. 9–15, 2001. <https://doi.org/10.2166/wst.2001.0498>
- [15] A. C. Romain et al., “Continuous Odour Measurement from Fattening Pig Units,” *Atmospheric Environment*, vol. 77, pp. 935–42, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.06.030>
- [16] T. D. Mahin, “Comparison of Different Approaches Used to Regulate Odours around the World,” *Water Science and Technology*, vol. 44, no. 9, pp. 87–102, 2001. <https://doi.org/10.2166/wst.2001.0516>
- [17] J. Tyndall and J. Colletti, “Mitigating Swine Odor with Strategically Designed Shelterbelt Systems: A Review,” *Agroforestry Systems*, vol. 69, no. 1, pp. 45–65, 2007. <https://doi.org/10.1007/s10457-006-9017-6>
- [18] K. H. Nahm, “Current Pollution and Odor Control Technologies for Poultry Production,” *Avian and Poultry Biology Reviews*, vol. 14, no. 4, pp. 151–74, 2003. <https://doi.org/10.3184/147020603783701383>
- [19] A. Talaiekhosani et al., “An Overview of Principles of Odor Production, Emission, and Control Methods in Wastewater Collection and Treatment Systems,” *Journal of Environmental Management*, vol. 170, pp. 186–206, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.02.016>
- [20] I. Wysocka, J. Gębicki, and J. Namieśnik, “Technologies for Deodorization of Malodorous Gases,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 26, no. 10, pp. 9409–34, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04195-1>
- [21] C. Conti, M. Guarino, and J. Bacenetti, “Measurements Techniques and Models to Assess Odor Annoyance: A Review,” *Environment International*, vol. 134, pp. 1–1, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105261>
- [22] C. Kennes and M. C. Veiga, “Technologies for the Abatement of Odours and Volatile Organic and Inorganic Compounds,” *Chemical Engineering Transactions*, vol. 23, pp. 1–6, 2010.
- [23] K. Barbusinski et al., “Biological Methods for Odor Treatment – A Review,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 152, pp. 223–41, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.093>
- [24] N. Donthu et al., “How to Conduct a Bibliometric Analysis: An Overview and Guidelines,” *Journal of Business Research*, vol. 133, pp. 285–96, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>
- [25] N. J. Van Eck and L. Waltman, “Software Survey: VOSviewer, a Computer Program for Bibliometric Mapping,” *Scientometrics*, vol. 84, no. 2, pp. 523–38, 2010. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- [26] M. Hjorth et al., “Nutrient Value, Odour Emission and Energy Production of Manure as Influenced by Anaerobic Digestion and Separation,” *Agronomy for Sustainable Development*, vol. 29, no. 2, pp. 329–38, 2009. <https://doi.org/10.1051/agro:2008047>
- [27] L. D. Jacobson et al., “Air Emissions from Animal Productions Buildings,” *ISAH*, 2003.
- [28] Y. Li, S. Y. Park, and J. Zhu, “Solid-State Anaerobic Digestion for Methane Production from Organic Waste,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 1, pp. 821–26, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.042>
- [29] C. P. C. Bong et al., “The Characterisation and Treatment of Food Waste for Improvement of Biogas Production during Anaerobic Digestion – A Review,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 172, pp. 1545–58, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.199>
- [30] J. Nicolas et al., “Multi-Method Monitoring of Odour Emission in Agricultural Biogas Facilities,” in *Proceedings of the 5th IWA Conference on Odours and Air Emissions*, 2013.
- [31] V. Orzi et al., “Anaerobic Digestion Coupled with Digestate Injection Reduced Odour Emissions from Soil during Manure Distribution,” *Science of the Total Environment*, vol. 621, pp. 168–76, 2018.

- <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.249>
- [32] V. Orzi et al., "The Role of Biological Processes in Reducing Both Odor Impact and Pathogen Content during Mesophilic Anaerobic Digestion," *Science of the Total Environment*, vol. 526, pp. 116–26, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.038>
- [33] C. Riva et al., "Short-Term Experiments in Using Digestate Products as Substitutes for Mineral (N) Fertilizer: Agronomic Performance, Odours, and Ammonia Emission Impacts," *Science of the Total Environment*, vol. 547, pp. 206–14, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.156>
- [34] M. Zilio et al., "Evaluation of Ammonia and Odour Emissions from Animal Slurry and Digestate Storage in the Po Valley (Italy)," *Waste Management*, vol. 103, pp. 296–304, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.12.038>
- [35] B. F. Pain et al., "Odour and Ammonia Emissions Following the Spreading of Anaerobically-Digested Pig Slurry on Grassland," *Biological Wastes*, vol. 34, pp. 259–67, 1990.
- [36] M. C. Delhoméie and M. Heitz, "Biofiltration of Air: A Review," *Critical Reviews in Biotechnology*, vol. 25, no. 1-2, pp. 53–72, 2005. <https://doi.org/10.1080/07388550590925383>
- [37] I. Datta and D. G. Allen, "Biofilter Technology," in *Biotechnology for Odor and Air Pollution Control*, Berlin: Springer, 2005.
- [38] S. Mudliar et al., "Bioreactors for Treatment of VOCs and Odours - A Review," *Journal of Environmental Management*, vol. 91, pp. 1039–54, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.01.006>
- [39] M. J. Hansen et al., "Application of Proton-Transfer-Reaction Mass Spectrometry to the Assessment of Odorant Removal in a Biological Air Cleaner for Pig Production," *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, vol. 60, pp. 2599–2606, 2012. <https://doi.org/10.1021/jf300182c>
- [40] R. W. Melse and J. M. G. Hol, "Biofiltration of Exhaust Air from Animal Houses: Evaluation of Removal Efficiencies and Practical Experiences with Biobeds at Three Field Sites," *Biosystems Engineering*, vol. 159, pp. 59–69, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.04.007>
- [41] K. L. Ho et al., "Microbial Populations Analysis and Field Application of Biofilter for the Removal of Volatile-Sulfur Compounds from Swine Wastewater Treatment System," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 152, pp. 580–88, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.021>
- [42] B. A. Sheridan, T. P. Curran, and V. A. Dodd, "Assessment of the Influence of Media Particle Size on the Biofiltration of Odorous Exhaust Ventilation Air from a Piggery Facility," *Bioresource Technology*, vol. 84, pp. 129–43, 2002.
- [43] M. J. Hansen et al., "Removal of Hydrogen Sulphide from Pig House Using Biofilter with Fungi," *Biosystems Engineering*, vol. 167, pp. 32–39, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.12.004>
- [44] H. Bu et al., "Biotrickling Filter for the Removal of Volatile Sulfur Compounds from Sewers: A Review," *Chemosphere*, vol. 277, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130333>
- [45] P. Rybarczyk et al., "Treatment of Malodorous Air in Biotrickling Filters: A Review," *Biochemical Engineering Journal*, vol. 141, pp. 146–62, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2018.10.014>
- [46] M. Gospodarek et al., "Comparative Evaluation of Selected Biological Methods for the Removal of Hydrophilic and Hydrophobic Odorous VOCs from Air," *Processes*, vol. 7, 2019. <https://doi.org/10.3390/pr7040187>
- [47] C. Van der Heyden et al., "Long-Term Microbial Community Dynamics at Two Full-Scale Biotrickling Filters Treating Pig House Exhaust Air," *Microbial Biotechnology*, vol. 12, no. 4, pp. 775–86, 2019. <https://doi.org/10.2166/wst.2001.0498>
- [48] L. Deng et al., "Deodorization of the Off-Gas from Livestock Manure Aerobic Composting Tank Using Biotrickling Filters and Its Mechanism," *Biochemical Engineering Journal*, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2022.108409>
- [49] P. Basu, *Biomass Gasification and Pyrolysis Practical Design and Theory*, 2010.
- [50] A. K. Sakhiya, A. Anand, and P. Kaushal, "Production, Activation, and Applications of Biochar in Recent Times," *Biochar*, vol. 2, pp. 253–85, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2022.108409>

- doi.org/10.1007/s42773-020-00047-1
- [51] W. Gwenzi et al., "Biochars as Media for Air Pollution Control Systems: Contaminant Removal, Applications and Future Research Directions," *Science of the Total Environment*, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142249>
- [52] K. O. Iwuzor et al., "A Review on the Thermochemical Conversion of Sugarcane Bagasse into Biochar," *Cleaner Materials*, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100162>
- [53] M. R. Chandraiah, "Facile Synthesis of Zero Valent Iron Magnetic Biochar Composites for Pb(II) Removal from the Aqueous Medium," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 55, pp. 619–25, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2015.12.015>
- [54] Q. Wu et al., "Adsorption Characteristics of Pb(II) Using Biochar Derived from Spent Mushroom Substrate," *Scientific Reports*, vol. 9, no. 1, 2019. <https://doi.org/10.1038/S41598-019-52554-2>
- [55] A. Kumar et al., "Biochar as Environmental Armour and Its Diverse Role towards Protecting Soil, Water and Air," *Science of the Total Environment*, vol. 806, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150444>
- [56] L. Sobol and A. Dyjakon, "Biochar as a Sustainable Product for the Removal of Odor Emissions - Mini Literature Review," *Revista de Chimie*, vol. 73, no. 4, pp. 86–96, 2022. <https://doi.org/10.37358/RC.22.4.8557>
- B. Dougherty et al., "Can Biochar Covers Reduce Emissions from Manure Lagoons While Capturing Nutrients?" *Journal of Environmental Quality*, vol. 46, pp. 659–66, 2017. <https://doi.org/10.2134/jeq2016.12.0478>
- [57] D. L. Maurer et al., "Pilot-Scale Testing of Non-Activated Biochar for Swine Manure Treatment and Mitigation of Ammonia, Hydrogen Sulfide, Odorous Volatile Organic Compounds (VOCs), and Greenhouse Gas Emissions," *Sustainability*, vol. 9, 2017. <https://doi.org/10.3390/su9060929>
- [58] C. Steiner et al., "Reducing Nitrogen Loss during Poultry Litter Composting Using Biochar," *Journal of Environmental Quality*, vol. 39, pp. 1236–42, 2010. <https://doi.org/10.2134/jeq2009.0337>
- [59] W. Chen et al., "Effects of Different Types of Biochar on Methane and Ammonia Mitigation during Layer Manure Composting," *Waste Management*, vol. 61, pp. 506–15, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.014>
- [60] S. B. Monge et al., "Manual Técnico Sobre de Oxidación Aplicados al tratamiento de Aguas Industriales," España, 2018.
- [61] M. Lee et al., "Mitigation of Odor and Gaseous Emissions from Swine Barn with UV-A and UV-C Photocatalysis," *Atmosphere*, vol. 12, no. 5, 2021. <https://doi.org/10.3390/atmos12050585>
- [62] F. He et al., "Photocatalytic Air Purification Mimicking the Self-Cleaning Process of the Atmosphere," *Nature Communications*, vol. 12, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22839-0>
- [63] S. Weon et al., "Status and Challenges in Photocatalytic Nanotechnology for Cleaning Air Polluted with Volatile Organic Compounds: Visible Light Utilization and Catalyst Deactivation," *Environmental Science: Nano*, vol. 6, pp. 3185–3214, 2019. <https://doi.org/10.1039/c9en00891h>
- [64] M. Lee et al., "Evaluation of TiO<sub>2</sub> Based Photocatalytic Treatment of Odor and Gaseous Emissions from Swine Manure with UV-A and UV-C," *Animals*, vol. 11, 2021. <https://doi.org/10.3390/ani11051289>
- [65] H. Yao et al., "DMS Removal in a Bubble Reactor by Using Peroxone (O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) Reactions," *Chemical Engineering Transactions*, vol. 40, pp. 229–34, 2014. <https://doi.org/10.3303/CET1440039>
- [66] K. Kočí et al., "Degradation of Ammonia from Gas Stream by Advanced Oxidation Processes," vol. 55, no. 4, pp. 433–37, 2019. <https://doi.org/10.1080/10934529.2019.1705105>
- [67] C. Meusinger et al., "Treatment of Reduced Sulphur Compounds and SO<sub>2</sub> by Gas Phase Advanced Oxidation," *Chemical Engineering Journal*, vol. 307, pp. 427–34, 2017. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2016.08.092>
- [68] K. B. Andersen et al., "Non-Thermal Plasma for Odour Reduction from Pig Houses - A Pilot Scale Investigation," *Chemical Engineering Journal*, vol. 223, pp. 638–46, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.02.106>
- [69]

## COLORIMETRIC ANALYSIS OF THE LEAVES OF PLANTS EXPOSED TO CADMIUM

### Análisis colorimétrico de hojas de plantas expuestas a cadmio

Andrés Felipe Rodríguez Acevedo<sup>1</sup>, Lina Tatiana Velandia Torres<sup>1</sup>, Jorge Andrés Ramírez Rincón<sup>2</sup>, Yulieth Catherine Reyes Roa<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Fundación Universidad de América, Faculty of Engineering – Chemical and Engineering Program, Physchemath Research Group, Colombia. <sup>2</sup> Fundación Universidad de América, Faculty of Basic Sciences and Humanities, Physchemath Research Group, Colombia. Email: [yulieth.reyes@profesores.uamerica.edu.co](mailto:yulieth.reyes@profesores.uamerica.edu.co)

(Recibido 16 de Mayo de 2023 y aceptado 07 de Diciembre de 2023)

#### Abstract

Cadmium is a toxic heavy metal that is uptake and translocate in plants in its divalent form Cd<sup>2+</sup>. The presence of cadmium in plant tissues at different concentrations can generate phenotypic changes of great significance in plants and are initially expressed by the leaves. In this study cell phone photographs of control plants and plants with cadmium at 100 µg/L were taken, with the objective of identifying morphological changes and significant differences in colorimetric parameters of chroma, hue and brightness in leaves of Basil (*Ocimum Basilicum*), Peppermint (*Mentha spicata*), Lettuce (*Lactuca sativa*) and Spinach (*Spinacia oleracea*), which were grown under the floating root method. In addition, an analysis of variance was carried out for the colorimetric parameters and the results obtained indicate representative variations for a very small period of exposure. The methodology of this work is a first approach to the characterization of images of plants contaminated with heavy metals among other contaminants, as a detection and analysis strategy that can support the understanding of issues of bioaccumulation of contaminants in plants and contribute significantly to the problem of food safety through identification and monitoring.

**Keywords:** *cadmium, colorimetry parameters, foliar tissue.*

#### Resumen

El cadmio es un metal pesado tóxico que se absorbe, internaliza y se transloca en las plantas en su forma divalente Cd<sup>2+</sup>. La presencia de cadmio en tejidos vegetales a diferentes concentraciones puede generar cambios fenotípicos de gran significancia en las plantas y son expresados inicialmente por las hojas. En este estudio se tomaron fotografías con celular a plantas control y plantas con cadmio a 100 µg/L, con el objetivo de identificar cambios morfológicos y diferencias significativas en parámetros colorimétricos de croma, tono y brillo en hojas de plantas de Albahaca (*Ocimum Basilicum*), Hierbabuena (*Mentha spicata*), Lechuga (*Lactuca sativa*) y Espinaca (*Spinacia oleracea*), que fueron cultivadas bajo el método de raíz flotante. En el estudio se realizó un análisis de varianza para los parámetros colorimétricos y resultados obtenidos indican variaciones representativas para un periodo muy pequeño de exposición. La metodología de este trabajo es un primer acercamiento a la caracterización de imágenes de plantas contaminadas con metales pesados entre otros contaminantes, como una estrategia de detección y análisis que puede apoyar la comprensión en temas de bioacumulación de contaminantes en plantas y aportar significativamente a la problemática de seguridad alimentaria mediante la identificación y el seguimiento.

**Palabras clave:** *cadmio, parámetros de color, tejido foliar.*

## 1. INTRODUCTION

Cadmium (Cd) contamination is an issue of great concern in water systems, specifically in irrigation water for agricultural activities [1]. Global and local studies highlight the accumulation of Cd concentrations in plant species for human consumption [2–4]. In Colombia, specifically, traces of cadmium contamination have been reported that exceed the limits established according to the European Pharmacopoeia (0.05 µg/g), FAO (0.02 µg/g), World Health Organization (0.03 µg/g), and Colombian regulations [5–9].

The presence of Cd in vegetal species for human consumption represents a significant health hazard and threatens the food safety of the country [10, 11]. Cadmium is a toxic heavy metal widely dispersed in the environment. According to the World Health Organization, Cd is one of the 10 compounds of greatest public health concern [12]. This element enters the atmosphere as a result of atmospheric particle deposition from the combustion of fossil fuels, volcanic eruptions, and other natural processes. It is subsequently deposited in water systems that interact with plants and is translocated through biochemical mechanisms in its divalent form, Cd<sup>2+</sup>. After the accumulation process, the contaminated species is integrated into the trophic chain, where it enters the human body through the food chain [13,14].

Cadmium uptakes biological systems due to its chemical similarity to zinc (Zn). Cd and Zn belong to the same group in the periodic table, which means that they have a similar electronic configuration [15]. For this reason, Cd can easily replace Zn in biological and enzymatic processes, which can have negative effects on human health [15]. However, molecular mechanisms and processes associated with the internalization and translocation of heavy metals in plants are under study [16].

Cd toxicity interferes negatively in plants at high concentrations because it influences growth inhibition, activation or inhibition of enzymes, reduction of transpiration rate and water content, and interferes in

the entry, transport, and utilization of essential elements (Ca, Mg, P, and K) and water, causing severe nutritional and water imbalances in the plant [16–19]. According to Rizwan et al. (2017 [20], high concentrations of Cd in vegetables increase the number of ROS (reactive oxygen species), cause genotoxicity, and generate damage to the DNA.

The phytotoxic effects are different depending on the metal, although some metals have some similarities, such as Cd and As. Cd in plants shows visible effects such as inhibition of growth, photosynthesis, and chlorophyll fluorescence; dark spots on root tips; yellow pigments on leaves; drying of leaves; chlorosis; and necrosis [21–23].

The morphological changes that plants show, mainly in the leaf tissue, are the first indication of heavy metal toxicity [24, 25]. Colorimetry is a method used to evaluate colorimetric changes in the aerial vegetative tissues of plants using parameters such as hue, chroma, and brightness.

Colorimetry is a method used to identify color variations in aqueous solutions or solid substances associated with the concentration of an analyte of interest [26, 27]. Concerning cadmium, this method has been used to evaluate color changes in sensors with fluorescent responses for the detection of Cd<sup>2+</sup> in rice samples [28]. It has also been used to identify wavelengths in heavy metal diagnostics by analyzing reflectance differences in RGB images [29]. Colorimetry has been used to evaluate quality indices in plant products; however, there are no significant reports that establish significant color differences with phenotypic changes in plants in response to a contaminant of interest.

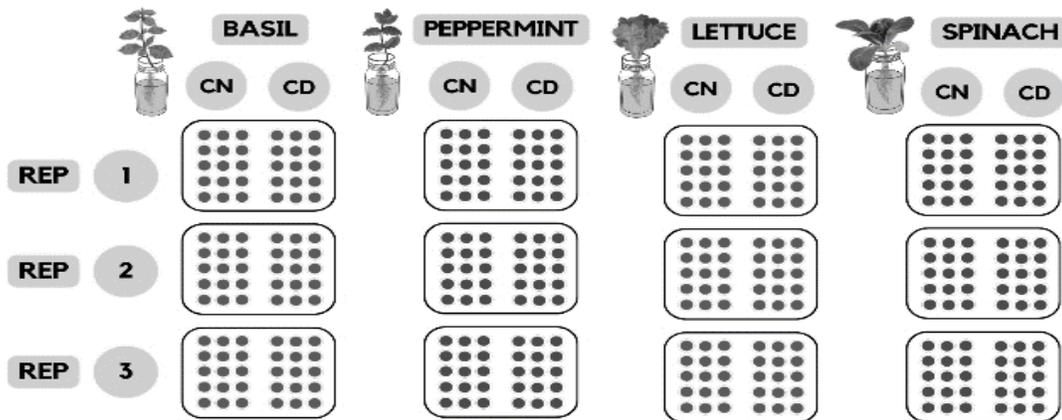
The objective of this work is to identify significant changes using a two-factor analysis of variance in the colorimetric parameters of chroma, hue, and gloss of leaves of different plant species: basil (*Ocimum basilicum*), peppermint (*Mentha spicata*), lettuce (*Lactuca sativa*), and spinach (*Spinacia oleracea*) as a result of exposure to cadmium (100 µg/l) during the cultivation time.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1. Seedling culture and image capture

In the experimental development of this work, seedlings of basil (*Ocimum basilicum*), peppermint (*Mentha spicata*), lettuce (*Lactuca sativa*), and spinach (*Spinacia oleracea*), obtained from the Biosystems Center of the Jorge Tadeo Lozano University in Bogotá, Colombia, were used.

The experimental design consisted of randomized blocks with three replications, as shown in Figure 1. For each block, 15 control seedlings and 15 root seedlings exposed to cadmium at 100 µg/L were used. The solution was composed of water fertilizer (10 ml/L) and cadmium at concentrations of 100 µg/L, respectively, for a period of seven days. The fertilizer “Crecilizer” was obtained from a local store, and the cadmium was purchased from Sigma Aldrich.



**Figure 1.** Randomized block experimental design with three replications, with control seedlings (CN) and seedlings exposed to cadmium (CD).

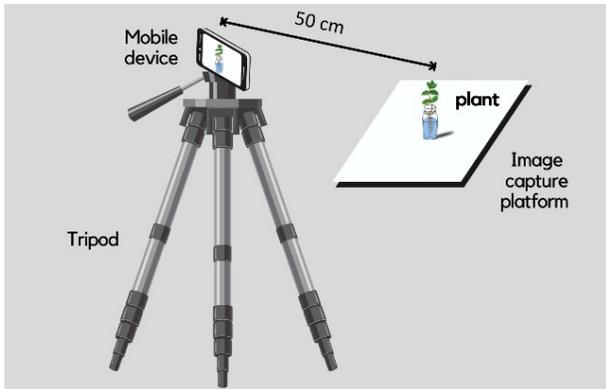
### 2.2 Image capture and calculations of chroma, tone, and brightness.

Photographic monitoring was performed during the 7 days of the experiment. For each replicate, 2 control seedlings and 2 seedlings per treatment were randomly chosen from each replicate, for a total of 48 samples photographed per day.

The photographs were captured using the camera of a Huawei P30 mobile device, model MAR-LX3A, with a resolution of 24 megapixels. The set-up for the photographic monitoring consisted of a tripod for mobile devices and a sheet of white foamy paper (see Figure 2) to establish a suitable background for greater distinction in the morphological changes of the seedlings and to establish conditions in which it is possible to normalize the information captured in the photographs. The distance between the camera and seedlings is no greater than 50 cm.

For the colorimetric analysis, the ENVI program was used. For each image, five different areas of 60 x 60 pixels were delimited on the leaves of the sample of each species to subsequently express the information of these areas in an average in the RGB color model, thus giving a general and representative sweep of the color state in the 5 areas of the leaves of each of the seedlings analyzed. On the other hand, a random area was taken, both in location and dimensions, of the white background where the samples of the seedlings were photographed to establish a reference point to normalize the values obtained with the ENVI program of the selected areas and thus achieve homogenization of the information obtained, independent of the information obtained and independent of the variable light conditions that were experienced during the photographic monitoring. With the information obtained and the averages in the RGB color model of the 5 selected areas of the leaves and the

reference area, equations 1-3 were used to normalize the values of the RGB color model for R equation (1), for G equation (2), and finally for B equation (3).



**Figure 2.** Set up for daily photographic monitoring of the selected samples.

$$X_{RN} = \frac{X_R * 255}{X_R} \quad (1)$$

$$X_{GN} = \frac{X_G * 255}{X_G} \quad (2)$$

$$X_{BN} = \frac{X_B * 255}{X_B} \quad (3)$$

After the normalization of the RGB values, using the ColorMINE.org website, these values were taken to the CIE-L\*a\*b color model, which describes color in terms of lightness or brightness (L), red-green intensity (a), and yellow-blue intensity (b), to subsequently determine other color properties such as chroma (C) obtained by equation (4) and tone (h) obtained by equation (5).

$$C = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (4)$$

$$h = \arctan\left(\frac{b}{a}\right) * \frac{180}{\pi} \quad (5)$$

#### a. Statistical analysis

The data were treated statistically using a two-factor analysis of variance with a significance level of 95%. Tukey's multiple comparisons test was used.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

In this study, a morphological analysis of the four plant species (basil, spearmint, lettuce, and spinach) during seven days of cadmium exposure is performed. On the other hand, significant differences between chroma, hue, and brightness parameters are evaluated for the different species.

#### 3.1 Phenotypic changes in plant species and effects due to cadmium exposure

Cadmium is a non-essential element that interferes with plant metabolism and alters cell function, as shown in Figure 3. Plants express various symptoms, such as necrosis in the form of blotches (3A), chlorosis and loss of pigmentation (3B), and loss of turgor (3C).

Necrosis is the death of plant tissue and manifests itself on the leaves as brown or black spots. Rots appear in all plant tissues (leaves, stems, roots) and flowers. Chlorosis refers to the decrease in chlorophyll in the leaves and manifests itself as a yellowish color in the leaves. Turgor loss is the loss of water pressure in plant cells and can cause leaves and stems to wilt and fall.

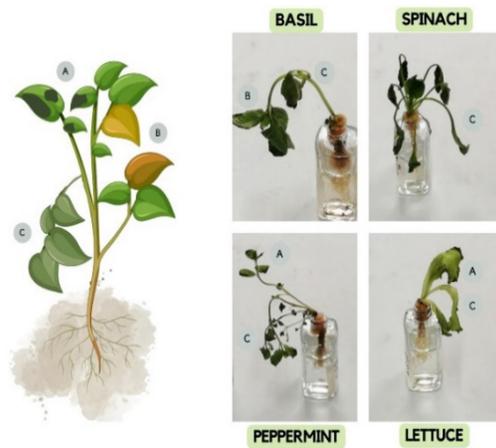
The symptoms that cadmium produces in plants can vary depending on the species and the conditions of exposure; however, the most representative effects for each species are still a current topic of study.

Plants that were exposed to cadmium showed effects of chlorosis, loss of turgor, and a modified color from green to brown, as seen in Figure 3. Concerning necrosis, species behaved from most affected to least affected as follows: Lettuce > Basil > Mint > Spinach. This is probably due to differences in the way different plant species metabolize cadmium, and thus their cellular functions are affected.

The peppermint, unlike the others, did not show changes between the control sample and the treatment sample. It could be understood that regardless of whether this species is exposed or not to cadmium, it always presents

necrosis, either due to its morphology or specific physiology. In addition, since this is a symptom directly associated with the plant cells, it is the most noticeable symptom in the study.

During the days of exposure, a modified color was observed for the lettuce seedlings from day 5. Regarding the loss of turgor for the different species, affectation was observed for all species, mainly in spinach, which showed symptoms from the first day. Chlorosis was the least representative change. This work focuses on identifying representative changes in the color of plant leaves by analyzing parameters such as chroma, hue, and brightness.



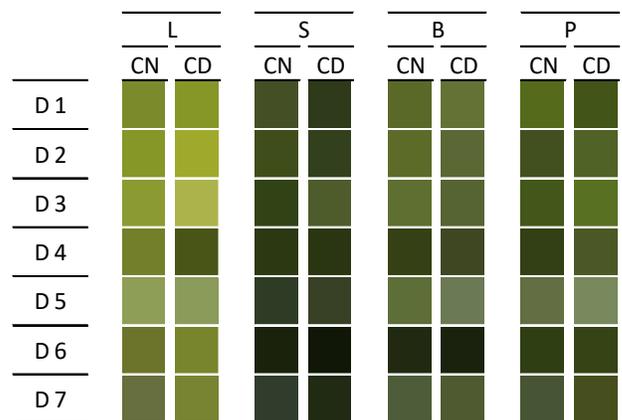
**Figure 3.** Phenotypic effects due to cadmium exposure in plant species.

### 3.2 Qualitative analysis of color variations

The color variations in the RGB model from day 1 (D1) until day 7 (D7) for control (CN) and cadmium (CD) plants of lettuce (L), spinach (S), basil (B), and peppermint (P) are shown in Figure 4. To acquire the colors, the photographs taken by the Huawei P30 mobile handset, model MAR-LX3A, and camera were analyzed using the RGB color space. The three primary components of the image—red (R), green (G), and blue (B)—are the basis for this approach. It is possible to get a numerical representation of the observed color by combining the intensities of these three colors to represent each pixel in the image.

In particular, the RGB channel values were retrieved for every plant examined and for every point in time of exposition to cadmium. This provided information about the chromatic composition of the leaves of basil, peppermint, lettuce, and spinach. The lettuce presents a greater color change in its leaves due to a low tolerance to cadmium because of stress. Other species presented a lower modified color variation. It is important to highlight that color differences are not very significant within the RGB color model, so it is necessary to move to the CIE-L\*a\*b model and analyze other color properties.

It is also important to highlight the time of the experiment, which indicates that during a complete germination process, the color change is more evident for each species. The range of pigments found in each species, including chlorophyll, which gives plants their green color, is the reason for this difference in green hues. Different species have different relative concentrations of chlorophyll and other photosynthetic pigments, which affects how intense and what shade of green their leaves are. In addition, variations in pigment expression and, consequently, in the color hues detected in color analysis may be attributed to genetic variables and environmental circumstances unique to individual plants. But to the unaided eye, there are no appreciable alterations upon exposure to cadmium.



**Figure 4.** Evolution of the average color of lettuce (L), spinach (S), basil (B), and peppermint (P) leaves during the 7 days of the experiment.

### 3.3 Colorimetric analysis of leaf tissue

For the colorimetric analysis, chroma, hue, and brightness parameters were determined. Chroma indicates the saturation and intensity of the color; brightness gives us information about the luminosity of the analyzed color; and finally, hue gives us information about which colors are present in the analyzed samples.

#### 3.3.1. Chroma analysis of the study species

The Chroma values for each species, lettuce (L), spinach (S), basil (B), and peppermint (P), are presented in Table 1, and the factor comparisons for each day are shown in Figure 5.

The chroma values obtained for the different species range from 55.155% to 14.058%. The greatest chroma values in this instance are found in lettuce, indicating more intensity and purity of color in the leaves. Conversely, as compared to the other species under consideration, spinach has the lowest chroma values, suggesting a lower saturation and potentially a duller color tone.

**Table 1.** Chroma values for each species.

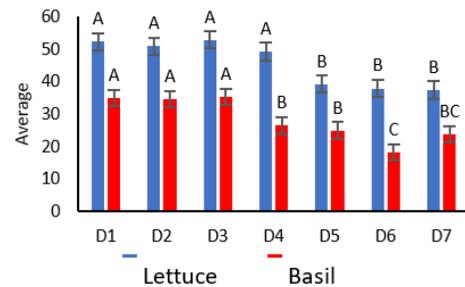
	DAY	1	2	3	4	5	6	7
BASIL	CN	35.587	35.479	37.369	27.155	26.896	19.417	19.693
	CD	34.175	33.720	33.245	25.771	22.941	17.104	27.702
PEPPER-MINT	CN	36.169	32.936	35.798	28.818	21.724	26.404	23.717
	CD	35.136	38.859	40.458	34.027	24.903	26.919	28.301
LETTUCE	CN	48.981	47.762	50.603	50.772	35.426	37.057	35.175
	CD	53.564	54.041	55.156	47.566	37.013	38.730	39.645
SPINACH	CN	25.100	31.474	27.806	24.178	18.435	16.097	14.058
	CD	23.685	27.901	27.473	22.124	16.402	14.251	17.447

The chroma values are within a range of 23 to 48. The control plants and the plants exposed to cadmium indicate a decrease in the initial chroma values from day 4, except for lettuce, because the values increase on days 3 and 4 and then decrease. These results indicate that color intensity decreases in plants under stress conditions. This suggests improving cultivation conditions to obtain a better analysis of the chroma changes that plants may present under exposition to pollutants.

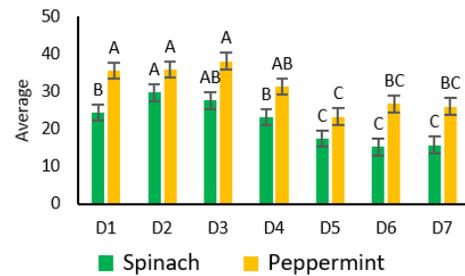
Figure 5 shows significant differences among species; this is related to the different phenotypic changes in

leaf tissue color. During the first 3 days, no differences were found for lettuce, basil, or peppermint. On days 6 and 7, lettuce and spinach show significant differences. Spinach is the species that shows the greatest variation compared to other species. These changes can be due to natural causes, such as a lack of nutrients or oxygen, as a response to stressful conditions of the environment on the plants.

a.



b.



**Figure 5.** Graph of means for the chroma of (a) lettuce and basil, (b) spinach and peppermint with results of day factor comparisons.

On the other hand, as for the cultivation factor, the species that presented significant differences was peppermint. The response of this factor and the lower influence on the other 3 species can be related to the tolerance of each one to the presence of cadmium. This can also be connected with the diseases of necrosis and loss of turgor presented in Figure 4 for peppermint, where the one that was exposed to cadmium presented these symptoms earlier compared to the one that was in the control crop.

These results demonstrated that a colorimetric study for the analysis of phenotypic changes in chroma is possible.

The time factor is an important parameter to evaluate the response in the leaf tissue. In the experiment, cadmium concentrations were not varied; therefore, it is suggested to make variations to find significant differences for each species depending on the element.

### 3.3.2. Leaf tissue brightness of the study species

The brightness values for lettuce, spinach, basil, and peppermint are presented in Table 2, and the factor comparison for day 1 (D1) until day 7 (D7) is shown in Figure 6. The brightness values obtained for the different species range from 67.913% to 13.853%. Lettuce is the species with the highest values, while spinach has the lowest values. The variance in glossiness values observed across the examined species may be a sign of variations in the surface composition and leaf structure. With greater gloss values than spinach, lettuce may have a smoother surface or more reflective trichomes, which might have an impact on light reflection and the gloss values that are measured.

**Table 2.** Brightness values for each species.

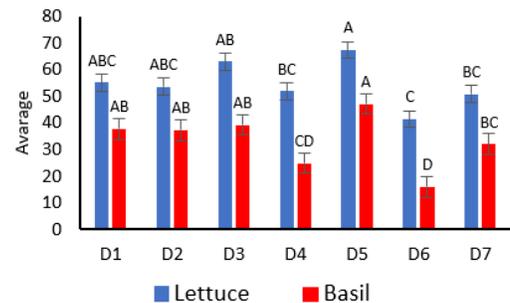
	DAY	1	2	3	4	5	6	7
BASIL	CN	36.180	38.087	42.227	25.037	41.570	15.950	31.750
	CD	39.370	36.433	36.243	24.737	52.713	15.933	32.250
PEPPER-MINT	CN	35.097	35.787	33.687	26.313	44.397	22.560	37.427
	CD	31.160	39.147	42.027	33.853	49.847	25.267	31.250
LETTUCE	CN	55.353	48.640	58.467	53.037	67.913	41.817	51.960
	CD	54.977	58.313	67.543	50.890	66.763	40.923	49.490
SPINACH	CN	26.457	34.143	33.110	20.620	37.993	13.853	26.627
	CD	25.750	28.630	32.047	19.813	38.827	14.167	18.170

The brightness values are in the range of 25 to 40 for day 1. In the first three days, the brightness of basil and mint increases. Lettuce and spinach show a variation of values that increase and decrease during the duration of the experiment. On day 6, the lowest value is observed for all plants, including control plants and plants with cadmium. By day 7, the brightness values decreased for basil, lettuce, and spinach. Peppermint increases the brightness of control plants and preserves the brightness of cadmium plants. Brightness is a representative parameter that denotes differences between control plants and plants with cadmium because the values show that if the plant is in optimal condition, the brightness increases.

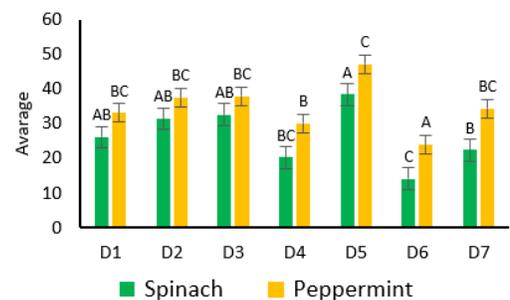
The presence of cadmium reduced the brightness of spinach, lettuce, and basil. This is an interesting result because it indicates a possible correlation between brightness and the classification of plants in terms of bioaccumulation, such as retainers, accumulators, and hyperaccumulators. However, more information is still required on the molecular and physicochemical processes involved in metal bioaccumulation processes in plants and their physical effects.

The results for brightness presented significant differences for the four species, as can be observed in Figure 6, with which it is possible to establish the possibility of carrying out a colorimetric study to evaluate the phenotypic changes in brightness, and a study should be carried out to establish the levels of the factors cadmium concentration and analysis time to achieve a greater significance of these factors in the dependent variable brightness.

a.



b.



**Figure 6.** Graphic for the brightness of (a) lettuce and basil and (b) spinach and peppermint, resulting in day factor comparisons.

### 3.3.3. Leaf tissue hue of the study species

The hue for each species is presented in Table 3, and the factor comparison for day is shown in Figure 7. The tone values obtained for the different species range from 134,335° to 108,832°. Spinach is the species with the highest values, while lettuce has the lowest values. When it comes to color, tone is defined as a color's location within the chromatic spectrum. In this context, tone is represented in the CIE-L\*a\*b color space and is expressed in degrees. With the greatest hue values, lettuce seems more light-colored or luminescent, whereas spinach has the lowest values and may have deeper or more vivid colors.

**Table 3.** Tone values for each species.

	DAY	1	2	3	4	5	6	7
BASIL	CN	117.422	117.436	117.678	117.342	120.962	121.105	127.409
	CD	116.749	117.464	119.369	118.999	122.060	121.775	117.738
PEPPER-MINT	CN	118.378	118.422	120.955	118.209	123.209	121.572	124.843
	CD	120.075	118.275	119.203	117.018	120.989	119.183	113.396
LETTUCE	CN	112.370	114.345	112.184	109.793	116.583	111.564	114.467
	CD	111.950	109.900	108.832	110.543	117.397	111.609	112.904
SPINACH	CN	120.147	116.939	119.720	118.411	124.366	122.235	134.335
	CD	121.181	119.199	120.285	119.611	124.149	124.272	122.101

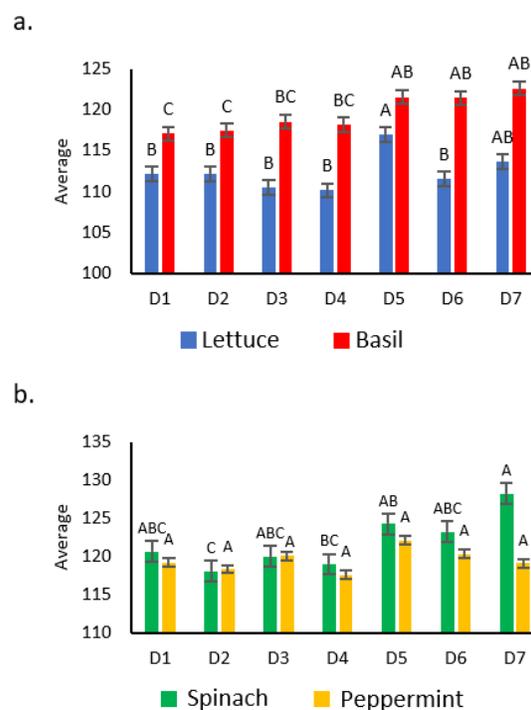
Hue values increased for control plants between day 1 and day 7. For spinach, lettuce, and basil plants exposed to cadmium, a very small increase in hue is observed between day 1 and day 7. While peppermint plants reduce their tone.

Regarding the tone variable, for spinach and mint, it was necessary to apply the non-parametric analysis of variance, Kruskal-Wallis, and when evaluating the effect of the individual factors, there is no response of the tone variable to a combined factor, as shown in Figure 7.

For the day factor, mint does not present significant differences and shows similar shades to each other during the cultivation time. While the other species denote a different response in form and intensity. The modified color affects the intensity or saturation of the colors and does not influence the appearance of new shades in the leaf tissue as a function of time.

Regarding the cultivation factor, peppermint presents significant differences due to the possible aspects

mentioned above in the chroma regarding this factor. Finally, for the combined effect, basil is the only one that presents considerable significance for this factor, as shown in Table 3, which indicates that both the time and the concentration to which it was exposed are sufficient to identify the effect of cadmium on the phenotypic changes in tone for this species.



**Figure 7.** Graph of means for the tone of (a) lettuce and basil and (b) spinach and mint, with the result of comparisons of the day factor.

## 4. CONCLUSIONS

The results obtained in this study indicated variations in the chroma, tone, and brightness parameters of plants exposed to cadmium during the exposure time. The analysis of the different parameters indicated variations for each species as a function of cadmium. The exposure time also indicated that colorimetric parameters in plants present changes from the first day, which motivates the deepening and development of new heavy metal detection techniques through the use of photographs from mobile devices and the analysis of data.

To thoroughly evaluate the results obtained, it is proposed to evaluate the changes in color parameters during the entire germination process of a plant exposed to a contaminant of interest because it allows greater data and information collection. Furthermore, the characterization of images with colorimetric parameters is projected as a low-cost and easily accessible method. However, it is important to evaluate different variables such as time, element, vegetative species, element concentration, and image capture conditions.

Although there are many parameters to evaluate, image characterization could significantly contribute to the early detection of cadmium, among other elements of interest, mainly in plants of great interest for human consumption.

Image characterization could be an important contribution to bioaccumulation studies because it could help identify retainer, accumulator, and hyperaccumulator plants of heavy metals, among other contaminants of interest. It is also a method that requires coupling machine learning techniques for data analysis, which would allow results in real time. However, this technique is recent and has not yet been used for the detection of specific metals in foods for human consumption.

In addition, image analysis can significantly contribute to the problem of food safety and environmental monitoring of crops to guarantee the safety of products for human consumption.

#### ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by Fundación Universidad de América [Project IHU-009-2022] with local Funds.

#### CONFLICT OF INTEREST

The authors do not have any type of conflict of interest to declare.

#### REFERENCES

- [1] A. Kubier, R. T. Wilkin, and T. Pichler, "Cadmium in soils and groundwater: A review," *Appl Geochem*, vol. 108, p. 1, 2019. <https://doi.org/10.1016/J.APGEOCHEM.2019.104388>
- [2] N. S. Zulkafflee et al., "Evaluation of Heavy Metal Contamination in Paddy Plants at the Northern Region of Malaysia Using ICPMS and Its Risk Assessment," *Plants (Basel)*, vol. 10, no. 1, pp. 1–16, 2020. <https://doi.org/10.3390/PLANTS10010003>
- [3] T. Mu et al., "Geographical variation in arsenic, cadmium, and lead of soils and rice in the major rice producing regions of China," *Sci Total Environ*, vol. 677, pp. 373–381, 2019. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.04.337>
- [4] J. E. Patiño Navas, "Detección de cadmio en raíces subterráneas de *Rhizophora* sp., en el área de custodia de manglares de Puerto Roma, Golfo de Guayaquil," Master's Thesis, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad de Guayaquil, 2020. [Online]. Available: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/48734>
- [5] World Health Organization, "Concise International Chemical Assessment Document 63: Cadmium," 2011. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.04.337>
- [6] FAO, "Codex Alimentarius Commission. Maximum levels for contaminants in foods," 2011.
- [7] European Directorate for the Quality of Medicines & Healthcare, *European Pharmacopoeia (2022)*, 9.0.0. European Pharmacopoeia, 2022.
- [8] Ministerio de Salud y Protección Social-Colombia, "Resolucion-4506-de-2013. Colombia," 2013, pp. 1–10. [Online]. Available: <https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/resolucion-4506-de-2013.pdf>
- [9] J. Marrugo-Negrete et al., "Assessment of heavy metal pollution, spatial distribution and origin in agricultural soils along the Sinú River Basin, Colombia," *Environ Res*, vol. 154, pp. 380–388, 2017. <https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2017.01.021>
- [10] B. M. Shanmugaraj, A. Malla, and S. Ramalingam, "Chapter 1- Cadmium Stress and Toxicity in Plants:

- An Overview,” in *Cadmium Toxicity and Tolerance in Plants: From Physiology to Remediation*, M. Hasanuzzaman, M. N. V. Prasad, and M. B. T. Fujita, Eds., Elsevier, pp. 1–17, 2019. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814864-8.00001-2>
- [11] L. Bouida et al., “A Review on Cadmium and Lead Contamination: Sources, Fate, Mechanism, Health Effects and Remediation Methods,” *Water* 2022, vol. 14, no. 21, p. 3432, 2022. <https://doi.org/10.3390/W14213432>
- [12] World Health Organization, “10 chemicals of public health concern,” 2020. [Online]. Available: <https://www.who.int/news-room/photo-story/photo-story-detail/10-chemicals-of-public-health-concern>
- [13] S. Manwani et al., “Heavy Metal Contamination in Vegetables and Their Toxic Effects on Human Health,” in *Sustainable Crop Production - Recent Advances*, 2022. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.102651>
- [14] I. Mohan et al., “Phytoremediation of Heavy Metals from the Biosphere Perspective and Solutions,” in *Pollutants and Water Management*, pp. 95–127, 2021. <https://doi.org/10.1002/9781119693635.CH5>
- [15] G. Genchi et al., “The Effects of Cadmium Toxicity,” *Int J Environ Res Public Health*, vol. 17, no. 11, 2020. <https://doi.org/10.3390/IJERPH17113782>
- [16] Y. C. Reyes R et al., “Fluorescent Molecular Sensor for the Detection of Cadmium in Basil Roots,” *ACS Agricultural Science and Technology*, vol. 2, no. 1, pp. 144–152, 2022. [https://doi.org/10.1021/ACSAGSCITECH.1C00250/SUPPL\\_FILE/AS1C00250\\_SI\\_001.PDF](https://doi.org/10.1021/ACSAGSCITECH.1C00250/SUPPL_FILE/AS1C00250_SI_001.PDF)
- [17] P. G. Peera Sheikh Kulsum et al., “A state-of-the-art review on cadmium uptake, toxicity, and tolerance in rice: From physiological response to remediation process,” *Environ. Res.*, vol. 220, no. October 2022, p. 115098, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.115098>
- [18] S. Pasricha et al., “Molecular mechanisms underlying heavy metal uptake, translocation and tolerance in hyperaccumulators-an analysis: Heavy metal tolerance in hyperaccumulators,” *Environ. Challenges*, vol. 4, p. 100197, 2021. <https://doi.org/10.1016/J.ENVC.2021.100197>
- [19] U. Riaz et al., “Cadmium Contamination, Bioavailability, Uptake Mechanism and Remediation Strategies in Soil-Plant-Environment System: a Critical Review,” *Curr. Anal. Chem.*, vol. 17, no. 1, pp. 49–60, 2020. <https://doi.org/10.2174/1573411016999200817174311>
- [20] M. Rizwan et al., “A critical review on effects, tolerance mechanisms and management of cadmium in vegetables,” *Chemosphere*, vol. 182, pp. 90–105, 2017. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2017.05.013>
- [21] P. C. Nagajyoti, K. D. Lee, and T. V. M. Sreekanth, “Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review,” *Environ. Chem. Lett.*, vol. 8, no. 3, pp. 199–216, 2010. <https://doi.org/10.1007/S10311-010-0297-8>
- [22] S. Clemens, “Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants,” *Biochimie*, vol. 88, no. 11, pp. 1707–1719, 2006. <https://doi.org/10.1016/J.BIOCHI.2006.07.003>
- [23] A. Hussain et al., “Morphological and Physiological Responses of Plants to Cadmium Toxicity,” in *Cadmium Toxicity and Tolerance in Plants: From Physiology to Remediation*, M. Hasanuzzaman, M. N. V. Prasad, and M. B. Fujita, Eds., Elsevier, pp. 47–72, 2019. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814864-8.00003-6>
- [24] P. Singh, S. K. Singh, and S. M. Prasad, “Cadmium: A Threatening Agent for Plants,” in *Plant Responses to Soil Pollution*, Springer Singapore, pp. 76–105, 2020. <https://doi.org/10.1007/978-981-15-4964-9/COVER>
- [25] G. et al., “El color como indicador de contaminación por metales pesados en suelos de la Ciudad de México,” *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, vol. 73, no. 1, pp. 1–13, 2021. <https://doi.org/10.18268/BSGM2021v73n1a210920>
- [26] I. I. Ebralidze et al., “Colorimetric Sensors and Sensor Arrays,” in *Nanomaterials Design for Sensing Applications*, pp. 1–39, 2019. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814505-0.00001-1>

- [27] H. Wang et al., "Colorimetric fluorescent paper strip with smartphone platform for quantitative detection of cadmium ions in real samples," *J Hazard Mater*, vol. 392, p. 122506, 2020. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2020.122506>
- [28] F. Cabrera-Torres, M. Farjas-Abadía, and J. G. Rejas-Ayuga, "Espectrometría de imagen para el estudio y caracterización de la contaminación por metales pesados," in *Proceedings 3rd Congress in Geomatics Engineering*, 2021. <https://doi.org/10.4995/CIGEO2021.2021.12726>.
- [29] M. C. Rivera and E. R. Wright, *Apuntes de patología vegetal - Fundamentos y prácticas para la salud de las plantas*, Buenos Aires, 2020.

## EVALUACIÓN TÉCNICA Y ENERGÉTICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES EN SOGAMOSO–BOYACÁ, COLOMBIA

### Technical and energy evaluation of municipal solid waste in Sogamoso–Boyacá-Colombia

Ariam Lozano Pérez<sup>1</sup>, Javier Chaparro Barajas<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá, Colombia. <sup>2</sup>Instituto Ciencia de los Materiales de Sevilla (CSIC-US), España. Email: [javchabar@alum.us.es](mailto:javchabar@alum.us.es)

(Recibido 31 de Octubre de 2023 y aceptado 05 de Diciembre de 2023)

#### Resumen

Los residuos sólidos municipales (MSW) por sus siglas en inglés, son aquellos residuos generados por la población en las ciudades, producto de las actividades residenciales, institucionales y comerciales en cada municipio, los cuales se consideran basura y son llevados a un relleno sanitario para su disposición final. Su composición es diversa, residuos orgánicos, inorgánicos, microorganismos entre otros. Los residuos con composición inorgánica, en su mayoría cuentan con propiedades energéticas medidas a través de su capacidad calorífica, esta propiedad es de gran importancia para aprovecharla en procesos Waste to Energy (WTE). En Colombia aún no existe un caso exitoso de implementación de tecnologías de conversión energética de residuos y la viabilidad dependerá del contexto regional además de las particularidades del mercado. El presente trabajo muestra un caso de estudio específico por medio de una evaluación técnica del potencial aprovechamiento como fuente de energía de los MSW recibidos en el relleno sanitario Terrazas del Porvenir del municipio de Sogamoso. Los resultados mostraron que la recuperación de solo el 42.3% de estos residuos tiene un potencial energético aproximado de 628 TJ\*año<sup>-1</sup>, lo cual contribuye a la oferta en la demanda energética de las industrias de la región y la posible sustitución de combustibles fósiles como carbón, además del aporte positivo en la disminución del impacto ambiental y al aumento en 5 años de la vida útil del relleno sanitario ubicado en el municipio de Sogamoso.

**Palabras clave:** *energía, residuos sólidos municipales, Sogamoso, waste to energy.*

#### Abstract

Municipal solid waste (MSW) is the waste generated by the city population, a product of residential, institutional, and commercial activities in each municipality. It is considered garbage and is taken to a landfill for its final disposition. Its composition is diverse, organic and inorganic waste, microorganisms among others. Waste with inorganic composition mostly has energy properties measured through its heat capacity; this property is of great importance to be used in Waste to Energy (WTE) processes. In Colombia there is still no successful case of implementation of waste-to-energy conversion technologies and feasibility will depend on the regional context in addition to the particularities of the market. This work shows a specific case study through a technical evaluation of the potential use as an energy source of the MSW received in the Terrazas del Porvenir landfill in Sogamoso. The results showed that the recovery of only 42.3% of this waste has an approximate energy potential of 628 TJ\*year<sup>-1</sup>, which contributes to the supply of energy demand in the region's industries and the possible substitution of fossil fuels such as coal, in addition to the positive contribution to reducing the environmental impact and increasing the useful life of the landfill located in Sogamoso by 5 years.

**Key words:** *energy, municipal solid waste, Sogamoso, waste to energy.*

## 1. INTRODUCCIÓN

La correcta gestión de los residuos sólidos municipales MSW por sus siglas en inglés (Municipal Solid Waste) cada día toma mayor importancia en municipios y ciudades, factores como el crecimiento demográfico, económico y la demanda de energía que son indicadores desarrollo económico y progreso social contribuyen a aumentar la generación de estos residuos, por lo tanto, garantizar un aprovechamiento de estos, dentro del marco de la economía circular es una prioridad actual para los gobernantes [1].

Una nueva fuente de energía denominada Waste to energy (WtE) que proviene de MSW ha sido utilizada alrededor del mundo en diferentes países para la generación de calor y electricidad, a partir del aprovechamiento térmico de los residuos dependiendo de factores como sus características fisicoquímicas, su capacidad calorífica y la cantidad disponible. En el caso de China Zhan y colaboradores describen todo un panorama de los beneficios económicos, sociales y ambientales de poner en práctica este tipo de iniciativas de nuevas fuentes generación de energía [2].

Por otra parte, un estudio realizado en Grecia ha descrito como la inversión de diferentes tecnologías WtE podrían ayudar al crecimiento económico generado por la creación de empleo, la preservación de extensiones de tierra y claramente las reducciones de impactos ambientales negativos [3]. Ahora bien, dentro de las tecnologías WtE se destaca la conversión a energía eléctrica que se puede generar mediante procesos de incineración [4], digestión anaerobia [5], gasificación [6], aunque cada proceso está ligado a la ejecución de tecnologías ya existentes [7, 8].

En el contexto nacional, Colombia cuenta con una generación aproximada de 11 millones de toneladas de residuos sólidos que son dispuestos en rellenos sanitarios al año, la generación promedio de residuos por persona diaria se estima en 0,76 Kg [9], de los cuales entre un 35% a 45% corresponde a plástico, papel, madera y empaques, materiales que tienen propiedades fisicoquímicas

aprovechables y en presencia de oxígeno pueden generar energía en forma de calor. En la zona central del país, que corresponde al altiplano Cundiboyacense, se localiza el municipio de Sogamoso que se encuentra rodeado de una zona de alta actividad industrial, su influencia con industrias como la siderúrgica, cementera, generación de energía eléctrica, agrícola y minera, hacen que sea un municipio con alta demanda energética y dependiente del mercado de materias primas para obtener dicha energía.

El municipio de Sogamoso cuenta con una población en la cabecera municipal de 111.799 habitantes según el último censo realizado por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) [10] y se espera un crecimiento para los próximos 15 años de 13,70% de su población, esto indica que en el año 2035 podría tener una población de 127.115 habitantes aproximadamente, principalmente en la cabecera municipal el cual corresponde al 90% de la población. Teniendo en cuenta esta proyección es posible concluir que el aumento de residuos sólidos tendrá un aumento en similar proporción.

Los residuos sólidos municipales (MSW), han sido estudiados como fuentes de energía [7]. La figura 1, describe algunos procesos con los cuales se puede obtener diferentes tipos de energía. Cabe resaltar que estos procesos también requieren etapas de segregación, clasificado y preprocesamiento de los MSW como materia prima para su conversión en energía; cada una de estas etapas debe evaluarse y definirse de acuerdo con la caracterización de los residuos que va a depender de su origen, características fisicoquímicas, características de aprovechamiento y proceso de transformación energética.

La generación de residuos en los centros urbanos está correlacionada a variables como aumento de la población, aumento de la producción industrial, aumento del consumo de bienes y servicio; es por lo que, dentro del enfoque de desarrollo sostenible, el correcto manejo y administración de los MSW es un nuevo paradigma para las administraciones [11]. Analizar la sinergia entre la recolección y adecuada disposición de los MSW,

como la adopción de tecnologías WtE representa un proceso de ganancia, contribuyendo al problema de disposición adecuada de los residuos municipales y aumentando la disponibilidad de energía, lo cual toma relevancia mayoritaria en los lugares con dificultad al acceso de energía. Actualmente las tecnologías WtE han sido desarrolladas y pueden ser adaptadas dependiendo de factores económicos y ambientales [12]. El material combustible producido mediante la transformación de los residuos sólidos municipales por pretratamientos es referido en la literatura como RDF de las siglas en inglés de Refuse-Derive Fuel [13].

El presente trabajo muestra el caso de estudio específico del aprovechamiento energético de MSW dispuestos en el relleno sanitario Terrazas del Porvenir del municipio de Sogamoso mediante tecnologías Waste to Energy en donde se realizó la evaluación técnica y energética de 1 proceso RDF como equivalente térmico del carbón y tres (3) tecnologías de conversión a energía eléctrica: incineración, gasificación y digestión anaeróbica. Este análisis se realizó teniendo en cuenta las variables específicas de cantidades y sus equivalentes energéticos por medio de la relación del poder calorífico propio de cada tipo de residuo aprovechable.



Figura 1. Opciones tecnológicas WtE [8].

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Contexto regional y geográfico

El municipio de Sogamoso se ubica en la provincia de Sugamuxi en el departamento de Boyacá, con una extensión geográfica de 208 km<sup>2</sup> y una población aproximada de 111.799 habitantes [10]. Limita con los municipios de Nobsa, Tópaga, Mongua, Monguío, Aquitania, Cuitiva, Iza, Firavitoba, Tibasosa y es el segundo municipio del departamento con más habitantes luego Tunja capital del departamento. Este municipio está ubicado en una zona industrial del departamento, con presencia de empresas siderúrgicas como Acerías Paz del Río y Sidenal; empresas cementeras como Cemento Argos, Cementos Holcim, Cementos del Oriente, Cementos Nacional; empresas generadoras de energía eléctrica por medio de procesos térmicos como Sochagota y Gensa, además

de empresas alfareras de producción de materiales de construcción, cada una de estas industrias utilizan carbón como materia prima.

En el departamento de Boyacá se estima una generación diaria de MSW de 480 t\*día<sup>-1</sup> [14] para lo cual existen dos (2) rellenos sanitarios principales, el relleno sanitario Pírgua ubicado en Tunja y el relleno sanitario Terrazas del Porvenir ubicado en Sogamoso. Para el objeto del presente trabajo se tomará en consideración el volumen de residuos que son ingresados al relleno sanitario Terrazas del Porvenir por estar ubicado en el municipio de Sogamoso.

El relleno sanitario terrazas del porvenir está ubicado en una zona rural al nororiente del municipio de Sogamoso. Es el segundo de mayor capacidad y se estima que

en la actualidad atiende el 36% de los residuos del departamento de Boyacá, atendiendo a 44 municipios de los 123 municipios del departamento, lo que representa una población alrededor de 2 veces la población de Sogamoso y una disposición de 50000 a 60000 ton\*año<sup>-1</sup>. Los volúmenes de recepción durante el periodo de 2016 al 2020 se muestran en la figura 2, la línea indica el volumen total de MSW y las barras corresponden al volumen correspondiente únicamente al municipio de Sogamoso, se observa que para el 2018 el relleno gestionó únicamente residuos del municipio de Sogamoso como consecuencias de la pérdida de capacidad. A partir del año

2019 luego de un aumento de la capacidad por ampliación se retoma la recepción de otros municipios. Sin tener en cuenta el 2018, el promedio de recepción de MSW entre los años 2016 a 2020 fue de 57343 ton\*año<sup>-1</sup>. En el plan de manejo integral de residuos sólidos del municipio de Sogamoso [15] se realiza la caracterización por fracciones de los residuos recibidos en el relleno sanitario Terrazas del Porvenir. La figura 3, describe la tipología de residuos, la fracción con mayor cantidad es la orgánica con un 33.4% y los residuos con potencial de generación de energía son: plásticos, textiles, papel, cartón y madera que son los considerados para este estudio.

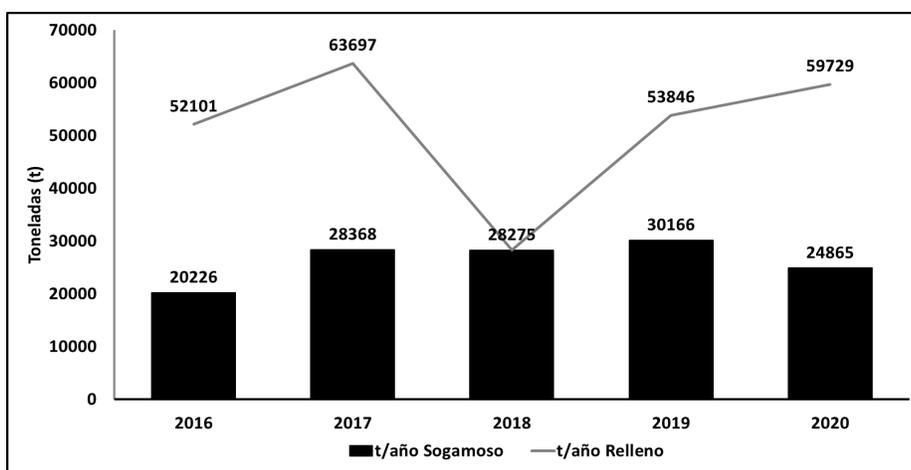


Figura 2. Volúmenes de residuos gestionados en el relleno terrazas del porvenir [14].

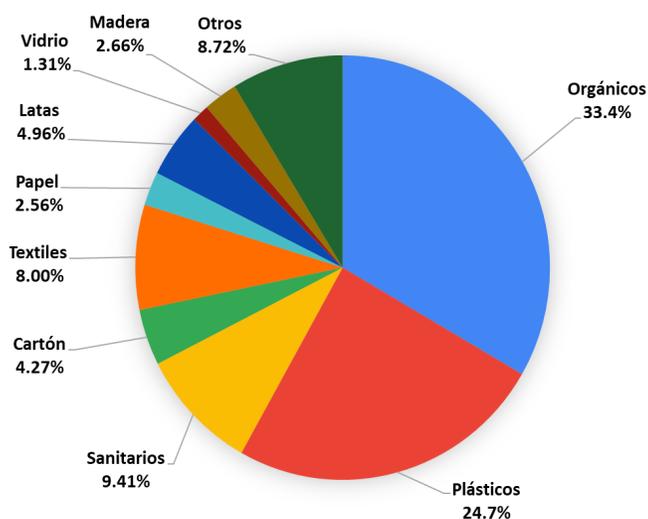


Figura 3. Caracterización promedio residuos sólidos municipales Sogamoso [14].

## 2.2 Potencial de conversión de MSW a energía térmica

El proceso de conversión térmica de los residuos parte de la preparación de un combustible derivado de residuos mediante la segregación, separación, trituración, secado de los residuos sólidos municipales, la fracción aprovechable tiene propiedades térmicas que dependerá de la humedad, composición de los distintos materiales y estado físico [16]. Es posible realizar una comparación del estimado de energía a través del potencial térmico y su equivalente en combustible fósil en este caso carbón con el modelo mostrado en las ecuaciones (1) y (2).

$$TP = LCV_{MSW} * M_{MSW} \quad (1)$$

$$Carbon_{equiv} = \frac{LCV_{MSW}}{LCV_{coal}} * M_{MSW} \quad (2)$$

La ecuación (1) muestra el potencial térmico TP por sus siglas en inglés (Thermal potencial), el cual es posible calcular por producto del poder calorífico más bajo LCVMSW por sus siglas en inglés (Low Calorific Value) el cual corresponde al poder calorífico más bajo luego de descontar la energía de vaporización del agua como humedad y producida durante el proceso de combustión y la masa total de residuos MMSW el resultado de esta operación da el valor de energía en unidades de calor GJ. Para este estudio, se realizó un estimado diario. La ecuación (2) muestra el equivalente de esa energía en unidades másicas de carbón para obtener un estimado de las toneladas de carbón, mediante la relación de los LCV de los residuos (tabla 1) y el carbón (28.3MJ\*Kg<sup>-1</sup>), y la masa total de MSW aprovechables.

**Tabla 1.** Modelos matemáticos de potencial conversión energía eléctrica proveniente de MSW.

Proceso	Modelo matemático
Incineración	$ERP_1 = 0.28 * \eta * M * LCV_{msv} \quad (3)$
Gasificación	$ERP_G = 0.28 * G * Rf * \eta * LCV_{msv} \quad (4)$
Digestión Anaeróbica	$ERP_{DA} = P * R_{AC} * f * M_{OFMSW} * Q * \eta \quad (5)$

## 2.3 Potencial de conversión de MSW a energía eléctrica

Uno de los usos más importantes de los combustibles es su conversión en energía eléctrica, que puede estimarse

mediante modelos matemáticos reportados en literatura [17]. En la tabla 1, se muestran tres de estos modelos para el cálculo del potencial de energía eléctrica para cada uno de los procesos planteados.

En las ecuaciones (3) (4) y (5), EPR (Electrical Power Recovery) es el potencial de energía recuperada (MWh\*día<sup>-1</sup>), M es la masa total de residuos sólidos (t\*día<sup>-1</sup>) y LCVMSW representa el valor de capacidad calorífica más baja de la fracción aprovechable (MJ\*kg<sup>-1</sup>), además la eficiencia del proceso de incineración  $\eta$  es 18% [17]. Para el proceso de gasificación, G es el número de toneladas procesadas por día (t\*día<sup>-1</sup>) y Rf es el porcentaje de rechazo después del tratamiento mecánico y la eficiencia del proceso de gasificación  $\eta$  es 23% [18].

Para el caso de la digestión anaerobia, P hace referencia al número de habitante, RAC es la producción anual de MSW per cápita (t\*hab-dia<sup>-1</sup>), f es la fracción orgánica de los MSW, MOFSW la producción de metano generado por la fracción orgánica (67.5 Nm<sup>3</sup>\*t<sup>-1</sup>) y Q es el LCV del biogás debido al metano (37.2MJ\*Nm); y  $\eta$  en este caso es 26% [19]. Finalmente, cabe destacar que los valores obtenidos son una estimación del potencial de generación de energía que dependerá de cada contexto y de cada uno de los pretratamientos asociados a cada uno de ellos.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Valores de capacidad calorífica de la fracción de residuos térmicamente aprovechable

Se realizó un estimado de la capacidad calorífica de los residuos térmicamente aprovechables gestionados en el relleno sanitario terrazas del porvenir. La tabla 2 refiere la composición normalizada de la fracción energéticamente aprovechable que se puede obtener de los MSW descritos en la figura 3, junto con sus valores calóricos correspondientes [20]. El LCV ponderado de los residuos aprovechables es de 25.9 MJ\*kg<sup>-1</sup>, que equivale al 42.3% del total de MSW promedio recibidos en el relleno sanitario Terrazas del Porvenir.

### 3.2 Potencial de conversión a energía eléctrica

Un estimado del potencial de generación de energía eléctrica en base a un promedio diario de 157 toneladas de MSW o equivalentes a 66.4 toneladas de MSW aprovechables energéticamente caracterizados y presentados en la figura 3 se describen a continuación en la tabla 3.

**Tabla 2.** Composición ponderada de MSW aprovechables y sus correspondientes LCV.

Tipo de MSW	Ponderado	LCV <sub>MSW</sub> (MJ*kg <sup>-1</sup> )
Plásticos	58.0%	32.4
Cartón	10.0%	15.6
Textiles	19.0%	18.4
Papel	6.00%	15.6
Madera	7.00%	15.4
Total	100%	25.9

**Tabla 3.** Equivalente en energía eléctrica de 3 procesos de conversión.

Proceso	MWh*día <sup>-1</sup>
Incineración	86.1
Gasificación	79.6
Digestión Anaeróbica	9.59

La tecnología de mayor potencial de generación de energía eléctrica es la incineración ya que incluye el 100% de los MSW aprovechables en comparación con la gasificación donde influye el factor de rechazo teórico después de un procesamiento mecánico y solo el 72.5% de los MSW aprovechables se tienen en cuenta para el proceso [18] sin embargo la diferencia entre los dos procesos es solo de 6.5 MWh\*día<sup>-1</sup>. Por otra parte, un proceso de digestión anaerobia tiene poco potencial de generación de energía eléctrica ya que en comparación con el proceso de incineración la cantidad de energía decae alrededor de una décima parte de este, esto es de esperar ya que la fracción orgánica que es la única utilizada en este proceso y solo corresponde a un 33% del total de MSW.

Analizando el contexto energético de la región, se considera que existe una limitante de mercado debido a la competencia de generación eléctrica de procesos térmicos tradicionales muy cercanos, los cuales tienen

un costo de generación bajos. La demanda energética diaria del departamento de Boyacá se estima en 4.79 GWh\*día<sup>-1</sup> de acuerdo con la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) [21], con lo que el potencial en el proceso de incineración representaría tan solo el 1.8% y debido a los mayores costos de producción no generaría una viabilidad en el corto plazo.

### 3.3 Estimación energía recuperada vs combustible fósil

Utilizando la ecuación (1) y (2) se obtuvo un estimado del potencial de energía térmica y su equivalente en carbón térmico de la fracción energéticamente aprovechable de los MSW. Los valores descritos en la tabla 4 muestran el equivalente térmico diario de 1721 GJ\*día<sup>-1</sup> que equivale a 60.8 t\*día<sup>-1</sup> de carbón que se podría sustituir, esto quiere decir que si se hace un estimado económico tomando como base un precio de la tonelada de carbón promedio de 165000 COP [21] se tendría un valor de mercado potencial de alrededor de 10 millones COP diarios, que sin duda para cualquier industria sería un beneficio, si pudiera reducir sus costos de producción al sustituir el carbón por el uso de RDF.

**Tabla 4.** Equivalencia térmica en energía y volumen de combustible.

Proceso	Equivalente térmico	Equivalente carbón
Producción combustible derivado de residuos	1721 GJ*día <sup>-1</sup>	60.8 t*día <sup>-1</sup>

Sin embargo, la transformación de los residuos a energía en forma de calor dependerá de la preparación del RDF que deberá cumplir los requerimientos técnicos de un producto competitivo al combustible fósil normalmente utilizado en la región (carbón, gas natural, gasolina o petróleo), además de cumplir con características específicas para cada proceso industrial donde se utilice.

Lo anteriormente descrito, supone un desafío en la viabilidad económica del uso de RDF, pero a su vez establece una oportunidad para que nuevas empresas realicen y tecnifiquen el sistema de producción y distribución de RDF a partir de los MSW aprovechables dispuestos en el relleno sanitario Terrazas del porvenir. Además, la región cuenta ya con

un mercado potencial, que corresponde a algunas de las empresas cementeras que disponen de un sistema de co-procesamiento de residuos y permite el uso del RDF que claramente proporciona beneficios económicos y ambientales por la sustitución térmica del carbón, dadas las 4 empresas cementeras que funcionan cerca al municipio de Sogamoso, existe un buen potencial de demanda de RDF en el sector.

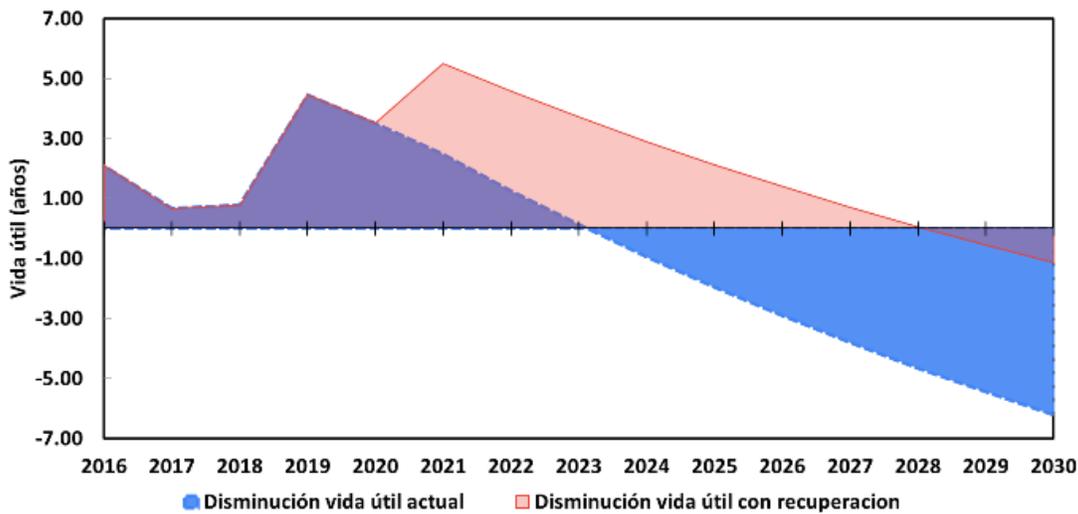
Cabe destacar que la implementación de tecnologías waste to energy promueve la utilización de fuentes de energía no convencionales, reduciendo en gran medida los impactos ambientales negativos, así, estos procesos están directamente relacionados con los objetivos de desarrollo sostenible, economía circular y política verde que en el país brinda beneficios tributarios por medio de la ley 1715 de 2014 [22], lo cual genera un mayor beneficio económico a las empresas que promuevan este tipo de procesos.

permisos. Representando menores gastos operativos por la no realización de obras civiles, modificación de suelos o inversiones en capacidad sin aprovechamiento de los residuos sólidos municipales.

### 3.4 Cambio en la vida útil del relleno sanitario

Uno de los beneficios de mayor relevancia en la recuperación de residuos sólidos es el aumento de la vida útil del relleno sanitario Terrazas del Porvenir, para el año 2020 contaba con un volumen de capacidad remanente de 223600 m<sup>3</sup>, teniendo en cuenta un índice de compactación de 0,94 t\*m<sup>-3</sup>, tendría una capacidad másica de 210184 toneladas. Con un aumento del 6% en los siguientes años y a la vez proyectar un descenso de la vida útil en los siguientes años, la figura 4 muestra esa proyección, la línea punteada indica una disminución en la que se estima una vida útil de 3.52 años.

**Figura 4.** Proyección vida útil del relleno actual y con recuperación de residuos.



El cambio en la vida útil luego de la implementación de un proceso WastetoEnergy que reduce la cantidad de residuos dispuestos en el relleno en un 42.3% correspondiente a la fracción aprovechable energéticamente, podemos observar en la figura 4 un aumento de la vida útil de 5 años. Estas proyecciones son de gran interés ya que indican un aumento de capacidad sin realizar procesos de ampliación de terrazas, adquisición de predios,

## 4. CONCLUSIONES

El presente trabajo mostró la viabilidad técnica de un proyecto de recuperación energética para la implementación de tecnologías WtE en el relleno sanitario Terrazas del Porvenir del municipio de Sogamoso. El potencial de energía eléctrica no es relevante por el mercado energético de la región, sin embargo, el potencial de energía térmica

equivalente al carbón podría tener una gran demanda de en industrias que manejen este material como generador de energía en sus procesos, casos como las 4 cementarías distribuidas alrededor del municipio de Sogamoso.

La cantidad de residuos que tienen potencial energético de por medio de la generación de RDF en el relleno sanitario del municipio de Sogamoso es del orden de aproximadamente 20000 toneladas que equivale aproximadamente a 628 TJ\* $\text{año}^{-1}$  y puede aumentar hasta 42000 toneladas anuales si se tiene en cuenta la fracción orgánica. El uso de esta fracción aprovechable de MSW representa, el aumento de la vida útil del relleno sanitario y la generación de posibles empresas que traten y distribuyan estos residuos en forma de RDF.

Los beneficios ambientales y tributarios al aprovechar los MSW representan un atractivo económico tanto para el relleno sanitario Terrazas del porvenir como para las industrias presentes alrededor del municipio de Sogamoso que utilicen nuevas fuentes energéticas como RDF. Así los resultados descritos en este estudio son la base para continuar con las evaluaciones económicas y ambientales correspondientes a la implementación de escenarios con uno o varios procesos WtE.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al programa Maestría en Administración de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia- UPTC, facultad seccional Sogamoso.

### CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses o relaciones personales que podrían haber parecido influir el trabajo reportado en este manuscrito.

### REFERENCIAS

- [1] M. M. Siddiqi et al., "Evaluation of Municipal Solid Wastes Based Energy Potential in Urban Pakistan," *Processes*, vol. 7, no. 11, p. 848, 2019. <https://doi.org/10.3390/pr7110848>
- [2] D. Zhang, G. Huang, Y. Xu, and Q. Gong, "Waste-to-energy in China: Key challenges and opportunities," *Energies*, vol. 8, no. 12, 2015. <https://doi.org/10.3390/en81212422>
- [3] C. S. Psomopoulos and N. J. Themelis, "A guidebook for sustainable waste management in Latin America," in *Proceedings of the International Resource Recovery Congress Waste-to-Energy*, Vienna, Austria, 2014, pp. 8–9.
- [4] C. Ofori-Boateng, K. T. Lee, and M. Mensah, "The prospects of electricity generation from municipal solid waste (MSW) in Ghana: A better waste management option," *Fuel Processing Technology*, vol. 110, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.11.008>
- [5] R. Kothari et al., "Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy: An overview," in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 39. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.011>
- [6] F. C. Luz et al., "Techno-economic analysis of municipal solid waste gasification for electricity generation in Brazil," *Energy Conversion and Management*, vol. 103, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.074>
- [7] S. Nanda and F. Berruti, "A technical review of bioenergy and resource recovery from municipal solid waste," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 403, p. 123970, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123970>
- [8] C. Cui et al., "Overview of public-private partnerships in the waste-to-energy incineration industry in China: Status, opportunities, and challenges," *Energy Strategy Reviews*, vol. 32, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100584>
- [9] S. Kaza et al., "What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050," *World Bank Publications*, 2018.
- [10] DANE, "Resultados y proyecciones (2005-2020) del censo DANE,".
- [11] A. P. Rodrigues et al., "Developing criteria for performance assessment in municipal solid waste management," *Journal of Cleaner Production*, vol. 186, pp. 748–757, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.067>

- [12] S. T. Tan et al., “Energy, economic and environmental (3E) analysis of waste-to-energy (WTE) strategies for municipal solid waste (MSW) management in Malaysia,” *Energy Conversion and Management*, vol. 102, pp. 111–120, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.02.010>
- [13] E. C. Rada and G. Andreottola, “RDF/SRF: Which perspective for its future in the EU,” *Waste Management*, vol. 32, no. 6, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.02.017>
- [14] C. O. L. Superservicios, “Disposición final de residuos sólidos Informe Nacional 2018,” A. C. M. Ruiz, A. F. L. Sánchez, and C. A. B. Garzón, Eds., Superservicios, 2019.
- [15] S. de D. y. A. Municipio de Sogamoso, “Plan integral de manejo de residuos sólidos en el municipio de Sogamoso (PGIRS),” Sogamoso, 2015.
- [16] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), “Waste-to-Energy Options in Municipal Solid Waste Management. A Guide for Decision Makers in Developing and Emerging Countries,” 2017.
- [17] S. Alzate, B. Restrepo-Cuestas, and Á. Jaramillo-Duque, “Municipal Solid Waste as a Source of Electric Power Generation in Colombia: A Techno-Economic Evaluation under Different Scenarios,” *Resources*, vol. 8, no. 1, p. 51, 2019. <https://doi.org/10.3390/resources8010051>
- [18] J. M. Fernández-González et al., “Economic and environmental review of Waste-to-Energy systems for municipal solid waste management in medium and small municipalities,” *Waste Management*, vol. 67, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.003>
- [19] A. Gómez et al., “Potential and cost of electricity generation from human and animal waste in Spain,” *Renewable Energy*, vol. 35, no. 2, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.07.027>
- [20] C. S. Psomopoulos, I. Venetis, and N. J. Themelis, “The impact from the implementation of ‘Waste to Energy’ to the economy. A macroeconomic approach for the trade balance of Greece,” *Fresenius Environmental Bulletin*, vol. 23, no. 11, 2014.
- [21] Unidad de Planeación Minero-Energética – UPME, “Resolución No. 000235 de 2020.”
- [22] Congreso de Colombia, “Ley 1715 de 2014, Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional,” 13 de mayo de 2014, D.O 49150.

## MODELO SEDIMENTARIO-DEPOSICIONAL DE LA FORMACIÓN GIRÓN EN LA SECCIÓN DEL KM 42 VÍA GIRÓN-ZAPATOCA, SANTANDER, COLOMBIA

### Sedimentary-depositional model of the Girón Formation in the section of km 42 road Girón-Zapatoca, Santander, Colombia

Diego Fernando Jaramillo Minorta<sup>1</sup>, Keila José Barba Gonzales<sup>1</sup>, Elías Ernesto Rojas Martínez<sup>1</sup>, Jenny García González<sup>1</sup>, Dino Carmelo Manco Jaraba<sup>2</sup>, Frank David Lascarro Navarro<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Fundación Universitaria del Área Andina, Colombia. <sup>2</sup>Universidad de La Guajira, Colombia. <sup>3</sup>Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú. Email: [dcmancoj@uniguajira.edu.co](mailto:dcmancoj@uniguajira.edu.co)

(Recibido 27 de Junio de 2023 y aceptado 08 de Diciembre de 2023)

#### Resumen

La formación Girón de edad Jurásico Superior se extiende al oeste del Macizo de Santander y está compuesta por tres intervalos: arenítico inferior (JGai), lodolítico inferior (JGli) y arenítico superior (JGas). En esta investigación se exhibe nueva información petrográfica, sedimentológica, estratigráfica y geoquímica de las rocas que componen el intervalo superior de la Formación Girón expuestas en el Km 42 vía Girón-Zapatoca, buscando determinar su modelo sedimentario-deposicional, y procedencia. Los resultados indican que este perfil de 74,27 m de espesor es una sucesión de conglomerados, areniscas, areniscas conglomeráticas y limolitas provenientes de gneises de bajo grado metamórfico de un margen continental activo y de orógeno reciclado. Se presentan nueve tipos de litofacies (Gmm, Gcm, Sgm, Sgi, Sm, Sr, Sh, Fsm y Fl) que asociadas se organizan en cinco elementos arquitectónicos distintos: llanura de inundación, canal, flujos areno-gravosos, point bar y canal con acreción lateral; su relación entre sí demuestran que la Formación Girón en la zona de estudio conserva en su base un registro de un sistema meandriforme de moderada sinuosidad de energía moderadamente alta con predominio de las litofacies de limolitas que sugieren episodios de inundaciones extremas en un entorno lodozal que le otorgó su coloración amarillo grisáceo; mientras que el sector medio y superior del perfil sugiere un sistema trenzado de intermedia sinuosidad con parámetro de trenzado intermedio dominado por cuerpos de point bar y canal con acreción lateral, en el que los elementos de llanura de inundación presentan una coloración rojiza atribuida por un clima con precipitaciones abundantes, aguas activas y ricas en oxígeno.

**Palabras clave:** estructuras sedimentarias, formación Girón, jurásico superior, procedencia.

#### Abstract

The Upper Jurassic Giron Formation extends to the west of the Santander Massif and is composed of three intervals: lower sandy (JGai), lower mudstone (JGli) and upper sandstone (JGas). This research presents new petrographic, sedimentological, stratigraphic, and geochemical information of the rocks that compose the upper interval of the Girón Formation exposed at Km 42 road to Giron-Zapatoca, seeking to determine its sedimentary-depositional model, and origin. The results indicate that this 74.27 m thick profile is a succession of conglomerates, sandstones, conglomeratic sandstones, and siltstones from low metamorphic grade gneisses of an active continental margin and recycled orogen. Nine lithofacies types (Gmm, Gcm, Sgm, Sgi, Sm, Sr, Sh, Fsm and Fl) are presented and associated are organized into five distinct architectural elements: floodplain, channel, sandy-gravelly flows, point bar and channel with lateral accretion; their relationship with each other show that the Giron Formation in the study area preserves at its base a record of a moderately sinuous meandering meandering system of moderately high energy with predominance of siltstone lithofacies suggesting extreme flood episodes in a muddy environment that gave it its grayish-yellow coloration; while the middle and upper sector of the profile suggests a braided system of intermediate sinuosity with intermediate braiding parameter dominated by point bar and channel bodies with lateral accretion, in which the floodplain elements present a reddish coloration attributed by a climate with abundant rainfall, active and oxygen-rich waters.

**Key words:** sedimentary structures, Giron formation, upper Jurassic, provenance.

## 1. INTRODUCCIÓN

La formación Girón está constituida por rocas sedimentarias de edad Jurásico y aflora en el flanco oeste de la Cordillera Oriental, sobre el Macizo de Santander [1], [2]. El Levantamiento de la Cordillera Oriental es originado a partir de una zona extensiva cuyos flancos se transportan tectónicamente hacia las cuencas que lo bordean (Valle del Magdalena al oeste y Cuenca de los Llanos al este) compuesto esencialmente por potentes secuencias sedimentarias Meso-Cenozoicas depositadas sobre basamentos ígneo-metamórficos Paleo-Mesozoicos [3], debido a la interacción compleja de la placa Sudamericana, Caribe y Nazca [4] y el Bloque Chocó [5], [6].

La génesis de la Formación Girón es asociada a ambientes sedimentarios fluviales de llanuras de inundación bien marcadas, terrazas fluviales y flujos de detritos representados por capas de conglomerados y capas de areniscas conglomeráticas [7]. Y hace parte del Grupo Girón, el cual se puede dividir en la Formación Girón de edad Triásica-Jurásica y la Formación Los Santos que cubre concordantemente a la primera, probablemente pertenece al Berriasiano [8]. El Grupo Girón representan la transición de depósitos synrift representada en la Formación Río Lebrija y Capas Rojas de los Yarigués, a postrift representada en la Formación Los Santos [9].

Por otro lado [10], en análisis de procedencia realizados en la Formación Girón como en los miembros siliciclásticos de la Formación Tibasosa, muestran una fuente relacionada a basamento ígneo y metamórfico cercano (Esquistos y Filitas de Busbanzá; Stock de Chuscales y Stock de Otengá), y con la cobertera sedimentaria Paleozoica (Formaciones El Tíbet, Floresta y Cucho). Adicionalmente, menciona que los líticos ígneos desvitrificados encontrados en estas formaciones podrían estar relacionados con las Riolitas de Onzaga o con la Formación Nogontova.

Aunque la geología regional del área está relativamente bien documentada, sin embargo, siguen faltando estudios sobre la sedimentología, estratigrafía y geoquímica de la Formación Girón en el sector del Km 42 comprendido entre los municipios

de Girón-Zapatoca que permita dilucidar importantes cuestionamientos como su procedencia y modelo sedimentario-deposicional en este sector. Por consiguiente, el análisis detallado de las características texturales, composicionales y geoquímicas de las rocas de la Formación Girón son una herramienta útil para obtener una mejor comprensión del entorno sedimentario y sus procesos evolutivos.

### 1.1 Localización

El área de estudio se encuentra en el área municipal de Zapatoca, departamento de Santander. Al Este del Río Sogamoso, aproximadamente en el km 42 al sur de Girón, sobre la vía al municipio de Zapatoca. Este afloramiento se extiende aproximadamente 185m a lo largo de la vía, con una altura cercana a los 45m. (Figura 1).

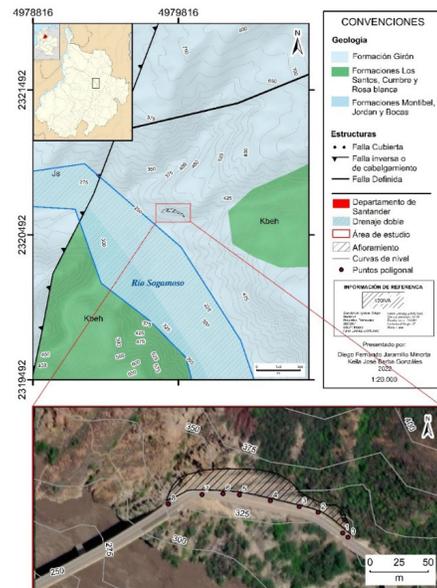


Figura 1. Localización del área de estudio.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó un muestreo probabilístico. Se extrajeron 28 especímenes de rocas seleccionadas con un peso aproximado de 500 gr, descritas macroscópicamente, cuatro muestras fueron analizadas por la técnica de Fluorescencia de Rayos X (FRX), y seis por medio de microscópica óptica (Tabla 1). Se excluyeron las muestras que presentaban alto grado de meteorización.

Además, se implementó un levantamiento de secciones estratigráficas, para la sección se midió un espesor total de 74,29 m, constituida por 75 estratos, considerando el mayor detalle posible (escala de 1:100), el proceso de muestreo se realizó principalmente en las capas de arenisca debido a que este tipo de litología es la utilizada en los estudios y análisis de procedencia de sedimentos, sin embargo, para el análisis facial completo de la unidad, se recolectaron muestras de conglomerados y limolitas.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Petrografía macroscópica

Las muestras son predominantemente areniscas (11 muestras, que corresponde al 39% de las muestras), 5 muestras de arenisca ligeramente conglomerática (18% de las muestras), 5 muestras de arenisca conglomerática (18% de las muestras), 5 muestras de limolita (18% de las muestras), 1 conglomerado arenoso (3,5% de las muestras), y 1 conglomerado arenoso 3,5% de las muestras) (Figura 2A y 2B).

**Tabla 1.** Resumen de las muestras y tipo de análisis realizado.

Muestras	Coordenadas		FRX	Presente estudio	
	Norte	Este		Petrografía microscópica	Petrografía macroscópica
KD(01)-M1/UB	1654616	1117738		X	X
KD(02)-M2/UD	1654531	1121294			X
KD (03)-M4/UF	1635974	1114921			X
KD(04)-M1/UH	1632720	1115596		X	X
KD(05)-M1/UI	1631042	1115791			X
KD(06)-M1/UJ	1682027	1145643		X	X
KD(07)-M1/UK	1694984	1148251			X
KD(08)-M1/UL	1681005	1144105			X
KD(09)-M2/UL	1701812	1148285		X	X
KD(10)-M3/UL	1701812	1148285		X	X
KD(11)-M1/UF	1694625	1147831		X	X
KD(12)-M2/UJ	1709417	1156113			X
KD(13)-M2/UF	1652853	1116457			X
KD(14)-M2/UH	1696644	1148433	X		X
KD(15)-M1/UG	1653658	1116236			X
KD (16)-M2/UB	1654617	1117739			X
KD(17)-M3/UH	1632729	1115597			X
KD(18)-M1/UA	1654516	1116736			X
KD (19)-M3/UJ	1682025	1145645			X
KD (20)-M5/UF	1694627	1147832			X
KD (21)-M3/UF	1694626	1147834	X		X
KD (22)-M2/UD	1654534	1121295	X		X
KD (23)-M4/UB	1654615	1117739	X		X
KD (24)-M3/UD	1694628	1147838			X
KD (25)-M3/UB	1654616	1117737			X
KD (26)-M4/UL	1681003	1148283			X
KD(27)-M2/UI	1631043	1115793			X
KD(28)-M4/UF	1696647	1148435			X

Las areniscas son principalmente subarcosas (8 muestras, que corresponde al 29% de las muestras) el 21% se clasificó como cuarzoarenitas (6 muestras), otro 18% como sublitanitas (5 muestras), 7% arcosas (2 muestras) y finalmente 7% conglomerados de cuarzo.

El 18% restante corresponde a limolitas (Figura 3A y 3B). En la Tabla 2 se muestran los porcentajes de grava, arena, limo, arcilla, y los porcentajes de cuarzo, feldespato y líticos de los especímenes para su clasificación textural y composicional, respectivamente, según [11, 13].

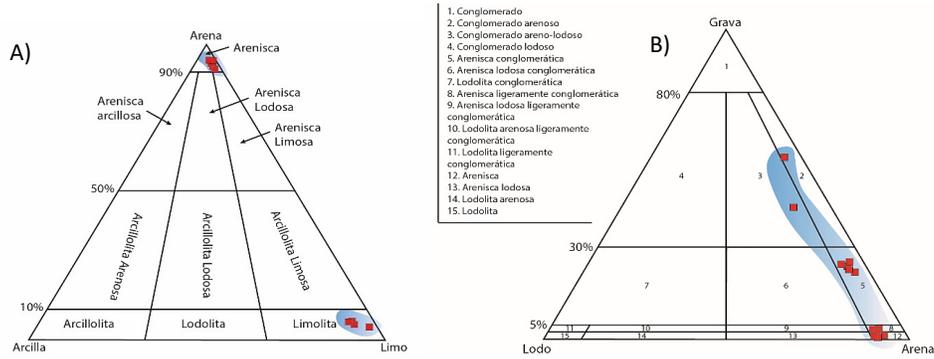


Figura 2. A) Clasificación textural para las muestras de grano tamaño fino de la Formación Girón. (modificado de Folk, 1974); B) Clasificación textural para las muestras de grano tamaño grueso de la Formación Girón.

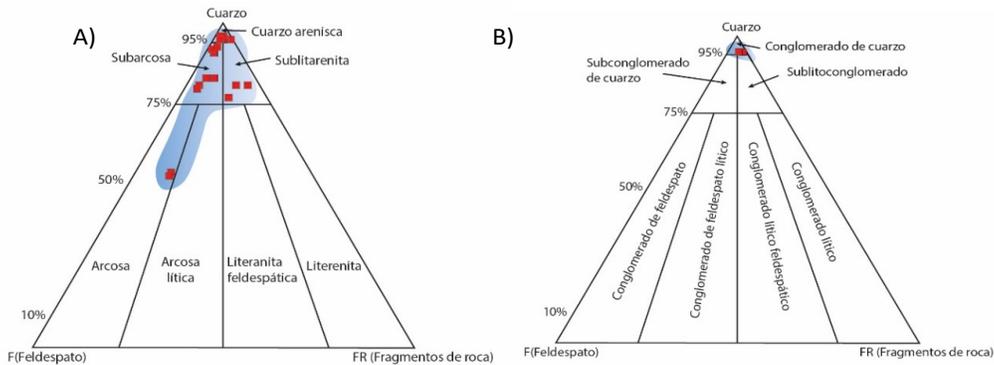


Figura 3. Clasificación composicional para las muestras de areniscas de la Formación Girón. A) diagrama triangular para la clasificación composicional de areniscas. B) el diagrama triangular para la clasificación composicional de conglomerados.

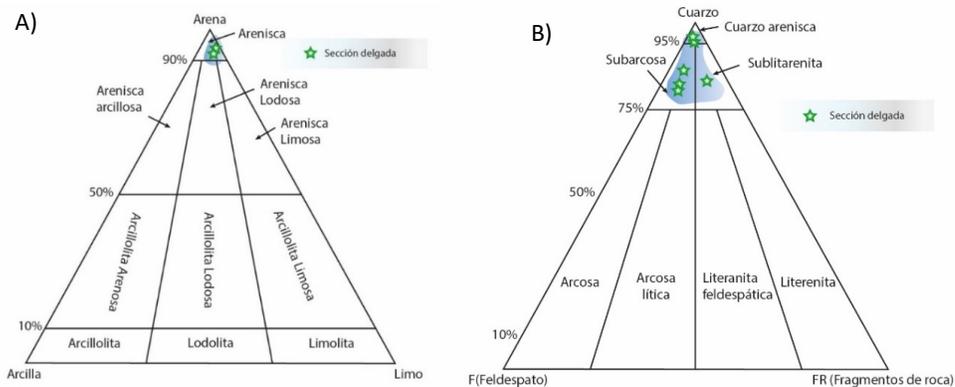


Figura 4. A) Diagrama triangular para la clasificación textural de areniscas en sección delgada [11]. B) Diagrama triangular para la clasificación composicional de areniscas en sección delgada [11].

### 3.2. Análisis microscópico

Las seis (6) secciones delgadas fueron clasificadas texturalmente según Folk [11] como: 4 areniscas, 1 arenisca ligeramente conglomerática y 1 arenisca conglomerática (Figura 4A) y composicionalmente según Folk [11] como: 3 subarcosa, 2 cuarzoarenita y 1 sublitarenita (Figura 4B). En general las subarcosas son granosoportadas, maduras texturalmente, moderadamente a bien empaquetadas, bien seleccionada con granos angulares, subangulares a subredondeados de baja a alta esfericidad, con gravas (2-4%), arenas (88-92%), limos y arcillas (6-8%), con un cemento silíceo del 5% al 6% que rodea los granos, algunas muestras con matriz arcillosa de color rojizo.

Texturalmente según Folk [11] es una arenisca y está constituida por cuarzo (71-84%), monocristalino con extinción ondulatoria (47-79%) y extinción recta (3-7%) y cuarzo policristalino (31-50%), algunos presentan inclusiones de moscovita. Los feldespatos (6-8%) y las plagioclasas (3-6%) presentan granos subangulares a angulares, algunos feldespatos están alterando a minerales arcillosos. Los fragmentos líticos (3-4%) se presentan en granos angulares, subangulares, subredondeados, y subesféricos. La moscovita (3-4%) se presenta en granos angulares a subangulares elongados en espacios intragranulares (Figura 5).

En general las sublitarenitas son granosoportadas, maduras, moderadamente empaquetadas, moderadamente seleccionadas con granos subangulares a subredondeados de baja esfericidad, con gravas en un 24%, arenas 70%, limos y arcillas 6%, con cemento silíceo del 5%. Es clasificada texturalmente según Folk [11] como una arenisca conglomerática. La muestra está constituida por un 81% de cuarzo compuesto por un 66% por cuarzo monocristalino con extinción ondulatoria en 59% y extinción recta en 7% y 34% de cuarzo policristalino >3 con granos subangulares a subredondeados, algunos presentan inclusiones de moscovita.

Los feldespatos (3%) y las plagioclasas (2%) se presentan en granos subangulares a angulares, algunos feldespatos están alterando a minerales arcillosos. Los fragmentos

líticos (11%) se presentan en granos subangulares a subredondeados de tamaño entre 0.4 mm y 1.9 mm. La moscovita (3%) es angular a subangular y elongada en espacios intragranulares (Figura 6A). Las cuarzoarenitas son granosoportadas, maduras, bien empaquetadas, bien seleccionadas con granos subredondeados a redondeados de alta esfericidad, con arenas (93-94%), limos y arcillas (6-7%), cemento silíceo (4-7%).

La muestra está constituida por un 93% de cuarzo compuesto por cuarzo monocristalino (63-66%) con extinción ondulatoria, cuarzo con extinción recta (5-6%) y cuarzo policristalino >3 (31-34%) con granos subangulares a subredondeados de tamaño de 0.01 a 0.30 mm, algunos presentan inclusiones de moscovita. Los feldespatos (2%) y las plagioclasas (1%) presentan granos subangulares a angulares y subesféricos, algunos feldespatos están alterando a minerales arcillosos. Los fragmentos líticos (0-2%) se presentan en granos subangulares a subredondeados de tamaño entre subangulares elongados de tamaño de 0.02 a 0.4 mm en espacios intragranulares. La moscovita (2%) se presenta en granos angulares (Figura 6B y 6C).

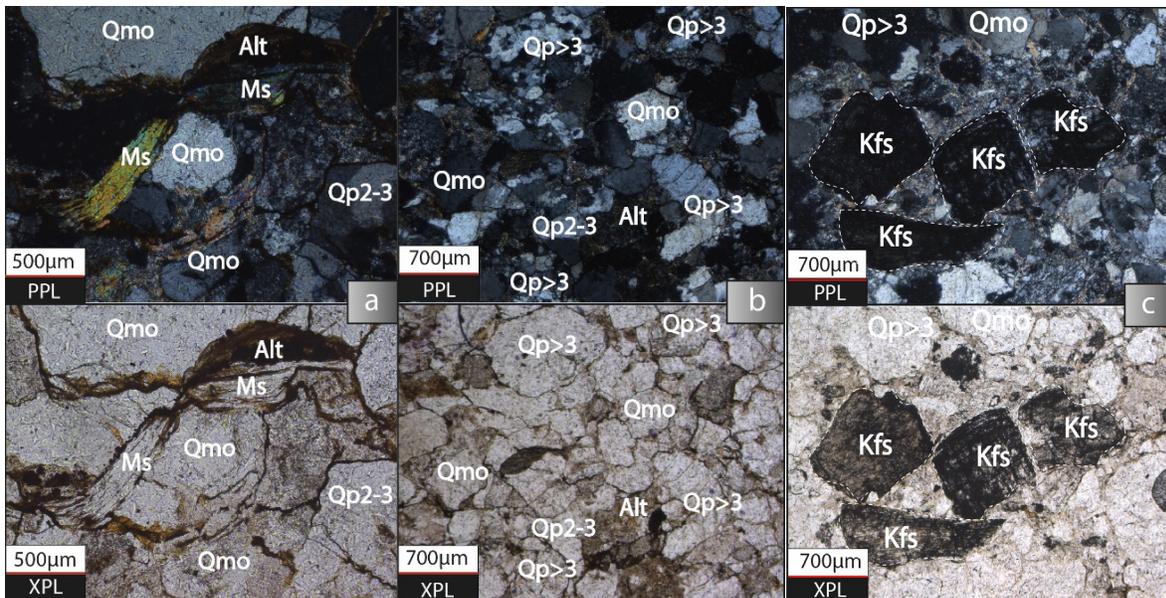
### 3.3. Geoquímica

La Tabla 3, muestra los resultados estadísticos del contenido de óxidos mayores y elementos trazas predominantes en el perfil de la formación Girón estudiado a partir de la técnica analítica semicuantitativa de Fluorescencia de Rayos X (FRX) en roca total, llevada a cabo a cuatro especímenes.

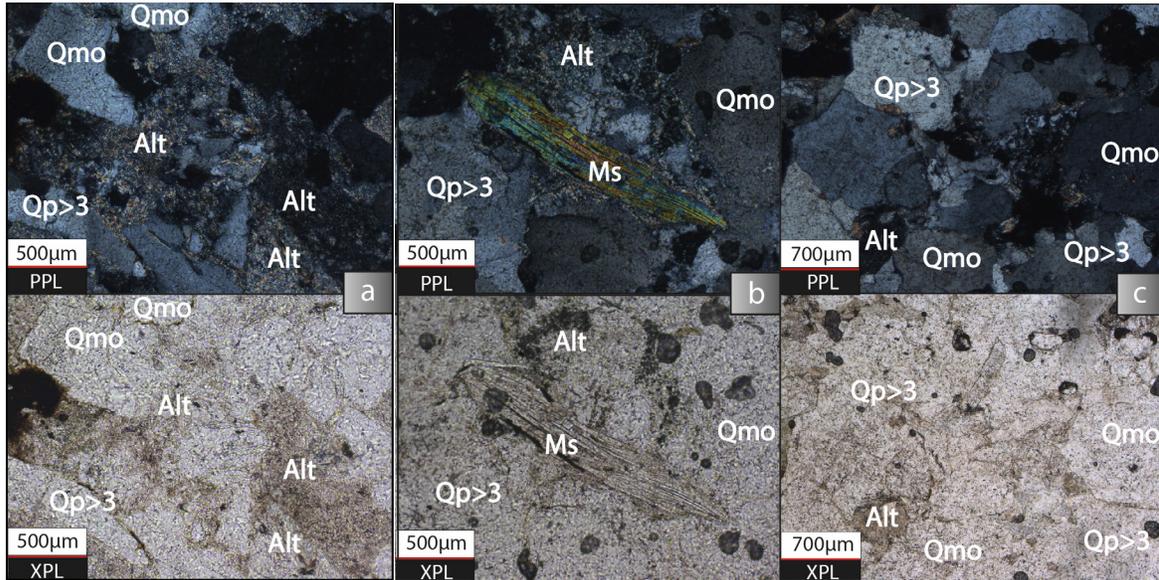
Las cuatro muestras analizadas se evaluaron según la clasificación geoquímica de areniscas de Floyd & Leveridge [14] (Figura 7B), mostrando que estas rocas se clasifican como arcosas. Además, el diagrama [15] indica que las muestras analizadas cuentan con una alteración intensa, dado a que se encuentran en el rango de Illita y Caolinita-Gibsitita-Clorita con un índice de alteración química (CIA) que varía entre 81 a 88 (Figura 7A).

**Tabla 3.** Resultados de técnica FRX. Los valores en la tabla son porcentuales (wt%), los valores en azul representan elementos menores y trazas en partes por millón (ppm).

Muestras	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	SO <sub>3</sub>	NaO <sub>2</sub>		
KD(14)-M2/UH	70,67	18,22	4,88	3,21	0,97	0,48	0,43	0,36		
KD(21)-M3/UF	76,06	15,74	3,08	3,05	0,41	0,11	0,08	0,6		
KD(22)-M2/UD	75,91	13,69	3,69	2,37	0,92	0,28	1,76	0,91		
KD(23)-M4/UB	82,14	11,84	2,71	1,42	0,44	0,1	0,16	0,72		
	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	TOTAL	Cr	Ba	Cl	Rb	Zr	
KD(14)-M2/UH	0,28	0,23	0,04	99,77	0,12	0,05	0,02	0,01	0,01	
KD(21)-M3/UF	0,53	0,03	0,01	99,7	79	0,18	0,02	92	0,03	
KD(22)-M2/UD	0,17	0,1	0,03	99,83	0,03	0,06	0,02	0,01	0,01	
KD(23)-M4/UB	0,21	0,05	0,02	99,81	94	0,11	0,04	74	0,01	
	Sr	Zn	Y	Ce	V	Cu	Pb	Br		
KD(14)-M2/UH	33	30	11	-	-	-	-	-		
KD(21)-M3/UF	83	-	29	0,03	57	-	-	-		
KD(22)-M2/UD	82	24	15	0,02	-	96	0,01	-		
KD(23)-M4/UB	56	31	21	-	-	-	-	23		



**Figura 5.** Microfotografías representativas de subarcosas de la Formación Girón. Moscovita (Ms), en PPL (nicoles polarizados) se observa en la parte superior alteradas (Alt), cuarzo monocristalino con extinción ondulatoria (Qmo) predominantes de hábito xenomorfo formando pseudomatrix; se observa además un grano de cuarzo policristalino de tres cristales (Qp2-3). Microclina (Kfs) con maclado en enrejado, se observa que está alterando a minerales arcillosos (línea discontinua). PPL=nicoles polarizados. XPL=nicoles cruzados. Aumento 10x.

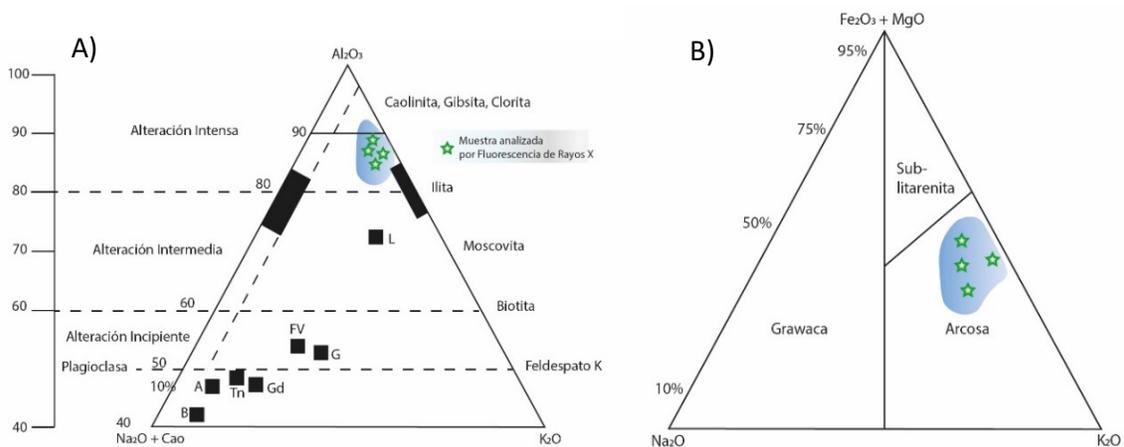


**Figura 6.** Microfotografías representativas de sublitanitas (a) y de cuarzoarenitas (b y c) de la Formación Girón. a) se observan zonas de alteración a minerales arcillosos (Alt). b) granos de moscovita (Ms) intragranular. c) granos de cuarzo policristalino mayor a 3 (Qp>3) y cuarzo monocristalino con extinción ondulatoria (Qmo). Aumento 4x. PPL=nícoles polarizados.

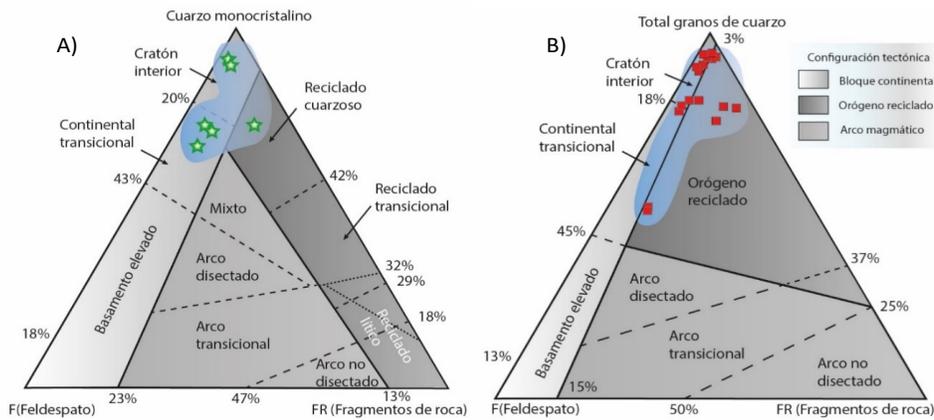
### 3.4. Análisis de procedencia

Los análisis petrográficos [11] y geoquímicos [14] arrojaron que las areniscas de la Formación Girón son principalmente cuarzoarenitas, y en menor proporción subarcosas, sublitanitas y arcosas. Texturalmente se caracterizan por ser areniscas, areniscas ligeramente

conglomeráticas y areniscas conglomeráticas. Se aplicaron análisis de procedencia según los diagramas ternarios ambientes tectónicos de [16], diagrama de discriminación tectónica de Bathia (1989), y diagrama de discriminación tectónica de [17].

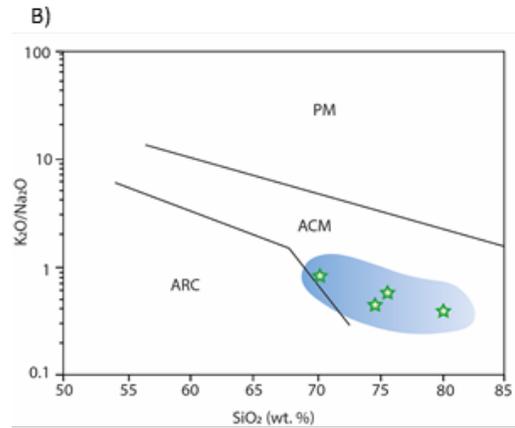


**Figura 7.** Diagrama triangular. A) Discriminación de alteración A-NC-K. B) Clasificación química de las areniscas. Modificado de [15][14].

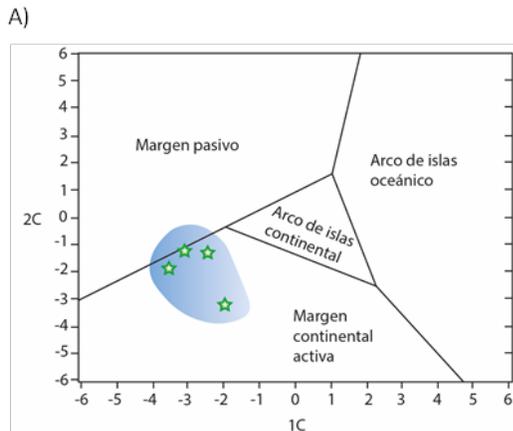


**Figura 8.** Diagramas ternarios para discriminación tectónica de [16] A) Diagrama para el análisis de procedencia que muestra la contribución principal del cratón interior, y la contribución del orógeno reciclado y la contribución subordinada de transición continental a las muestras de arenisca de la Formación Girón. B) Diagrama QmFL que muestra la distribución de las muestras analizadas en sección delgada distribuidas en los campos de Reciclado cuarzoso, cratón interior y transición continental.

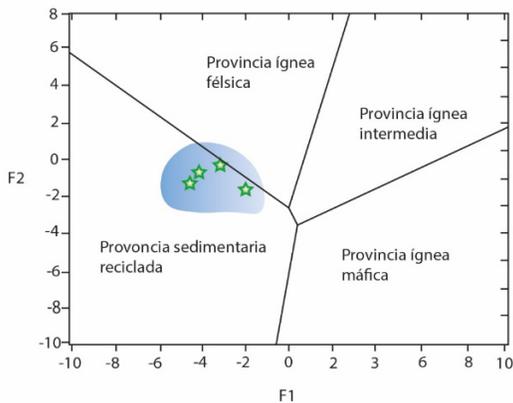
En los diagramas de [16], las areniscas de Formación Girón se ubican principalmente en los campos de bloque continental y orógeno reciclado, más específicamente en los campos de cratón interior y una muestra en el campo continental transicional (Figura 8A). En el diagrama QmFL se ubican principalmente en los bloques continental en los campos de cratón interior, continental transicional, y orógeno reciclado en el campo de orógeno reciclado cuarzoso (Figura 8B). En el diagrama de [18] muestra que el área fuente de los sedimentos tectónicamente provienen de un margen continental activo (Figura 9A). Por otro lado, el diagrama de [17] indica también qué, el área fuente de donde proceden los sedimentos corresponde a un margen continental activo (Figura 9B).



**Figura 9.** Diagramas de discriminación tectónica de [17], [18].



Por último, se empleó el diagrama de [17], mostrando que los sedimentos que constituyen las areniscas de la Formación Girón provienen de la erosión de una fuente sedimentaria reciclada (Figura 10).



**Figura 10.** Diagrama binario para la discriminación tectónica de Bathia (1989).

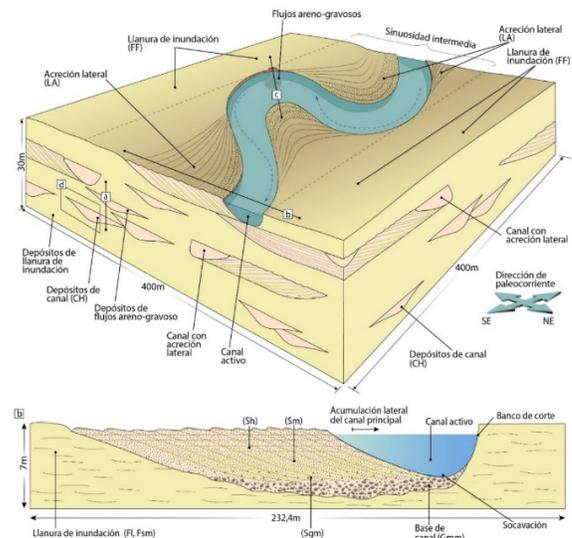
### 3.5. Modelo Sedimentario – Depositional

El modelo sedimentario - deposicional en la sección del km 42 vía Girón-Zapatoca se establece a partir del análisis petrográfico, geoquímico, estratigráfico, facial y paleoambiental. El modelo se representa mediante dos bloques diagrama (Figura 11 y Figura 13) que muestra el patrón de apilamiento de las facies que constituyen la secuencia sedimentaria analizada. El primer bloque diagrama representa la sección basal del perfil (Figura 11) que indican un ambiente fluvial meandriforme de moderada sinuosidad basado en la presencia de múltiples litofacies de limolitas (Fsm y Fl) estrechamente espaciados que sugieren la deposición de incrementos sucesivos y delgados de sedimentos de llanura de inundación, en una amplia llanura aluvial a través de la cual serpenteaba el canal.

Esto indica una disminución cíclica gradual en el régimen energético a lo largo del tiempo y una variación en la tasa de suministro de sedimentos [19] debido a la variabilidad de sus espesores. Además, en conjunto con la presencia de litofacies de areniscas (Sm, Sh), areniscas conglomeráticas (Sgm) y menor proporción conglomerados (Gcm, Gmm) en secuencias granocrecientes y granodecrecientes comprueban la existencia de un sistema meándrico de intermedia sinuosidad [19] y un sistema fluvial de energía moderadamente alta.

Por otra parte, la existencia de canales con flujos areno-gravosos (Figura 12) permiten inferir episodios de alta

energía producidos por inundaciones extremas; esto se puede relacionar con el color amarillo grisáceo de las litofacies de limolitas (Fsm, Fl) en la base de la secuencia, puesto que, hacen alusión a un entorno de lodazal con vegetación permanentemente anegado de agua, indicativo de un ambiente pobre en oxígeno. Basadas en las características mencionadas para el primer bloque diagrama, se puede asociar al modelo fluvial sand-bed meandering river propuesto por [19] ya que poseen como principal elemento arquitectónico las llanuras inundación con litofacies Fm, Fl y los depósitos de canal y flujos de canales areno-gravosos con litofacies Gmm, Gcm, Sgm, Sm, Sh, un sistema fluvial donde “los sedimentos del canal y de la barra son predominantemente arenosos” [19]. La sinuosidad es intermedia a alta con canales de curvatura intermedia dominados por la carga de fondo.



**Figura 11.** Modelo sedimentario-deposicional de parte basal del perfil del km 42 vía Girón-Zapatoca.

El segundo bloque diagrama (Figura 12) representa la parte media y superior del segmento (Figura 14) el cual se caracteriza por un aumento en la proporción de facies de conglomerados (Gmm, Gcm), areniscas conglomeráticas (Ggm, Ggi) y areniscas (Sh, Sm, Sr) con una disminución en frecuencia en la que se presentan facies de limolitas (Fm, Fl). Es decir, una proporción relativamente menor de facies de grano fino, lo que indica una transición a un sistema fluvial trenzado de intermedia sinuosidad.

Representado por el aumento en la producción de sedimentos constituido por la generación de point bar compuestos por barras de gravas y arenas. Las barras de gravas sugieren un transporte dominado por la carga de fondo con una energía alta y son depositados en las zonas centrales y laterales del cauce, generados cuando cesan los períodos de flujo máximo de corriente mientras que las barras de arenas sugieren una disminución local en la energía del transporte y se depositan hacia superior de las barras de gravas [19].

Las litofacies de arenisca con laminación cruzada (Sr) sugieren un sistema fluvial dominado por canales sinuosos, de crecimiento lateral y dominados por la carga fondo, que sufrieron altas tasas de migración lateral mediante el desarrollo del point bar, mientras que la presencia de litofacies de limolitas de coloración rojizas (Fsm) indica un clima con precipitaciones pluviales abundantes, aguas activas, en movimiento, ricas en oxígeno y un relieve topográfico pronunciado.

Basado en las características mencionadas para este segundo bloque diagrama, se puede asociar al modelo fluvial correspondiente deep gravel braided “donjek type” (río trenzado profundo de gravas tipo “donjek type”) propuesto por [19] ya que poseen como principal elemento arquitectónico los point bar compuestos por las barras de grava longitudinales (GB), barras de arenas (SB) con litofacies Gcm, Gmm, Sgm, Sm, Sgi, Sh y los depósitos de acreción lateral con litofacies Sr. La sinuosidad es intermedia, aunque puede haber tramos casi rectos y muy sinuosos, y el parámetro de trenzado también es intermedio.

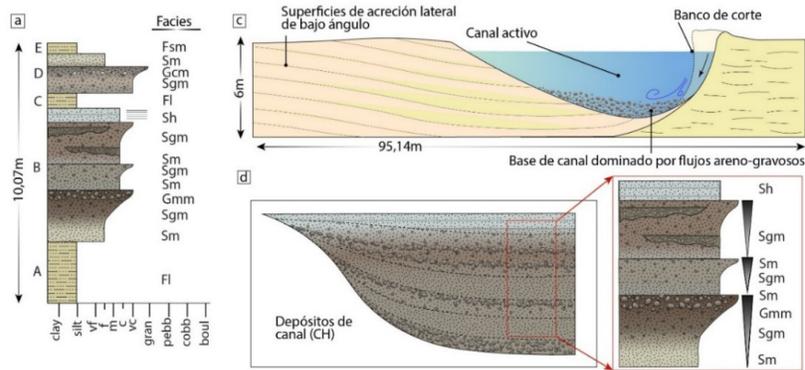
#### 4. CONCLUSIONES

La integración de los análisis de petrografía, sedimentología y estratigrafía realizados en las rocas de la Formación Girón, en la sección de estudio indica que la secuencia compuesta por cuarzoarenitas, subarcosas, sublitanitas, arcosas, conglomerados de cuarzo y limolitas.

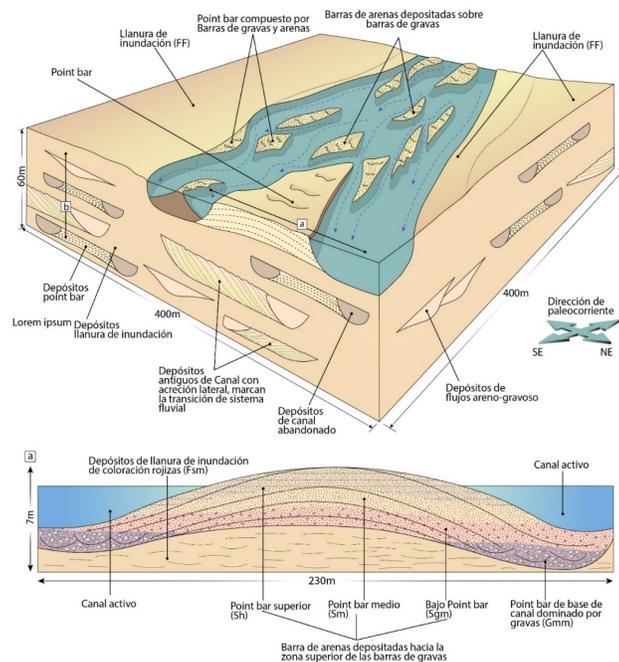
Los diagramas ternarios de QtFL y QmFLt de Dickinson indican una procedencia de cratón interior, continental transicional y orógeno reciclado; compuestas por rocas metamórficas de bajo grado [20], más específicamente gneises de bajo grado metamórfico [21]. Se prevé como posibles fuentes de aporte: gneis de Bucaramanga, la Formación Silgará o el Escudo Guayanés.

La Formación Girón es de origen fluvial y fue depositada en un sistema fluvial meandriforme de intermedia sinuosidad de energía moderadamente alta que tuvo una transicional local a un sistema trenzado de moderada sinuosidad. En el sistema meandriforme se reconocen diferentes elementos arquitectónicos, cada uno con geometrías distintivas y asociaciones de facies que registran la presencia de un canal con flujos areno-gravosos y abundantes llanuras de inundación. Las unidades con predominio de arena y limo son características de un río meándrico y se atribuyen a un sistema de moderada sinuosidad dominado por limos y arenas (similar al modelo “Sand-Bed Meandering River” de Miall) [19]. Por otra parte, el sistema de río trenzado de intermedia sinuosidad de energía alta con algunos canales de alta sinuosidad lo caracterizan litofacies como: Gmm, Gcm, Sgm, Sgi, Sh, Sm, Sr; con una proporción relativamente menor de litofacies de grano fino (Fm, Fl) con elementos arquitectónicos de point bar compuestos por barras de gravas y arenas, canal con acreción lateral, flujos areno gravosos y llanuras de inundación.

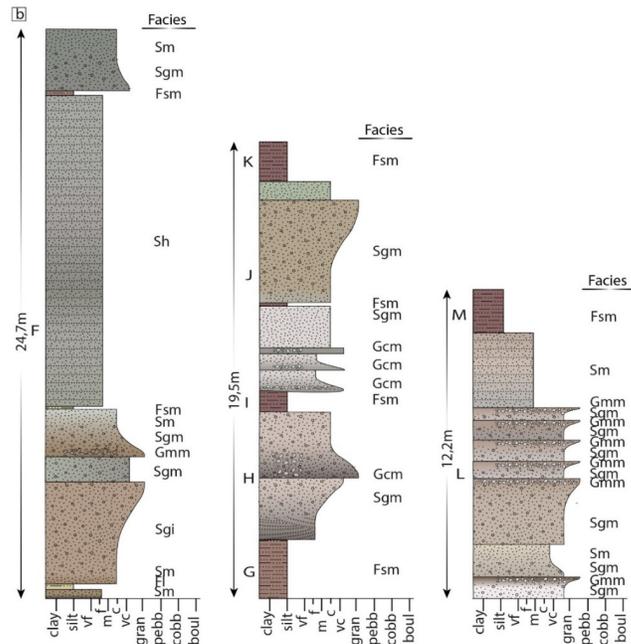
Las laminaciones cruzadas sugieren un sistema fluvial trenzado dominado por canales sinuosos, de crecimiento lateral y carga fondo, que sufrieron altas tasas de migración lateral (similar al modelo “Deep gravel braided “Donjek type”” de Miall) [19].



**Figura 12.** Sección basal de la Formación Girón. (a) Sección basal del perfil de estudio depositado en las condiciones paleoambientales descritas, (c) Eventos de flujos areno-gravosos generados por caídas de gravedad de sedimentos en el canal, representando un cambio en la forma del canal y el desplazamiento del banco de corte (d) Acumulación de las litofacies que conforman un depósito de canal.



**Figura 13.** Modelo sedimentario-deposicional de sección media y superior del perfil del km 42 vía Girón-Zapatoca. Se muestra antiguos depósitos de canal con acreción lateral que representan un registro del antiguo sistema meandriforme. Los depósitos de llanura de inundación de color rojizo representan litofacies de limolitas dispuestas en este sector del perfil. El modelo representa el sistema trenzado con point bar en el centro y laterales de los causes, constituidos por barras de gravas y arenas, estos últimos, depositados en la zona superior de las litofacies de gravas de barra de grava. Los causes tienen una sinuosidad intermedia. (b) representa un perfil característico del modelo deposicional de un point bar constituido por barra de gravas en su base (Gmm) de fondo de canal y por barras de arenas suprayacentes; constituidos por areniscas conglomeráticas (Sgm) en la zona baja, areniscas masivas (Sm) en la zona media y arenas con laminación horizontal (Sh) en la zona superior.



**Figura 14.** Representación de la sección media y superior del perfil y facies de estudio compuestas por litofacies de point bar, flujos de canales areno-gravosos y canales con acreción lateral.

**AGRADECIMIENTOS**

Los autores queremos expresar nuestros agradecimientos al Geólogo Diego Fernando Diaz Castillo de la Universidad Industrial de Santander por su acompañamiento a campo y a la Universidad de Santander y su director del departamento de Geología e Ingeniería Petroquímica Jorge Ailer Meza por permitirnos el uso de los laboratorios de petrografía para la toma de las micro fotos de las secciones delgadas.

**CONFLICTO DE INTERÉS**

Los autores no tienen conflictos de interés que declarar.

**REFERENCIAS**

[1] J. Mojica and C. Villarroel, "Contribución al conocimiento de las unidades paleozoicas del área de floresta (cordillera oriental colombiana; departamento de boyacá) y en especial al de la

Formación Cuche," *Geol. Colomb.*, vol. 13, pp. 55–80, 1984. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1208>

[2] C. M. Alarcón, J. Clavijo-Torres, L. C. Mantilla-Figueroa, and J. G. Rodríguez, "Nueva propuesta de edades para el registro sedimentario de las formaciones Bocas y Jordán y su relación con el desarrollo de la actividad magmática del Grupo Plutónico de Santander (Cordillera Oriental, Colombia)," *Rev. la Acad. Colomb. Ciencias Exactas, Físicas y Nat.*, vol. 44, pp. 1137–1151, Dec. 2020. <https://doi.org/10.18257/raccefyn.1208>

[3] Fabre, "La subsidencia de la Cuenca del Cocuy (Cordillera Oriental de Colombia) durante el Cretáceo y el Terciario Inferior," *Prim. parte Estud. cuantitativo la Subsid. Geol. Norandina*, vol. 8, pp. 22–27, 1983.

[4] M. Cortés, J. Angelier, and B. Colletta, "Paleostress evolution of the northern Andes (Eastern Cordillera of Colombia): Implications on plate kinematics of the South Caribbean region," *Tectonics*, vol. 24, no. 1, pp. 1–27, 2005. <https://doi.org/10.1029/2003TC001551>

- [5] H. Duque-Caro, "The choco block in the northwestern corner of South America: Structural, tectonostratigraphic, and paleogeographic implications," *J. South Am. Earth Sci.*, vol. 3, no. 1, pp. 71–84, 1990. [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(90\)90019-W](https://doi.org/10.1016/0895-9811(90)90019-W)
- [6] Taboada et al., "Geodynamics of the northern Andes: Subductions and intracontinental deformation (Colombia)," *Tectonics*, vol. 19, no. 5, pp. 787–813, Oct. 2000. <https://doi.org/10.1029/2000TC900004>
- [7] S. R. Manosalva et al., "Cartografía geológica y prospección geoquímica del macizo de floresta," Bogotá D.C., Colombia, 2010.
- [8] F. Cediél, "El grupo Girón, una molasa mesozoica de la cordillera Oriental," *Boletín Geológico*, vol. 16, no. 1-3 SE-Artículos, pp. 5–96, Jan. 1968. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol16.1-3.1968.108>
- [9] D. Osorio-Afanador, "Estratigrafía y deformación del Grupo Girón en el Anticlinorio de los Yarigués ("Anticinal de los Cobardes"), sectores de Zapatoca y río Lebrija," Universidad Industrial de Santander, 2016.
- [10] S. Méndez-Espinosa, "Análisis de procedencia de las rocas siliciclásticas de las Formaciones Girón y Tibasosa en el macizo de floresta," Universidad Nacional de Colombia, 2017.
- [11] R. L. Folk, *Petrologie of sedimentary rocks*. 1974.
- [12] R. L. Folk, "Clasificación de las rocas de carbonatos de acuerdo a las proporciones relativas de los tres constituyentes básicos: granos (aloquímicos), matriz micrítica y cemento, esparítico (ortoquímicos)," 1962.
- [13] R. L. Folk, "Practical petrographic classification of limestones," vol. 43, pp. 1–38, 1959.
- [14] P. Floyd and B. Leveridge, "Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones," *J. Geol. Soc. London.*, vol. 144, no. 4, pp. 531–542, Aug. 1987. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.144.4.0531>
- [15] H. W. Nesbitt and G. M. Young, "Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations," *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 48, no. 7, pp. 1523–1534, 1984. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(84\)90408-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90408-3)
- [16] W. Dickinson et al., "Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting," *GSA Bull.*, vol. 94, no. 2, pp. 222–235, Feb. 1983. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1983\)94<222:PONAPS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1983)94<222:PONAPS>2.0.CO;2)
- [17] B. P. Roser and R. J. Korsch, "Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data," *Chem. Geol.*, vol. 67, no. 1, pp. 119–139, 1988. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(88\)90010-1](https://doi.org/10.1016/0009-2541(88)90010-1)
- [18] M. Bhatia, "Plate Tectonics and Geochemical Composition of Sandstones," *J. Geol.*, vol. 91, no. 6, pp. 611–627, May 1983.
- [19] Miall, *The geology of fluvial deposits*, Primera ed. Springer Berlin, Heidelberg, 1996. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-03237-4>
- [20] Basu, S. W. Young, L. J. Suttner, W. C. James, and G. H. Mack, "Re-evaluation of the use of undulatory extinction and polycrystallinity in detrital quartz for provenance interpretation," *J. Sediment. Res.*, vol. 45, no. 4, pp. 873–882, Dec. 1975. <https://doi.org/10.1306/212F6E6F-2B24-11D7-8648000102C1865D>
- [21] T. Amparo, P. Marta, and A. José, "Quartz grain types in Holocene deposits from the Spanish Central System: some problems in provenance analysis," *Geol. Soc. London, Spec. Publ.*, vol. 57, no. 1, pp. 47–54, Jan. 1991. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1991.057.01.05>

## ANÁLISIS DE LAS VIBRACIONES EN EL BRAZO DE UN DRON CONSTRUIDO CON ESTRUCTURAS ISOGRID Y FIBRA DE CARBONO

### Vibration analysis on the arm of a drone built with Isogrid structures and carbon fiber

Brayan Noel Ceniceros Jáquez, Oralia Solano Maya,  
Alfredo Villanueva Montellano, José Omar Dávalos Ramírez

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México. Email: [jose.davalos@uacj.mx](mailto:jose.davalos@uacj.mx)

(Recibido 26 de Octubre de 2023 y aceptado 07 de Diciembre de 2023)

#### Resumen

En este trabajo se presenta un análisis al brazo de un dron construido con estructuras Isogrid y fibra de carbono para evaluar su frecuencia natural y su respuesta a la frecuencia. Se comparan los resultados en dos modelos de brazo de dron, el primero con estructura Isogrid y el segundo con estructura Isogrid recubierto por una capa de fibra de carbono. Mediante el elemento finito se calculó la frecuencia natural, la amplitud de desplazamientos en un rango de frecuencia para evaluar condiciones de resonancia y los desplazamientos en resonancia y en 3600 RPM. Los resultados muestran que se reduce considerablemente la amplitud de desplazamientos y los desplazamientos al agregar una capa de fibra de carbono. Adicionalmente la frecuencia natural de la estructura aumenta.

**Palabras clave:** dron, ISOGRID, vibraciones, desplazamientos, elemento finito.

#### Abstract

In this work, an analysis of the arm of a drone constructed with Isogrid structures and carbon fiber is presented to evaluate its natural frequency and its response to frequency. The results are compared between two drone arm models, the first one with an Isogrid structure, and the second one with an Isogrid structure covered by a layer of carbon fiber. Using finite element analysis, the natural frequency was calculated, as well as the displacement amplitudes over a frequency range to evaluate resonance conditions and displacements at resonance and at 3600 RPM. The results show a significant reduction in displacement amplitudes and displacements when adding a layer of carbon fiber. Additionally, the natural frequency of the structure increases in the model with carbon fiber.

**Key words:** dron, ISOGRID, vibrations, displacements, finite element.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los drones han experimentado un crecimiento significativo en su uso en diversas aplicaciones, desde la fotografía aérea hasta la entrega de paquetes. La estabilidad y el rendimiento de estos dispositivos son factores cruciales para su funcionamiento efectivo. Uno de los desafíos técnicos fundamentales en el diseño de drones es el control de las vibraciones generadas por la rotación de los motores y las hélices. En este sentido, es importante asegurar que las fuerzas de excitación del motor que impulsa a las hélices no generen vibraciones excesivas en la estructura. Estas vibraciones pueden generar amplitudes de desplazamiento excesivas que afectan la operación del dron [1]. Diferentes estudios se han realizado para intentar controlar estos desplazamientos mediante actuadores o sensores en lo que se conoce como controles activos [2–4].

Dentro del área de controles pasivos se han estudiado las posibilidades de los materiales compuestos para el control de las vibraciones. Huang et al. [5] estudiaron los mecanismos de amortiguamiento de estructuras tipo sándwich con materiales compuestos mediante modelos de elemento finito. Concluyen que los mecanismos de amortiguamiento dependen de los modos de vibración de la estructura ya que en el primer modo se presenta amortiguamiento por compresión y en segundo y tercer modo amortiguamiento por cortante.

Kumar y Panda [6] proponen la aplicación de compuestos con propiedades viscoelásticas para el control pasivo de estructuras sometidas a vibraciones. Aplicaron el método del elemento finito para el análisis de vigas en voladizo manufacturadas con materiales compuestos. Encontraron mejoras del amortiguamiento en condiciones de carga dinámicas. Aplicado a vehículos aéreos no tripulados (UAV) se han realizado investigaciones para determinar la respuesta a las vibraciones en estructuras manufacturadas con compuestos.

Simsiriwong y Warsi [7] realizaron estudios experimentales al fuselaje de un UAV integrado con

estabilizadores verticales. Usaron compuestos de fibra de carbono curados en horno con fibras uniaxiales y biaxiales. Encontraron que los modos de vibración son mixtos incluyendo combinaciones de flexión y torsión. Adicionalmente el uso de estructuras no convencionales ha demostrado impactos positivos en la reducción de vibraciones. Shangolian et al. realizaron un análisis de un compuesto tipo sándwich con núcleos Isogrid. Sus resultados muestran que las frecuencias naturales se incrementan de 1 a 5 veces al variar los parámetros tanto del Isogrid como la cantidad de capas de fibra.

Lin et al. [8] implementaron metaestructuras mecánicas cilíndricas para aislar las vibraciones en drones. Realizaron mediciones experimentales en un prototipo construido mediante manufactura aditiva. Encontraron que se eliminaron las frecuencias de banda ancha en el dron. En este trabajo se propone el uso de estructuras Isogrid recubiertas con fibra de carbono en el diseño del brazo de un dron para estudiar su respuesta a cargas dinámicas provocadas por la rotación de las hélices.

Con base en lo anterior, en la presente investigación se presenta una estructura de tipo circular en dos diseños de brazo: uno con estructura Isogrid y otro con estructura Isogrid recubierta con una capa de fibra de carbono. El material de construcción del Isogrid será de ácido poliláctico (PLA). Se calcularán mediante el método del elemento finito las frecuencias naturales, las amplitudes de los desplazamientos en condiciones de resonancia y a 3600 RPM.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

En la presente investigación se tomó como referencia el brazo de un dron modelo Industrial Drone Espect. Las dimensiones empleadas en la estructura Isogrid y el modelo del dron se presentan en la Tabla 1, mientras que la geometría resultante de la estructura Isogrid es mostrada en la Figura 1. Adicionalmente se generó una superficie circular del mismo diámetro del Isogrid que corresponde a la capa de fibra de carbono.

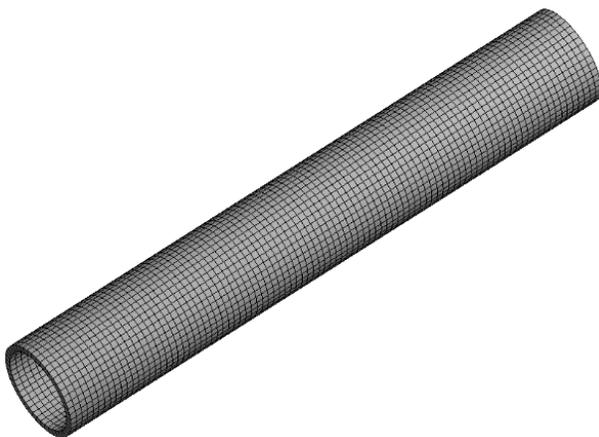
**Tabla 1.** Dimensiones de la estructura Isogrid.

Dimensión	Valor
Diámetro = longitud lateral	30mm
Espesor	3mm
Ancho de costillas helicoidales	4mm
Ancho de costillas circulares	4mm



**Figura 1.** Geometría del brazo del dron con estructura Isogrid.

La estructura Isogrid fue discretizado con elementos tetraédricos mientras que la capa de fibra se discretizó con elementos cuadriláteros. Se generaron 39525 elementos los cuales se muestran en la Figura 2. La fibra de carbono se consideró bidireccional con un espesor de 0.43 mm. De ambos materiales, fibra de carbono y PLA, se presentan en la Tabla 1. Se realizaron dos tipos de estudios. En el primero se calculó la frecuencia natural en las estructuras Isogrid sin y con recubrimiento de fibra de carbono. En el segundo se obtuvo la respuesta a la frecuencia en condiciones de resonancia en ambas geometrías.



**Figura 2.** Discretización de los elementos del brazo del dron.

**Tabla 1.** Propiedades de fibra de carbono y PLA.

Dimensión	Propiedades	Unidades	Magnitud
Fibra de carbono	$E_x$	MPa	59160
	$E_y$	MPa	59160
	$E_z$	MPa	7500
	$\nu_{xy}$	-	0.04
	$\nu_{yz}$	-	0.3
	$\nu_{xz}$	-	0.3
	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	1451
PLA	$E$	GPa	3.45
	$\nu$	-	0.39
	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	1250

El modelo fue restringido en un extremo y en el extremo contrario se asignó la carga correspondiente al peso del motor, 62 grs., y de la propela, 15 grs., dando un valor equivalente a 0.76N. Los valores de frecuencia natural obtenidos del análisis modal se utilizaron como condición de frontera en el estudio de frecuencia de respuesta.

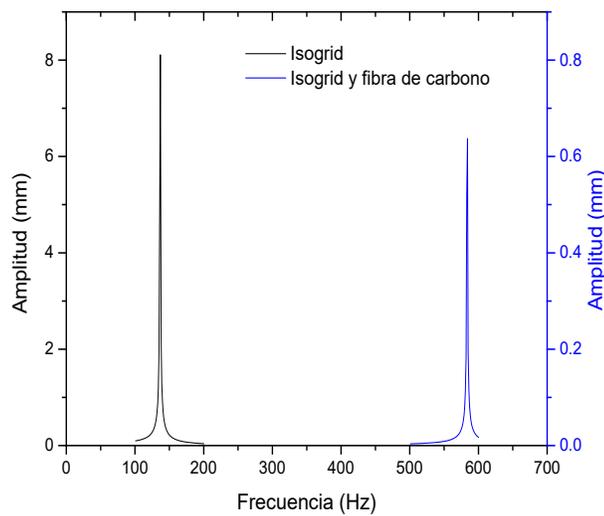
### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 2 se presentan las tres primeras frecuencias naturales de ambos modelos. El valor de la primera frecuencia natural del brazo con estructura Isogrid y fibra de carbono incrementa alrededor de 4 veces con respecto al brazo que cuenta únicamente con estructura Isogrid. Estos resultados coinciden con los reportados en la literatura. Para el segundo y tercer modo la diferencia disminuye a 2 y 1.76 veces respectivamente.

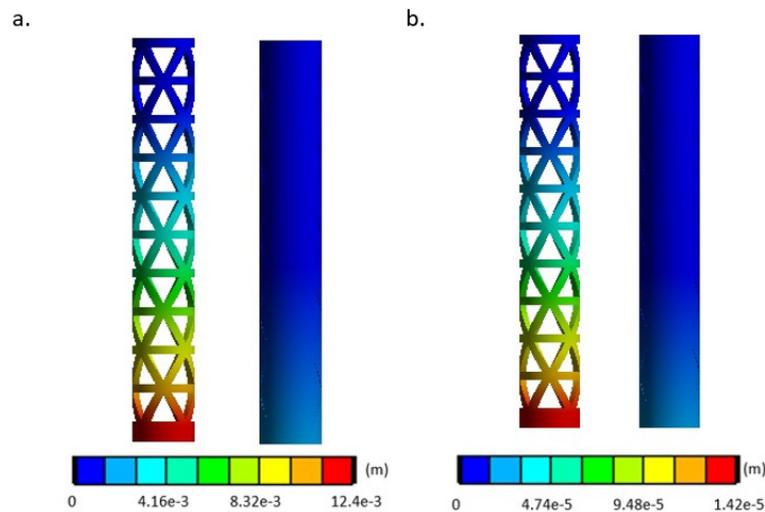
En la Figura 3 se presentan los resultados de frecuencia de respuesta para los diseños con estructura Isogrid y material compuesto evaluados en rangos de 100 a 200 y de 500 a 600 respectivamente. Estos rangos se definieron para observar la amplitud de desplazamiento cuando en ambos casos se alcanza la resonancia. La amplitud de desplazamiento en condiciones de resonancia es superior en el caso del material Isogrid con un valor de aproximadamente 8 mm, mientras que en el caso del brazo con material compuesto apenas es superior a los 0.6 mm.

**Tabla 2.** Frecuencias naturales de los diseños del brazo del dron.

Frecuencia	Isogrid	Isogrid/fibra de carbono
Frecuencia natural 1 (Hz)	136.61	583.55
Frecuencia natural 2 (Hz)	752.36	1510.6
Frecuencia natural 3 (Hz)	1333.8	2325.8



**Figura 3.** Frecuencia de respuesta en valores de resonancia.



**Figura 4. a)** Desplazamientos en brazo de dron bajo condiciones de resonancia y **b)** Desplazamientos en el brazo del dron a 60 Hz.

Lo anterior demuestra que la aplicación de compuesto con estructura Isogrid reduce significativamente siendo 12.72 veces menor. Los resultados de desplazamiento en el cuerpo del brazo del dron en condiciones de resonancia se presentan en la Figura 4a. Como es de esperarse, el mayor desplazamiento ocurre en el extremo libre y es nulo en la zona de sujeción. Los desplazamientos superan 10 mm en el caso de la estructura Isogrid. El desplazamiento en la estructura recubierta con fibra disminuye considerablemente.

Teniendo en cuenta que los resultados son en condiciones de resonancia se considera que un brazo de dron con estructura Isogrid y recubierto con fibra de carbono presentara un menor desplazamiento en estas condiciones.

Con el fin de comprobar si los desplazamientos se reducen en condiciones de frecuencia de operación típica en el dron, se realizó una simulación a 60 Hz (3600 RPM) presentada en la Figura 4b. Al encontrarse alejado de la frecuencia de resonancia los desplazamientos en el brazo disminuyen considerablemente por lo tanto la mejora debido a la adición de fibra de carbono se conserva a frecuencias más bajas.

La adición de la capa de fibra de carbono, si bien incrementa la masa del brazo, le proporciona rigidez lo cual hace que su frecuencia natural cambie provocando una reducción en la amplitud de los desplazamientos, así como en los desplazamientos mismos de la estructura.

#### 4. CONCLUSIONES

En esta investigación se calcularon numéricamente la frecuencia natural y la respuesta a las cargas dinámicas en dos modelos de brazo de dron, uno con estructura Isogrid y otro con estructura Isogrid y una capa de fibra de carbono. De los resultados obtenidos se concluye que resulta benéfico para el brazo del dron su construcción con estructura Isogrid recubierta con fibra de carbono ya que los desplazamientos se reducen cuando se encuentra en operación. Lo anterior mejora el control del dron y contribuye a tener un vuelo óptimo.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez por las facilidades prestadas para la realización de este artículo.

#### CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores no tienen conflictos de interés que declarar.

#### REFERENCIAS

- [1] G. Cai, J. Dias, and L. Seneviratne, "A Survey of Small-Scale Unmanned Aerial Vehicles: Recent Advances and Future Development Trends," *Unmanned Syst.*, vol. 02, no. 02, pp. 175–199, 2014. <https://doi.org/10.1142/S2301385014300017>
- [2] Y. Li, X. Wang, R. Huang, and Z. Qiu, "Actuator placement robust optimization for vibration control system with interval parameters," *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. 45, pp. 88–98, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2015.04.017>
- [3] S. Kapuria and M. Y. Yasin, "Active vibration suppression of multilayered plates integrated with piezoelectric fiber reinforced composites using an efficient finite element model," *J. Sound Vib.*, vol. 329, no. 16, pp. 3247–3265, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2010.02.019>
- [4] Z. G. Song, L. W. Zhang, and K. M. Liew, "Active vibration control of CNT-reinforced composite cylindrical shells via piezoelectric patches," *Compos. Struct.*, vol. 158, pp. 92–100, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.09.031>
- [5] Z. Huang, Z. Qin, and F. Chu, "Damping mechanism of elastic-viscoelastic-elastic sandwich structures," *Compos. Struct.*, vol. 153, pp. 96–107, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.05.105>
- [6] Kumar and S. Panda, "Design of a 1-3 viscoelastic composite layer for improved free/constrained layer passive damping treatment of structural vibration," *Compos. Part B Eng.*, vol. 96, pp. 204–214, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.04.020>

- [7] J. Simsiriwong and R. W. Sullivan, "Vibration testing of a carbon composite fuselage," *Am. Soc. Compos. - 23rd Tech. Conf. Am. Soc. Compos.* 2008, vol. 2, pp. 956–969, 2008. <https://doi.org/10.1504/IJNVN.2010.036683>
- [8] Y. Lin et al., "A Novel Cylindrical Mechanical Metastructure for Drone Vibration Isolation," in *Proceedings of IncoME-VI and TEPEN 2021, 2023*, pp. 831–840. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-99075-6\\_67](https://doi.org/10.1007/978-3-030-99075-6_67)

## THE IMPORTANCE OF ADDITIVE TECHNOLOGY AND MANUFACTURING PROCESSES FOR LABORATORY EXPERIMENTS IN AERONAUTICS

### La importancia de la tecnología aditiva y los procesos de fabricación para los experimentos de laboratorio en aeronáutica

*Shehret Tilvaldyev, Uzziel Caldiño Herrera, José Omar Dávalos Ramírez,  
Manuel Alejandro Lira Martínez, Edgar Alfonso Muñoz Avitia*

*Aeronautics Department, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Mexico. Email: [shehret@uacj.mx](mailto:shehret@uacj.mx)*

*(Received October 30, 2023 and accepted December 19, 2023)*

#### Abstract

In recent years, world manufacturers of aviation equipment have made significant progress in the use of high efficiency (in terms of economic and time parameters) Additive Technology and Manufacturing processes. In aeronautics, at the stages of design, production and operation, laboratory tests and trials of various parts of the aircraft are very important and very often this can only be accomplished with the use of scaled-down prototypes. Today, the best way to produce prototypes of various parts of the aircraft is Additive Technology and Manufacturing processes. This article provides the reader with an opportunity to learn more about the use of additive manufacturing technologies for the needs of experimental activities in Aeronautics.

**Keywords:** aeronautics, additive manufacturing, additive technologies, airfoil, 3D printing.

#### Resumen

En los últimos años, los fabricantes mundiales de equipos aeronáuticos han realizado importantes avances en el uso de procesos de fabricación y tecnología aditiva de alta eficacia (en términos de parámetros económicos y de tiempo). En aeronáutica, en las fases de diseño, producción y explotación, las pruebas de laboratorio y los ensayos de diversas partes de la aeronave son muy importantes y, muy a menudo, esto sólo puede lograrse con el uso de prototipos a escala reducida. Hoy en día, la mejor manera de producir prototipos de diversas partes de la aeronave es la tecnología aditiva y los procesos de fabricación. Este artículo ofrece al lector la oportunidad de aprender más sobre el uso de las tecnologías de fabricación aditiva para las necesidades de las actividades experimentales en aeronáutica.

**Palabras clave:** aeronáutica, fabricación aditiva, tecnologías aditivas, perfil aerodinámico, impresión 3D.

## 1. INTRODUCTION

Before the advent of digital processing technologies and the creation of virtual and physical objects, the production of parts, sub-assemblies and machines was carried out entirely by weaning technologies. This primarily applies to the field of mechanical engineering and turning to creating parts, assemblies, mechanisms, and apparatuses. However, the development of computing devices, their evolution and creation of more and more efficient software complexes for data processing and simulation of different physical processes in a virtual environment, led to the emergence of ideas and then to the creation of methods and techniques for obtaining physical objects from digital models. Thus, in the early 80s of the twentieth century, the first technology of manufacturing physical objects by layer-by-layer curing of photopolymer resin was created. Inventor and engineer Charles Hull created a stereolithographic method of printing three-dimensional objects with photopolymer resin that hardens under the influence of ultraviolet light [1-2].

In 1984, the world's first 3D printer was patented, and in 1986 a company was established to promote 3D printing technology, modeling, printer assembly and photopolymer supply [2]. Since then, much has changed - the number of methods of growing objects, the productivity of printers, the variety of materials from which an object can be made, and most importantly, the availability of 3D printing technology. Additive technologies, additive manufacturing are technologies for creating physical objects (having any shape) by adding material.

It should be noted that during the last decades the rate of study of additive technologies has been increasing, so it is possible to find a large number of scientific and popular science papers describing both in detail and generalized principles of creating three-dimensional physical objects. Types of the most commonly used additive technologies for small batch production and prototyping of parts, mechanisms and apparatuses in mechanical engineering, presented in Table 1. The information obtained and presented in table below was based on the analysis of works [2, 3] [4-8] [13, 14].

The technology of three-dimensional printing (3D) is based on design and modeling with the help of digital technologies, as well as extensive computerization. It is possible to make changes in the design quickly, without having to re-manufacture tooling, casting molds or dies, it is enough to change the digital model. With the help of additive technologies, it is possible to produce parts from composites, for example, to create gradient structures from metal powders of different chemical composition or structure for parts whose parts work in different conditions. It is possible to use Additive Technology and Manufacturing processes in the development of repair techniques by filling damaged parts of structures with the material. Particularly important is the ability to make an entire part rather than assembling it from parts.

Analysis of the use of additive technologies, according to Wohlers Associates [2], shows that in 2012 the global market of additive manufacturing amounted to \$2.2 billion, in 2013 it grew to \$3.2 billion, with an average growth rate of 20-30%. The global additive manufacturing market was valued at \$11.2 billion in 2020 and is forecast to reach \$30.6 billion by 2028 (CAGR of 26.4%), [8]. Today, the most promising sectors of industry for the introduction of additive technologies account for about \$9 trillion. Additive technologies can be used in production by 20-40% already within the next 5-10 years. Thus, about \$2-3 trillion of the total volume of global industry may soon be associated with additive technologies [8].

It is expected that by the end of this decade, the traditional application of additive manufacturing will change from prototyping and hypothesis validation to full-fledged integration into mass production chains. There is a trend to increase the scale of implementation of additive technologies in various industries: already now 2/3 of leading industrial companies use additive manufacturing in production processes, by 2030. 2/3 of all manufactured products in the world will be produced with printed components, and by 2030-2050, 3D printing will make it possible to print fully finished products in several manufacturing sectors.

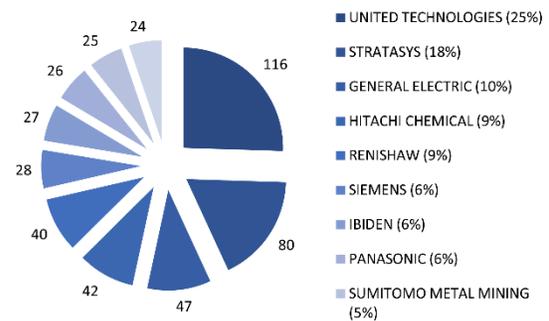
**Table 1.** Types of the most used additive technologies.

Method	Technology	Valor
Extrusion	Fused deposition modeling (FDM–Fused Deposition Method)	Thermoplastics: most commonly poly lactic acid (PLA), acrylonitrile butadiene styrene (ABS) and others.
Powder	DMLS–direct metal laser sintering	Any metal alloys
	EBM–electron beam melting	Titanium alloys, cobalt-chromium alloys, stainless steel, aluminum
	SLM–Selective laser melting	Ti alloys, Cr-Mo alloys, stainless steel, Al alloys.
	SHS–Selective heat sintering	Powder thermoplastics
Jet	SLS–Selective Laser Sintering	Thermoplastics, metal powders, ceramic powders
	3DP–Three-Dimension Print	Gypsum, plastics, metal powders, sand mixtures
Laminations	LOM–Laminated Object Manufacturing	Sheet material (paper, metal foil, plastic film)
Polymerizations	SLA–Stereolithography	Photopolymers
	DLP–Digital Laser Processing	

Technological advances in hardware and the development of digital modeling are making additive manufacturing cheaper and more accessible, including through a paradigm shift in terms of printers - instead of selling equipment, leasing or 3D printing as a service is offered. SmarTech experts estimate the polymer 3D printing market for equipment and related materials at \$11.7 billion in 2020. The main manufacturers of polymer materials for 3D printing are DSM (Netherlands), SABIC (Saudi Arabia), BASF (Germany), Arkema (France), Solvay (Belgium), and Carbon (USA) [9].

According to AMPPOWER, the global metal additive manufacturing market was valued at \$2.44 billion in 2019, including equipment, materials, and service. This value is forecast to reach \$7.1 billion by 2024. The key players are GKN Plc (UK), Rio Tinto (UK), Hitachi Chemical (Japan), ATI Powder Metals (US), and Sandvik (Sweden) [10].

The analysis of patent and publication activity in the field of additive manufacturing and technologies shows a growing interest in both the technology itself and its application areas. The leading countries in terms of publication and patent activity in this area over the past five years are the USA, China, Germany, and the UK. United Technologies has the largest number of patents in the field of additive technologies among global companies, Figure 1 [10].



**Figure 1.** The leading global companies, holding the largest number of patents in the field of additive technologies [10].

The additive technology industry will continue to grow at a high rate over the next 10 years, with annual growth rates ranging from 18% to 36% for various market segments [10]. Automotive will remain the largest market (over \$7 million), followed by consumer products, aerospace, commercial and industrial equipment, and prototyping [10]. Market participants have high hopes for the aerospace and aeronautics industries, which are expected to become one of the top three industries.

NASA, the J. Marshall Space Flight Center (Huntsville) and Directed Manufacturing conducted a firing test of an injector developed as part of the U.S. government’s Space Launch System super-heavy manned launch vehicle program [2]. A 3D-printed jet engine component

with only two parts was presented, while similar injectors made with traditional technologies included 115 parts. The properties of the injector material (powdered nickel-chromium alloy) were tested under extreme conditions. During the tests, liquid oxygen and gaseous hydrogen were injected into the combustion chamber through the injector, thus increasing the engine thrust by 10 times [2].

There are some things that cannot be done in the conventional Manufacturing way. For example, from the point of view of gas dynamic efficiency, the blade outlet edges (blade tips of compressors and turbines) must be very thin. The use of Additive Technologies (AT) makes it possible to obtain edges with a thickness of about 0.15 mm. This is impossible to achieve by casting, and thin edges result in higher efficiency.

**Table 2.** Comparison of jet engine injector fabrication methods.

Parameters	SLM 3D printing	Traditional processing methods
Time spent	3 weeks, 40 hours for production	24 weeks
Number of part components	1	4
Number of welded joints	0	5
Part cost	\$5000	\$10000

This is the new quality that unleashes the hands of designers [1]. To maximize the benefits of AT, part design can go beyond the designer's experience and established design approach. For example, for aircraft engine parts, one of the objectives is to minimize the mass of the structure while satisfying strength constraints under given operating conditions, but the strength properties of a "printed" blade will be different from those of a part produced by traditional methods. So before you can "print" a part and put it on an engine, you have to do a lot of extra research. Aircraft engine companies all over the world are now studying the properties of such products first on samples, then in real parts, the strength characteristics of which depend not only on the chemical

composition of the material, but also on the type of semi-finished product, as well as on heat treatment modes. In the case of AT, there are many more parameters affecting strength.

In powder materials, it is not only the chemical composition, but also the size of the granules, size variation, their geometry, inclusions, manufacturing method, etc., which demonstrates the multivariable of additive technology. In laser processes it is the power of the beam, the direction of its tracks, the size of the spot, and the exposure time. The structure of the part is obtained inhomogeneous, and the mechanical characteristics are anisotropic in the growing direction and the characteristics are generally different in the transverse direction.

Thus, simultaneously with the part, in fact, its production technology is developed, so in the case of AT we are no longer talking about design engineering, but about the search for a design and technological solution, since physical and mechanical properties, strength and other characteristics of the part are established in the process of its manufacture.

The market for additive technologies is changing rapidly, mergers and acquisitions of machine manufacturing companies are taking place, new service centers are emerging, these centers are joining the European and now global network. The main use case for 3D printing now is primarily meeting the rapidly changing needs in research and laboratory experiments.

The use of additive technologies for manufacturing computer-optimized geometries of physical objects and their experimental study will lead to the strengthening of interaction between professional communities engaged in experimental and model-design work. Additive manufacturing represents a new path in terms of energy efficiency, cost effectiveness and time savings when producing objects [13–15].

Furthermore, it makes it possible to produce shapes and geometry that might not be possible through any

other process. Possibilities include parts that have highly complex internal channels, parts that require voids, or honeycomb-like structures for weight savings. Additionally, additive manufacturing can eliminate assembly work because a part made up of small components can be built as a single piece [16–18].

A wide variety of parts can be created using AT, including engine components and other parts for the real aircraft, and its prototype for the laboratory experiments. In this report we are sharing our experience of designing and manufacturing half wing prototypes of aircraft with and without winglets.

## 2. MATERIALS AND METHODS

Artillery Sidewinder SW-X2 3D Printer was used to produce half wings prototypes parts. Three types of material were evaluated for the manufacture of the half wings which were: PLA, ABS and PET. After evaluating the properties and availability of each material, it was decided to work with PLA because it is more resistant and has better thermal properties. Two rolls of 3mm diameter PLA filament from eSun brand were used for our project.

## 3. RESULTS AND DISCUSSION

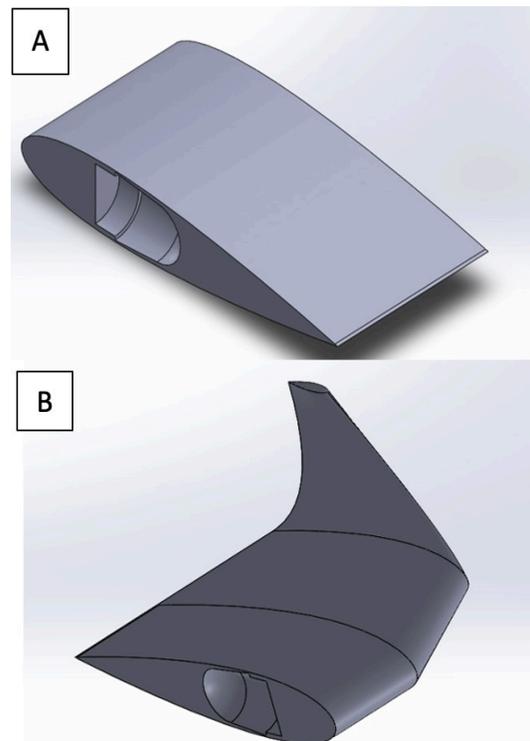
### 3.1. Design of 3d models of half wings with and without winglet and cad files

The first design of the half wing was made with the selected wing profile. In the first instance, two half wings with and without winglet were designed with the space corresponding to the sensor (approximate measurements). Figures 2 show the first two designs with approximate measurements. As it is a symmetric wing profile, the position of the sensor was placed in the center of each half wing, so that the same geometric design could be used for each one.

This design was made in Solidworks. Subsequently, the file was saved to carry out the additive manufacturing tests and check that the sensor could be placed inside the half wings. But design, presented on figures 2 [A] and [B] was

not feasible since, after the first additive manufacturing test, it was seen that its dimensions were not optimal and that it was not possible to place the vibration sensor in the space intended for it, therefore what proceeded to make the modifications and changes to the design.

Then, a 3D model was made again based on approximate measurements of the sensor. The second additive manufacturing test was carried out to check that the sensor could be placed in the space intended for it. Finally, after the manufacturing tests of the first two designs, a 3D model was designed using the specifications of the vibration sensor data sheet, so that its correct assembly was possible. In addition, the shaft bore and space for the ferromagnetic rod were added that would help to hold the sensor inside the half wings.

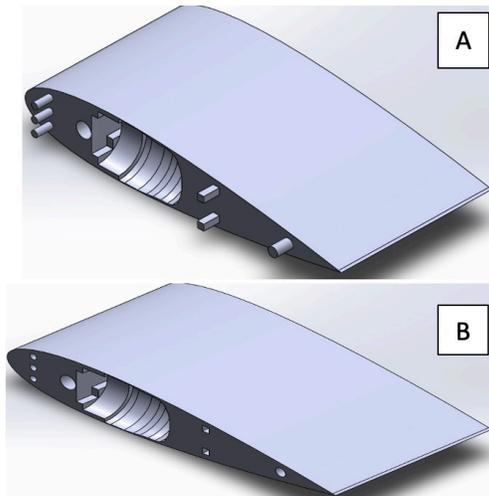


**Figure 2.** First design without [A] and [B] design with winglet.

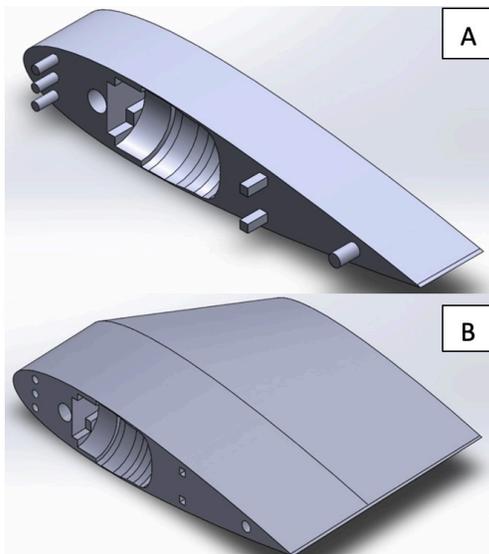
Additionally, it was decided to cut the models of the semi wings and add elements that would facilitate their assembly. Figures 3 show the final design of the half wing without winglet, while in figures 4 the final design of the

half wing with winglet. Figures 5 show the assemblies of the parts of each half wing: the assembly of the half wing without winglet in figure [A] and the assembly of the half wing with winglet in figure [B].

In the design of both half wings, the same wing profile was used throughout its entire surface, even in the winglet design. Likewise, it was decided to design a winglet with an angle of inclination of  $90^\circ$ .



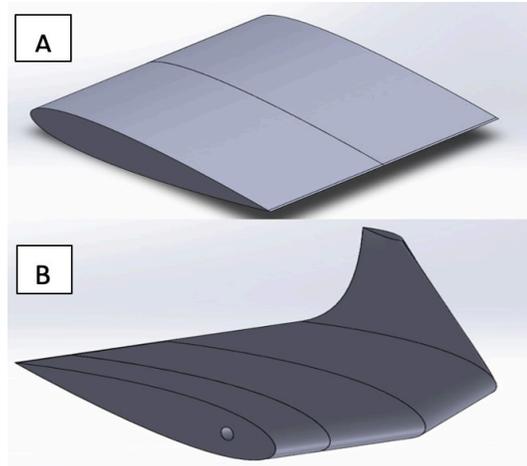
**Figure 3.** Final design half wing without winglet “Part 1” [A], and “Part 2” [B].



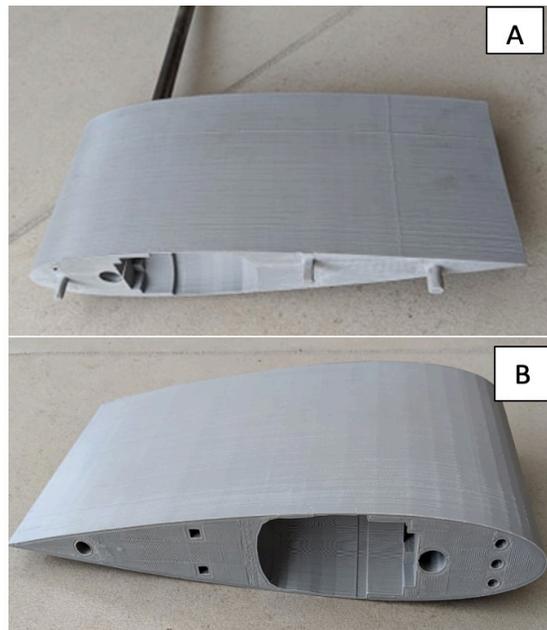
**Figure 4.** Final design half wing with winglet “Part 1” [A], and “Part 2” [B].

### 3.2 Final additive manufacturing process

Once the final design was made, the final impression of each part of both half wings was made, in total 5 pieces were manufactured, those shown in figures 6 [A] and [B] corresponding to the half wing without winglet, and those shown in the Figures 7, 8, and 9 corresponding to the semi wing with winglet.



**Figure 5.** Final wing assembly without winglet [A], and with winglet [B].



**Figure 6.** Part 1 [A] and Part 2 [B] of wing without winglet.

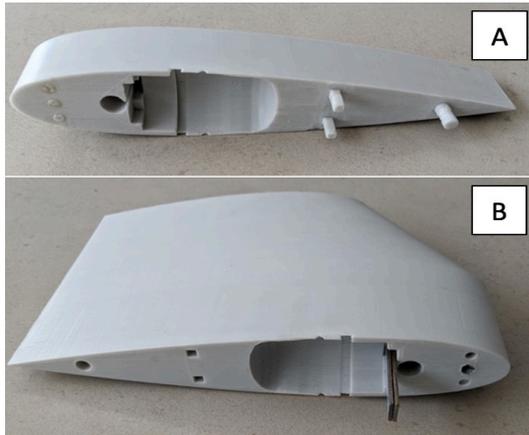


Figure 7. Part 1 [A], and Part 2 [B] of wing with winglet.

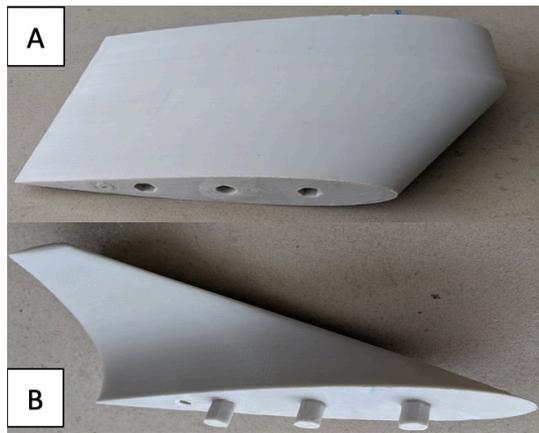


Figure 8. Part 12 [A], and Part 3 [B] of wing with winglet.

Finally, the half wings manufactured by means of additive manufacturing and covered with the black vinyl layer, shown above, were used to complete vibration analysis in subsonic wind tunnel. Figure 11 shows the half wing with winglet mounted on the testing area of wind tunnel. As mentioned above both half wings (wing without and with winglet) were prepared for the vibration analysis in subsonic wind tunnel. This investigation was merely focused on obtaining data and information related to the internal vibrations of the half wings, to make a comparison of the results of the analysis of each half wing. In general, the results of vibration experiments are the subject of another talk and publication, in this paper we have shared only part of the project related to additive technology and processes.

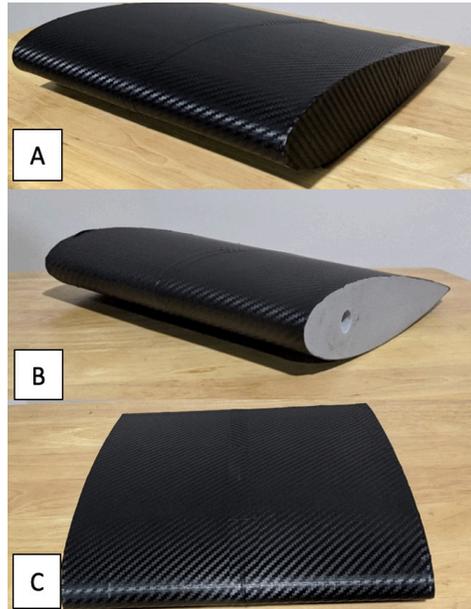


Figure 9. Final wing assembly without winglet [A, B, and C].

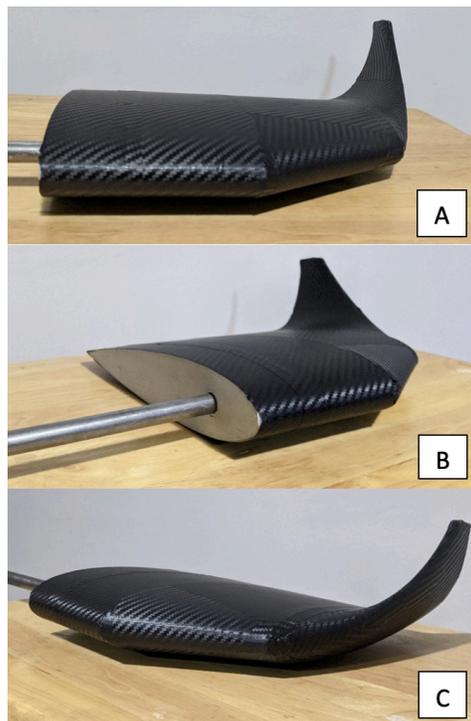
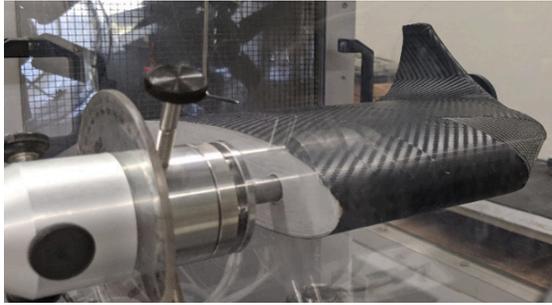


Figure 10. Final wing assembly with winglet [A, B, and C].



**Figure 11.** Half-wing with winglet mounted in testing.

### CONCLUSIONS

In this publication presented the analysis and importance of Additive Technology and Manufacturing processes in general and particularly for laboratory experiments in Aeronautics.

The conducted analysis of scientific works makes it possible to conclude that the use of additive technologies for manufacturing computer-optimized geometries of physical objects and their experimental study will lead to the strengthening of interaction between professional communities engaged in experimental and model-design work.

If necessary, by interfacing with analytical equipment, analyses can be performed while integrating detection devices into the process system during production. In addition, additive manufacturing facilitates the use of equipment prototyping concepts.

### ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank IIT UACJ for free access to the Aerodynamics equipment (Wind Tunnel) and manufacturing equipment (3-D printers) used to complete experimental activities.

### CONFLICT OF INTEREST

The authors do not have any type of conflict of interest to declare.

### REFERENCES

- [1] Wohlersadmin, "Wohlers report 2014 uncovers annual growth of 34.9% for 3D printing and additive manufacturing industry," Wohlers Associates, [Online]. Available: <https://wohlersassociates.com/press-releases/wohlers-report-2014-uncovers-annual-growth/>
- [2] C. V., "The Faces of Additive Manufacturing: Terry Wohlers," 3Dnatives. <https://www.3dnatives.com/en/terry-wohlers-faces-additive-manufacturing-terry-120820194/>
- [3] F. Kotz, K. Arnold, W. Bauer, et al., "Three-dimensional printing of transparent fused silica glass," *Nature*, vol. 544, pp. 337–339, 2017. <https://doi.org/10.1038/nature22061>
- [4] A. Zocca, C. Gomes, A. Staude, E. Bernardo, J. Günter, and P. Colombo, "SiOC ceramics with ordered porosity by 3D-printing of a preceramic polymer," *Journal of Materials Research*, vol. 28, no. 17, pp. 2243–2252, 2013. <https://doi.org/10.1557/jmr.2013.129>
- [5] C. Wang, W. Ping, Q. Bai, et al., "A general method to synthesize and sinter bulk ceramics in seconds," *Science*, vol. 368, no. 6490, pp. 521–526, 2020. <https://doi.org/10.1126/science.aaz7681>
- [6] A.J. Capel, S. Edmondson, S.D. Christie, R.D. Goodridge, R.J. Bibb, and M. Thurstans, "Design and additive manufacture for flow chemistry," *Lab Chip*, vol. 13, no. 23, pp. 4583–4590, 2013. <https://doi.org/10.1039/c3lc50844g>
- [7] P.J. Kitson, G. Marie, J.P. Francoia, et al., "Digitization of multistep organic synthesis in reactionware for on-demand pharmaceuticals," *Science*, vol. 359, no. 6373, pp. 314–319, 2018. <https://doi.org/10.1126/science.aao3466>
- [8] A.T. Kearney Analysis, "3D Printing Ensuring Manufacturing Leadership in the 21st Century," [Online]. Available: [www.muctr.ru/upload/university/departments/cpirtk/digest/AT.pdf](http://www.muctr.ru/upload/university/departments/cpirtk/digest/AT.pdf)
- [9] SMARTTECH (SMART MANUFACTURING SOLUTIONS), [Online]. Available: <https://www.smarttech.com>
- [10] AMPPOWER (Additive Manufacturing Consulting), [Online]. Available: <https://ampower.eu/>

- [11] P.T. Anastas, V. Sans, V. Dragone, and L. Cronin, "Applications of 3D Printing in Synthetic Process and Analytical Chemistry," in *Handbook of Green Chemistry*, P.T. Anastas (Ed.), 2020. <https://doi.org/10.1002/9783527628698.hgc141>
- [12] D. Dimitrov, K. Schreve, and N. de Beer, "Advances in three-dimensional printing – state of the art and future perspectives," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 12, pp. 136–147, 2006. <https://doi.org/10.1108/13552540610670717>
- [13] M. Symes, P.J. Kitson, J. Yan, C. Richmond, G. Cooper, R. Bowman, T. Vilbrandt, and L. Cronin, "Integrated 3D-printed reactionware for chemical synthesis and analysis," *Nature Chemistry*, vol. 4, pp. 349–354, 2012. <https://doi.org/10.1038/nchem.1313>
- [14] C. Parra-Cabrera, C. Achille, S. Kuhn, and R. Ameloot, "3D printing in chemical engineering and catalytic technology: structured catalysts, mixers and reactors," *Chem Soc Rev*, vol. 47, no. 1, pp. 209–230, 2018. <https://doi.org/10.1039/c7cs00631d>
- [15] J.A. Moulijn, A. Stankiewicz, J. Grievink, and A. Gorak, "Process intensification and Process System Engineering: A friendly symbiosis," in *16th European Symposium on Computer Aided Process Engineering and 9th International Symposium on Process Systems Engineering*, 2006. [https://doi.org/10.1016/S1570-7946\(06\)80023-4](https://doi.org/10.1016/S1570-7946(06)80023-4)
- [16] Edited by Frerich Johannes Keil, "Process intensification," [Online]. Available: <https://www.degruyter.com/view/j/revce.2018.34.issue-2/revce-2017-0085/revce-2017-0085.xml> (Publication Date: 15.05.2020)
- [17] European roadmap of process intensification / Creatieve Energie, [Online]. Available: [https://traxxys.com/wpcontent/uploads/2017/05/2.2.8.1\\_Technology\\_Report\\_Reactive\\_Distillation\\_Schoenmakers.pdf](https://traxxys.com/wpcontent/uploads/2017/05/2.2.8.1_Technology_Report_Reactive_Distillation_Schoenmakers.pdf) (Publication Date: 15.05.2020)
- [18] R. Christoph, R. Muñoz, and Á. Hernández, "Manufactura Aditiva," *Realidad y Reflexión*, vol. 43, pp. 98-109, 2016. <https://doi.org/10.5377/ryr.v43i0.3552>

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE TURBINA DE VAPOR

### Design and construction of a steam turbine prototype

Carlos Moreno Montañez<sup>1</sup>, Jhon Gonzalez Rios<sup>1</sup>, Williams Hincapie Campos<sup>2</sup>, Víctor Carrillo Alvarez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Estudiante de pregrado en Ingeniería Mecánica, Fundación Universitaria los libertadores, Colombia.

<sup>2</sup>Grupo de investigación GIDAD, Facultad de ingeniería y ciencias básicas, Fundación Universitaria los Libertadores, Colombia. Email: [jfgonzalezr@libertadores.edu.co](mailto:jfgonzalezr@libertadores.edu.co)

(Recibido 30 de Octubre de 2023 y aceptado 28 de Noviembre de 2023)

#### Resumen

Uno de los pilares más importantes en el desarrollo intelectual de los estudiantes de ingeniería mecánica es que sean capaces de diseñar, fabricar e interactuar con diferentes tipos de maquinaria en diferentes entornos. Dentro de los cuales están las máquinas térmicas. Una problemática presente en la Fundación Universitaria Los Libertadores es que cuenta con una caldera pirotubular, pero no con un equipo que permita aprovechar el vapor generado, problemática que dio origen a esta investigación. Para esto se tomaron como base los diferentes modelos industriales de impulsores con aplicaciones hidráulicas y se extrapolaron para que su funcionamiento sea con vapor. Para el diseño se utilizaron aleación de aluminio y aceros para herramientas con diferentes procesos de mecanizado tales como: torneado, fresado, soldado y fundición. Se determinó que el diseño funcionó bajo las condiciones de presión y temperatura de la caldera generando una velocidad angular de 15822 rpm.

**Palabras clave:** diseño, turbina, impulsor, axial, árbol motriz, CAD.

#### Abstract

One of the most important pillars in the intellectual development of mechanical engineering students is that they can design, manufacture, and interact with different types of machinery in different environments. Among which are thermal machines. A problem present in the Fundación Universitaria Los Libertadores is that it has a pyrotubular boiler, but no equipment to take advantage of the steam generated, a problem that gave rise to this research. For this purpose, the different industrial models of impellers with hydraulic applications were taken as a basis and extrapolated so that their operation is with steam. Aluminum alloy and tool steels with different machining processes such as turning, milling, welding, and casting were used for the design. It was determined that the design worked under the pressure and temperature conditions of the boiler generating an angular velocity of 15822 rpm.

**Keywords:** design, turbine, impeller, axial, drive shaft, CAD.

## 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los pilares de la Ingeniería mecánica es la transformación de energía en trabajo útil, por esto es importante que los futuros ingenieros mecánicos conozcan las diferentes formas de transformación de potencia, particularmente las máquinas térmicas [1]. En este sentido, es importante estudiar el ciclo que dio paso a la revolución industrial, y sigue siendo vigente en la industria de generación de energía eléctrica, conocido como ciclo Rankine [2]. Uno de los procesos que se encuentra dentro de este ciclo, es la turbina de vapor o cilindro de expansión; los cuales son encargados de transformar la energía de vapor que llega de la caldera en energía mecánica útil, esta potencia mecánica se puede aplicar directamente a un componente mecánico [3] o pasar a un generador eléctrico que es el uso habitual del ciclo Rankine en las termoeléctricas [4].

De manera que desde la formación de los futuros ingenieros es crucial comprender cómo funciona los diferentes componentes del ciclo y para esto es necesario hacer simulaciones en laboratorios especializados o en simuladores computacionales, los cuales son escasos en varias instituciones de enseñanza debido a su costo y de encontrarse, estos se encuentran obsoletos. Para mayor comprensión de la importancia de las turbinas a continuación, se hace una corta mención sobre los tipos, sus componentes y diferentes aplicaciones:

### 1.1 Turbina

Es un dispositivo mecánico que convierte la energía de un fluido en energía mecánica rotativa. Las turbinas se utilizan en una variedad de aplicaciones, desde la generación de energía eléctrica hasta la propulsión de aviones y barcos. Hay varios tipos de turbinas [5] su clasificación, ventajas y desventajas se presentan en la Tabla 1.

### 1.2 Impulsor

Órgano giratorio de máquinas centrifugas, estas son paletas o aletas en los que se produce el intercambio de energía con el fluido activo. Los rodets son atravesados por algún fluido, su dirección puede ser radial o axial y

ambos tipos de rodets tienen ventajas y desventajas que dependiendo de en función del uso se especifica la entrada del fluido.

De manera que la turbina de vapor sigue siendo un mecanismo utilizado en la actualidad, en este sentido, existen trabajos donde se han corrido diferentes simulaciones. Tal es el caso del estudio realizado por L. Milla, en el cual se estableció la importancia de la caldera pirotubular para la generación de vapor con turbina, dando a conocer casos prácticos tales como centrales térmicas. En este estudio, se desarrollaron cálculos del rendimiento de la turbina, no obstante, no se deja claridad del tipo de turbina usada, si esta es radial o axial, concluyendo la importancia en el estudio y comprensión del funcionamiento de calderas y turbinas de vapor [7].

En otro trabajo realizado por J. Espinilla, se dio a conocer la importancia de la turbina de vapor modelando un diseño CAD en el programa FreeCad y un programa de impresión 3D. En este trabajo, se da un paso a paso del diseño de la turbina mediante el programa, para su posterior impresión. En este caso se obtuvo una turbina Brown Boveri con una velocidad angular de 3000 rpm, se le adicionó una válvula de regulación de flujo, igualmente impresa en 3D para un valor medido de presión de 12 kg/cm<sup>2</sup> con el fin de poder demostrar las habilidades con dos diferentes programas y el uso didáctico de la turbina [8].

De igual forma, el autor N. Alejandro realizó el paso a paso del cálculo y diseño de una turbina a vapor, en el estudio priorizó los aspectos para tener en cuenta al momento de modelar una turbina, con el objetivo de demostrar un método diferente de desarrollo para el diseño de esta. De esta forma, tener mayor eficiencia y mejor respuesta en los pasos internos para la automatización en el proceso de fabricación de la turbina [9].

En la actualidad, el fabricante más conocido de motores es la empresa multinacional SIEMENS, con un catálogo de turbinas de vapor adaptables a la necesidad del cliente [10]. Entre estas se encuentra el modelo "SST-800", este es usualmente utilizado en procesos de producción

**Tabla 1.** Clasificación de turbinas.

Clasificación	Descripción	Ventajas [6]	Desventajas	Aplicaciones
Turbina de flujo axial	Es la más utilizada, donde el vapor se realiza mediante un cono que direcciona el vapor hacia el mismo eje permitiendo así su movimiento [5].	- Son las más utilizadas - Trabajan con fluidos compresibles - Son más eficientes	Mayor tensión térmica soporta menos esfuerzos.	- Generadoras de energía mecánica - Motores térmicos - Motores de propulsión
Turbina de flujo radial	En este caso el vapor se introduce mediante todas las direcciones perpendiculares permitiendo así el movimiento del eje de la turbina [5].	- Menor tensión mecánica - Menor tensión térmica	Menos eficiente	

de papel y celulosa. A nivel nacional, la refinería de Cartagena “REFICAR” realizó una optimización durante el año 2014 con el objetivo de satisfacer la demanda, para esto se actualizaron sus componentes y se modificó la red eléctrica para ser autosuficiente [11].

Dentro de las principales centrales termoeléctricas en Colombia se cuenta con las siguientes turbinas [12]:

- Tebesa con producción de 877 megavatios (MV).
- Termosierra con producción de 455 megavatios (MV).
- Termoflores con producción de 441 megavatios (MV).
- Termoemcali con producción de 233,8 megavatios (MV).
- Termovalle con producción de 205 megavatios (MV).

Con base en lo anterior expuesto, en este trabajo se planteó el cálculo, diseño y construcción de un prototipo de turbina de vapor. Para tal fin se utilizó modelos de impulsores estandarizados aplicables en la industria hidráulica, de esta forma, se busca determinar si el modelo sirve para trabajar con vapor. Con el presente estudio, se puede suplir una necesidad en la Fundación Universitaria Los Libertadores, particularmente, dentro del programa de pregrado de ingeniería mecánica el cual cuenta con una caldera operativa, pero no con la turbina respectiva que permita desarrollar la práctica del ciclo Rankine. Además, que este trabajo permeará futuros trabajos de investigación o apoyar futuras especializaciones como generación eléctrica.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Inicialmente se consultaron varios catálogos de proveedores de equipos hidráulicos [13–14]. Las medidas

del impulsor a prototipar se muestran en la tabla 1, junto con la imagen que indica a que corresponde cada medida. En la figura 1 se muestran tres tipos impulsores que se probarán con aire a presión, los cuales se fabricaron en material de cartón según las medidas de la tabla 1, y diferente número de alabes. Posteriormente, se determinó el impulsor con mayor velocidad angular, para esto se sometieron a un ensayo con aire comprimido por medio de un compresor con capacidad de 800 kPa. Los tres modelos fueron probados bajo las mismas condiciones de trabajo, su velocidad fue medida mediante un tacómetro de marca ERASMUS ERC-100, además se midieron los decibeles generados mediante un mini sonómetro Eq&Md data logging 8852. La importancia de este ensayo radica en la potencia, la cual es directamente proporcional a la velocidad angular según la ecuación 1:

$$P = \omega \cdot T \quad (1)$$

Donde:

$P$  es potencia

$\omega$  es velocidad angular

$T$  es torque

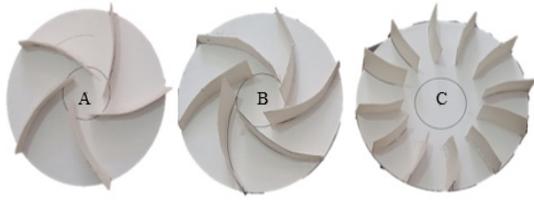
Para el movimiento circular el torque se calculó utilizando la ecuación 2.

$$T = I \times \alpha \quad (2)$$

Donde:

$I$  representa el momento de inercia

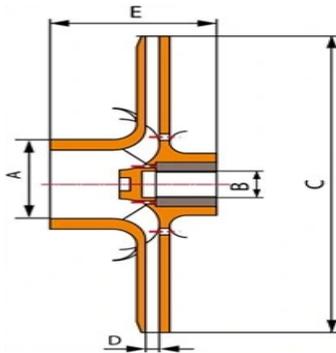
$\alpha$  representa la aceleración angular



**Figura 1.** Impulsores fabricados en cartón.

Como I, depende de la geometría y el material del impulsor este valor cambia según el tipo de impulsor. En este trabajo no se realizó cálculos de potencia, abriendo posibilidad de estudio en futuros trabajos. Se realizó diseño en CAD del impulsor seleccionado mediante el software SolidEdge. Paralelamente, el diámetro del árbol motriz se seleccionó por catálogo conforme la tabla 1. El prototipo está planteado para ser fácilmente transportado por su peso y tamaño.

**Tabla 1.** Valores de las medias seleccionadas [13-14].



Potencia	372,85 W (1/2 HP)
A	40,5 (mm)
B	11,5 (mm)
C	121 (mm)
D	4,5 (mm)
E	48,5 (mm)

En el estudio se planteó alcanzar un fácil montaje en un futuro, que facilite el armado y desarmado modular para poder visualizar sus componentes. Esto debido a que está diseñada para que los estudiantes de ingeniería puedan interactuar con el equipo, detallar y/o estudiar sus componentes, así como para una posterior reparación.

Luego se harán pruebas piloto de la turbina mecanizada con la caldera pirotubular Tecnik de 6 HP.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Simulación

Los resultados de las velocidades de los modelos realizados se muestran en la tabla 2. Como se observa en la tabla el impulsor A tiene una mayor velocidad angular, lo cual está de acuerdo con la teoría que se menciona según las referencias [13–14].

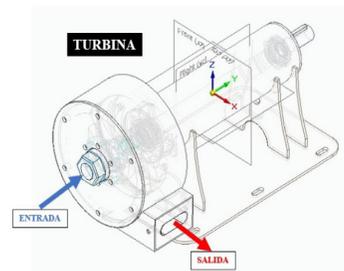
**Tabla 2.** Velocidades de los diferentes impulsores.

Modelo	Nº Alabes	Velocidad (rpm)
A	5	840
B	6	640
C	12	530

#### 3.2. Mecanizado

Seguido a la selección del impulsor éste se modeló en el software SolidEdge. En la figura 2 se aprecia el modelo CAD de la turbina, además se indica la entrada y salida del vapor. El alabe se mecanizó en aluminio AC 46500 en una pieza fundida y posteriormente, se sometió a un mecanizado de desbaste para ajustarlo a las tolerancias y ajustes estandarizados según normas ISO.

La carcasa se diseñó con acero ANSI 1020 de 1/8" de espesor, la cual se sometió a un corte láser para laminas como se detalla en la figura 3. Allí se puede observar el bosquejo de la carcasa.



**Figura 2.** Modelo CAD turbina.

Posteriormente, se continuó con el árbol de transmisión tendiendo como entra en diámetro del impulsor utilizando acero ANSI 1045 con una dureza de 180 Brinell.

Este se mecanizado mediante método de torneado. En la figura 4 se muestra una vista frontal del árbol. Los ajustes utilizados son de agujero único, con un valor de H7 un ajuste de transferencia de movimiento.

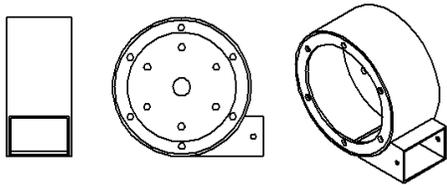


Figura 3. Bosquejo carcasa.



Figura 4. Vista del árbol.

Todas las piezas fueron zincadas para dar más resistencia a la corrosión. Para finalizar, la polea fue mecaniza en AC 46500, por el método de fundición para una mejor comprensión de la turbina. En la figura 5, se muestra una vista 3D con la lista de los diferentes componentes que se mencionaron anteriormente en la tabla 2.

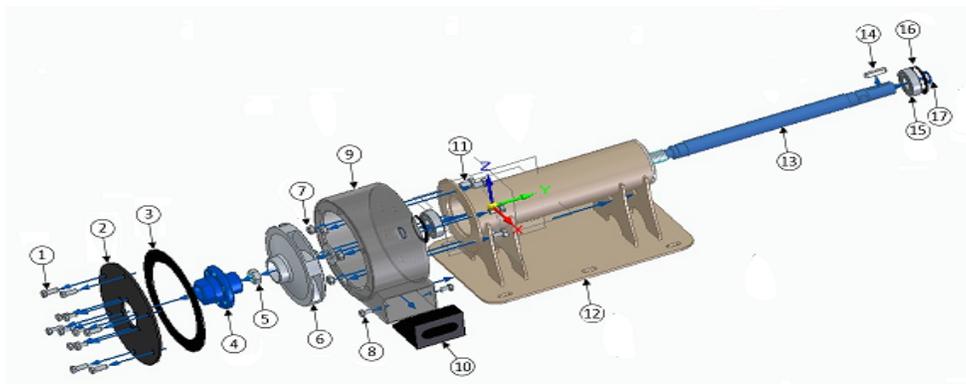


Figura 5. Vista en explosión.

Tabla 3. Componentes de la turbina listado de la figura 5.

Item	Componentes	Cantidad	Material
1	Tornillo m5 x 20	6	NA
2	Pata carcasa	1	LÁMINA HR 1/8
3	Empaque	1	NA
4	Acople	1	Acero AISI / SAE 1045
5	Tuerca seguridad M14	1	NA
6	Impulsor cerrado	1	ALUMINO
7	Tuerca seguridad M6	6	NA
8	Tornillo M5 x 10	8	NA
9	Carcasa	1	LÁMINA HR 1/8
10	Reductor de salida	1	UHW
11	Tornillo m6 x15	6	NA
12	Bastidor	1	LÁMINA HR 1/8
13	Arbol	1	Acero AISI / SAE 1045
14	Cuña 5x5	1	NA
15	SS 6003-ZZ	2	NA
16	I35	2	NA
17	A17	2	NA

### 3.3 Ensayos con la caldera

En la figura 6 se muestra el diagrama de montaje de la turbina con la caldera. La temperatura alcanzada al momento que la caldera realiza el stop una vez alcanza su presión máxima se encuentra en 155°C o 311 F como se presenta en la figura 7. La turbina en funcionamiento, así como el registro de las medidas de velocidad angular son presentados en la Figura 8.

Caldera pirotubular
Salida de la caldera con tubería de diámetro de 1 pulgada.
Adaptación con acople de tubería para pasar de 1 pulgada a ½ pulgada
Manguera con capacidad para altas temperaturas de ½ pulgada
La manguera se conecta mediante entrada tipo macho de ½ pulgada hacia la turbina
La caldera se encuentra para una presión de trabajo de 551 kPa

Figura 6. Descripción del montaje realizado.

En la Tabla 4 se presenta la velocidad alcanzada en la caldera pirotubular, cabe mencionar que esta velocidad de giro fue realizada con una presión máxima de 80 psi y una presión media de 40 psi. Esta medición se realizó a través de un tacómetro ERASMUS ERC-100 con la válvula de globo completamente abierta para ambos casos. Según la literatura los rpm reportados son desde 9000 rpm a 40 bar [15], 7500 rpm [16] y 6000 rpm [7]. Lo cual es un indicador apropiado de acuerdo con la ecuación 1, la velocidad tangencial calculada fue de 957,23 m/s.

Tabla 4. Velocidades medias con el vapor.

Presión (kPa)	Velocidad (rpm)
275	7145
551	15822

Por último, se tomó registro de la cantidad de decibeles registrados al momento de estar operando la turbina, la medición se realizó con la ayuda de un mini sonómetro de marca Eq&Md. En este se realizó la medición a un metro de separación de la turbina y el micrófono. Los resultados

obtenidos se encuentran registrados en la tabla 5. A modo de comparación se asemejó con una turbina radial para identificar si la turbina fabricada genera más o menos decibeles.



Figura 7. Montaje realizado caldera y turbina.



Figura 8. Mediciones de velocidad angular.

De acuerdo a los resultados obtenidos, los niveles están dentro de los parámetros reportados, al compararlos con

los decibeles registrados en una central termoeléctrica, los cuales se encontraron entre 76.0 dB y 74.9 dB [17] excediendo los LMP. De acuerdo a previos estudios [18] sobrepasar el valor de 65 dB se considera inaceptable. De manera que los valores de la turbina que se diseñó dentro de la presente investigación se encuentran dentro de los parámetros admisibles.

### AGRADECIMIENTOS

Los investigadores agradecen a Auto pack LTDA por la ayuda prestada en la realización de la turbina.

### CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores no tienen conflictos de interés que declarar.

### CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó un prototipo de turbina que funcionará con vapor con base a modelos de turbinas hidráulicas. Este diseño sirve para fortalecer el laboratorio de máquinas térmicas de la Fundación Universitaria Los Libertadores y futuros trabajos de investigación o especializaciones en áreas térmicas.

En el desarrollo de las pruebas iniciales de la turbina se evidenció que los rodamientos (6003) de empaque plástico no soportaron la temperatura generada por el valor producido por la caldera, lo que lleva a que más adelante estos sean remplazados con rodamientos de empaque metálico e inoxidable (SS6003ZZ) para mejorar su funcionamiento y alargar su vida útil.

Se comprobó que los componentes como el impulsor y eje estandarizados tienen la capacidad de operar en condiciones de presión y temperaturas propuestas para el aprendizaje de los futuros ingenieros de la Fundación Universitaria Los Libertadores.

La evidencia presentada nos llevó a concluir la importancia en la actualidad de los motores térmicos, particularmente, el extenso uso de turbinas de vapor para la generación de electricidad en termoeléctricas.

En este artículo se diseñó una turbina partiendo de catálogos de uso para turbinas hidráulicas, en futuras investigaciones se representarán los cálculos como lo son: potencia, carga eléctrica generada y su modelado a través de programas computarizados para la visualización del comportamiento.

### REFERENCIAS

- [1] D. F. V. Castillo, "Máquinas térmicas mesoscópicas : Protocolos y su caracterización," Universidad De Los Andes, 2023.
- [2] S. Fusté Paredes, "análisis termodinámico de los ciclos de Rankine Sergi Fusté Paredes," p. 137, 2015. <https://doi.org/10.2099.1/25938>
- [3] N. Medina, "De locomotoras de vapor" Elem. Cienc. y Cult., pp. 33–39, 2006.
- [4] B. Cortes, R. L. Justiz Casas, I. J. Esquivel, L. F. Prieto Montenegro, S. I. Barreto Torrella, and A. P. Sánchez, "Uso Racional del Agua en Centrales Termoeléctricas," Prod. y Limpia, vol. 16, no. 2, pp. 92–111, 2021. <https://doi.org/10.22507/pml.v16n2a5>
- [5] López S, A. Lupión R, P. López R, A. Fanjul, and C. Nuñez, "Especial Turbinas de Vapor," Energiza, p. 53, 2011. [Online]. Available: [www.energiza.org](http://www.energiza.org)
- [6] D. A. Hernán L, "Análisis de Fallos en Turbinas de Vapor: Causas, Mecanismos y Prevención," 2018.
- [7] L. M. Lostaunau, "Calderas y turbinas de vapor para la generación de energía eléctrica," Electrónica-UNMSM, pp. 18–26, 2007. [Online]. Available: <http://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/electron/article/view/3552>
- [8] F. J. Espinilla Peña, "Elaboración de un modelo 3D de una turbina de vapor," Universidad de La Laguna, 2018.
- [9] T. NASHIKI MUÑOZ, "Desarrollo del Diseño de una Turbina de Vapor de Potencia Baja," Instituto Politécnico Nacional, 2016.
- [10] Siemens AG, "Siemens Steam Turbine SST5-9000," p. 5, 2011. [Online]. Available: [http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-generation/steam-turbines/SST-9000/SST-9000\\_Data\\_sheet.pdf](http://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-generation/steam-turbines/SST-9000/SST-9000_Data_sheet.pdf)

- [11] Refinería de Cartagena S.A., “Refinería de Cartagena un proyecto en sólida expansión,” 2014, p. 8.
- [12] Caracol radio, “Colombia cuenta con 15 termoeléctricas para apoyar el sistema energético,” 2016. [https://caracol.com.co/radio/2016/03/02/nacional/1456878900\\_386397.html](https://caracol.com.co/radio/2016/03/02/nacional/1456878900_386397.html)
- [13] Fesmex, “Impulsores”, 2020. <https://www.fesmex.com.mx/article/tipos-de-impulsores/>
- [14] Trisunltd, “impeller”, 2023. <https://www.trisunltd.com/shop/plastic-and-rubber-impeller>
- [15] S. L. Zuñiga, “Diseño de una turbina experimental de vapor de baja potencia,” pp. 1–136, 2016.
- [16] C. A. Peña Guerrero, “Cambio de las etapas de una turbina de vapor industrial,” pp. 1–79, 2015.
- [17] B. del rocío Lastra, “Diseño de un plan de gestión de ruido ambiental generado por la central termoeléctrica Trinitaria,” Universidad Agraria del Ecuador, 2015.
- [18] M. Domínguez Alejo, “Elaboración del mapa de ruido de a termoeléctrica Antonio Guiteras con la utilización del software Smaart 7,” Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos,” 2014.



## **CRITERIOS GENERALES PARA LA PRESENTACIÓN DE ARTÍCULOS REVISTA INGENIERÍA, INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA, SECCIONAL SOGAMOSO**

La Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo I2+D, es una publicación que se edita semestralmente y maneja una convocatoria permanente, financiada por la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Seccional Sogamoso-Boyacá, Colombia, creada en el año 2005. Tiene como misión publicar y divulgar artículos científicos, productos de una investigación, en todos los campos de la ingeniería y tecnología: Industrial, electrónica y comunicaciones, ciencias de la tierra, sistemas y computación, ingeniería de los materiales, ingeniería electromecánica, ambiental, transporte y vías, y otras afines.

Ingeniería, Investigación y Desarrollo invita a toda la comunidad académica e investigativa de instituciones públicas y privadas, regionales, nacionales e internacionales, tales como investigadores, grupos y semilleros de investigación, docentes, estudiantes, directivos de ingeniería y demás interesados en temáticas relacionadas con las diferentes áreas de la Ingeniería, para que presenten sus contribuciones y trabajos inéditos, en español o inglés. Podrán publicarse artículos originales, de investigación y/o innovación tecnológica.

Los artículos sometidos serán evaluados previamente por el comité editorial, y por pares evaluadores externos o internos antes de su publicación, que se reservan el derecho de decidir sobre su publicación. Los pares revisores emitirán un concepto sobre el contenido del artículo desde la calidad y el rigor científico, en el formato de evaluación establecido por la revista. Las observaciones y sugerencias manifestadas por los evaluadores serán enviadas a los autores para que realicen los respectivos ajustes, con el fin de decidir si el artículo cumple con las condiciones para ser publicable o no. La Revista siempre utilizará el sistema de “par doble ciego” En este proceso se da un espacio de correspondencia entre el editor y los autores para los ajustes necesarios. Los tiempos de publicación de un artículo dependerán en gran medida de la oportuna respuesta que los autores den a cada requerimiento del editor, los trabajos enviados a “Ingeniería, Investigación y Desarrollo” no podrán ser sometidos simultáneamente a evaluación por otro medio de publicación. La aceptación de un artículo por parte del comité editorial, no implica que vaya a ser publicado, el contenido de los trabajos es responsabilidad exclusiva de sus autores. No se devolverán los originales de los trabajos.

Todos los artículos deben matricularse en la plataforma OJS, accesible desde el sitio web [https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria\\_sogamoso/about/submissions#submission\\_checklist](https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria_sogamoso/about/submissions#submission_checklist), or, junto con la carta de presentación, firmada por los autores, para realizar el proceso de matrícula del manuscrito el autor debe compilar previamente un formulario de registro, escogiendo la opción de autor, donde le será asignado un usuario y contraseña para que pueda realizar el envío del documento. Por medio de este mismo enlace podrá ser consultada y descargada la plantilla de presentación de artículos y el modelo de la carta de cesión de derechos de autores estipulado por la revista.

**Extensión del artículo:** Los artículos se presentan en hojas tamaño carta con márgenes superior: 3 cm, derecho: 2 cm, izquierdo: 3 cm e inferior: 2 cm, a espacio sencillo, doble columna, letra calibri y un contenido de máximo 10 páginas.

**Estructura:** Secciones: título, resumen, palabras clave, introducción, materiales y métodos, resultados, discusión, conclusiones, agradecimiento (si procede) y referencias. Para las tres primeras secciones se requiere, además, su traducción al inglés (title, abstract and keywords), que se colocará inmediatamente debajo de la versión en español.

**Título:** se sugiere no exceder de 15 palabras.

**Resumen:** máximo 250 palabras, el propósito del trabajo, los métodos empleados, resultados más significativos y conclusiones más importantes. Se redactará en un solo párrafo, en tiempo presente y modo impersonal. No incluirá abreviaturas, siglas, citas bibliográficas ni referencias a tablas o figuras.

**Palabras clave:** en orden alfabético, 4 o 5 términos relacionados con el contenido del artículo.

**Introducción:** tratará el tema específico del trabajo e informará sobre el propósito, importancia, aplicación práctica de la investigación y conocimiento actual del tema.

**Materiales y métodos:** proveerá suficiente información para que el experimento pueda repetirse bajo las mismas condiciones. Cuando los métodos, técnicas y procedimientos empleados sean muy conocidos, bastará con mencionarlos. Si se modifica un método de otro investigador deberá aportarse la cita y explicar detalladamente la modificación; pero si el método es nuevo, se describirá en detalle. Cuando se trate de investigaciones de campo, deberán aparecer las características del área de estudio y del muestreo.

**Resultados:** se expondrán mediante texto, figuras, tablas, cuidando no repetir una misma información en más de una forma, en esta sección se deben presentar los resultados hallados en la investigación.

**Discusión:** se explicarán los datos experimentales y se compararán con los resultados obtenidos por otros investigadores. Las secciones de Resultados y Discusión podrán presentarse de forma independiente o combinada, según preferencia del autor.

**Agradecimientos:** será el lugar para reconocer la ayuda de personas e instituciones que aportaron significativamente al desarrollo de la investigación.

**Referencias:** Las referencias bibliográficas y citas, deben atender al estilo IEEE, se registrarán solamente los trabajos citados en el texto, que deberán tener un nivel adecuado de actualización, las referencias deben hacerse por orden de aparición en el artículo. Téngase en cuenta que la actualidad de las referencias es un elemento de gran peso en la evaluación de la calidad de los artículos, se debe adicionar el DOI a las referencias bibliográficas que lo tengan.

Para obtener la plantilla de presentación de artículos, por favor diríjase al correo: [revistaid@uptc.edu.co](mailto:revistaid@uptc.edu.co) o al enlace: [https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria\\_sogamoso/about/submissions](https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria_sogamoso/about/submissions) en la sección Acerca de.



**GENERAL REQUIRMENTS TO SUBMIT  
PAPERS TO “REVISTA INGENIERÍA, INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO”  
UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA, SOGAMOSO BRANCH**

The Journal of Ingeniería, Investigación y Desarrollo I2+D, is a Biannual Publication, it is supported and edited by the Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, of Sogamoso Branch. It was created in 2005; this is a place to submit and inform about all academic papers related to topics as technology and engineering. Authors can publish papers related to topics of Engineering Fields as: Industrial, Electronic and Communication, Earth sciences and Computation, at the same time, Materials, Electro-mechanic, Environmental, Transport and Roads, and related areas.

Ingeniería, Investigación y Desarrollo invites all academic and community researchers, research groups, professors, students and Chiefs from Public and Private institutions to submit unpublished works on engineering and technology, they would be in Spanish and English. They are going to involve research papers of innovation and technology who presents original results of projects and research; also it includes, review papers and reflecting ones. Once papers were assessed and approved by external peers – reviewers, they had belonged a bank of papers to be published based on received and accepted deadlines. The Editor Committee in charged reserve the rights of publishing.

Peers – reviewers emit a definite concept about the content of the paper based on quality and scientific rigour, following the Assessment Template established by this journal. Observations and suggestions leading by the jurors (peers – reviewers) will be sent to the authors, they have to adjust it with the purpose to make a decision taking into consideration the suggestions to be published or not. This Journal submits all articles received to a process of “double-blind peer” review. During this process Editor and Authors are accomplishing all requirements and necessary adjustments being made.

The turnaround times needed to publish a paper depend on the authors acknowledge that response to double-blind peer’s and Editor Committee suggestions; It is relevant to mention that works had been sent to “Ingeniería, Investigación y Desarrollo” cannot be submitted simultaneously to other Journal or mass media. Moreover, approved of the paper does not mean they are going to be published. The articles represent the authors' opinions; the latter is therefore solely responsible and liable for his/her works. This Journal will not be returned original file of papers.

Papers have to be send it by using OJS Platform of this Journal following the link: [https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria\\_sogamoso/about/submissions#submission\\_checklist](https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria_sogamoso/about/submissions#submission_checklist), or to the institutional e-mail of the journal (revistaiid@uptc.edu.co). In this place, authors can find the Template and Cover Letter to Publish that have to be signed by the authors. In the OPS Platform author/user has to register its personal information, in order to send the manuscript.

**Length of article:** All papers should be presented in letter sheets with the following margins: the top margin 3cm, top right 2cm, top left 3cm and the bottom 2cm, the manuscript has 12pt of Calibri font, single spacing, maximum 10 pages including Abstract, Figures and References.

**Body:** sections: title, abstract, key words, introduction, materials and methods, results, discussion, conclusions, acknowledgments (if it is necessary) and references. The three sections entitled: title, abstract and keywords have to be in English and Spanish too following the Template of this Journal.

**Title:** We suggest; it must not exceed 15 words.

**Abstract:** Minimum of 250 words. This section refers to be concise with its content; its clarity is pretty relevant, because it allows to identify the topic developed along the journal. This section involves the most important point of views, goals of the research, basic procedures (places, research places or zones, analytic and observation methods), the most relevant results (based on the presentation of concrete data) and the main observations and conclusions that show originality and innovation of the research. Author/s write one paragraph in an impersonal way, using present simple. It does not include abbreviation, acronyms, references or citations of tables or figures.

**Key words:** Authors can identify three or five simple concepts or composed nouns related to the content of the paper. If you want, you can consider the Thesaurus Platform to write on them.

**Introduction:** It is going to develop a specific topic and inform purpose, reliability, practice or application of the research based on current knowledge of the topic.

**Materials and methods:** Provide enough information that allow experiments are going to be reproducible under the same conditions. When methods, techniques and procedures implemented are well-known, just it is enough mention them. If any authors 'method is modified, it should be right cited and thoroughly explained. But if the method is new, it should be thoroughly described. About field research, it should be appeared characteristics of area and sampling study.

**Results:** Authors report achievements made by using experimentation, analysis, contrasting, diagnosis, contextual studies using arguments, figures, tables taking into account do not repeat the information at the same way, this section shows results found in the investigation.

**Discussion:** In this section, the author establishes sections and titles that are going to be used to defend main objective of this research which is explained along the paper. It explains experimental data and compare results obtained from others researchers. Sections of Results and Discussion can be presented in independent way or combined, based on authors' preferences.

**Acknowledgments:** This section allows the authors to emphasize what is the relevant support of people and institutions to develop the research.

**References:** According to the IEEE style, all references consulted are going to be signed with a number into the text in parenthesis/bracket [] in correlation with the bibliography data. This list is going to be full of references and presented in the end of the manuscript and organized in the order of appearance on the citations along the text. Citations need to be updated and correspond to guarantee quality in the manuscripts. It is important to add DOIs of references, if they content it.

To get Template and Cover Letter to Publish, please contact us writing an e-mail to: [revistaiid@uptc.edu.co](mailto:revistaiid@uptc.edu.co) or following the link: [https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria\\_sogamoso/about/submissions](https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria_sogamoso/about/submissions) to section About us.



**REVISTA INGENIERÍA, INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO  
UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
SECCIONAL SOGAMOSO  
SUSCRIPCIÓN / SUBSCRIPTIONS**

Nombre/Name: \_\_\_\_\_ C.C. \_\_\_\_\_

Apellidos/Last Name: \_\_\_\_\_

Profesión/Profession: \_\_\_\_\_

Departamento académico/Academic department: \_\_\_\_\_

Dirección de Envío/Address: \_\_\_\_\_

Teléfono/Telephone Number: \_\_\_\_\_ ext: \_\_\_\_\_ Fax: \_\_\_\_\_

Oficina/: \_\_\_\_\_

Ciudad/City: \_\_\_\_\_

País/Country: \_\_\_\_\_

Correo Electrónico/Email: \_\_\_\_\_

Suscripción a partir del número/ Subscription from number : \_\_\_\_\_

Firma: \_\_\_\_\_

Envíe este formato totalmente diligenciado a: [revistaiid@uptc.edu.co](mailto:revistaiid@uptc.edu.co); a vuelta de correo recibirá el ejemplar solicitado de la revista I2+D. La suscripción a la Revista I2+D es totalmente gratuita.

## **Correspondencia, Canje y Suscripciones**

**REVISTA INGENIERÍA, INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO I2+D**

**Calle 4 A Sur N° 15-134**

**Tels.: (57+8) 7705450, 770 6896, 770 7721 Ext. 2606**

**Uptc Sogamoso-Boyacá, Colombia**

**E-mail: [revistaiid@uptc.edu.co](mailto:revistaiid@uptc.edu.co)**

**[www.uptc.edu.co/enlaces/ringinvedesa](http://www.uptc.edu.co/enlaces/ringinvedesa)**

**DOI: <http://dx.doi.org/10.19053/issn.1900-771X>**



**Ingeniería, Investigación y Desarrollo**

ISSN: 1900-771X Impreso

ISSN: 2422-4324 En línea