

Año 12, Número 1, 2024

# REAXXION

Ciencia y tecnología universitaria

XXXIV

ISSN: 2007 - 7750

- » **Automatización de lecturas multiparamétricas desde un dispositivo Hanna HI2550**
- » **Prototipo de un sistema IAoT para lectoescritura Braille**
- » **Baterías de litio-azufre (Li-S) con carbones a partir de residuos de la producción del tequila**
- » **Validación experimental de las concentraciones de  $PM_{10}$  de una estación de monitoreo atmosférico**
- » **Evaluación de eficiencia en proceso de calzado por medio de simulación y análisis de métodos**



comiterevista@utleon.edu.mx  
reaxion.utleon.edu.mx





**UTL**

**LEÓN**

# Directorio

---

## **Luis Ignacio Sánchez Gómez**

*Secretario de Educación de  
Guanajuato*

## **José Christian Padilla Navarro**

*Rector de la Universidad Tecnológica  
de León*

## **José Ernesto López Juárez**

*Secretario Académico*

---

## **Martha Betzabé Murillo**

### **Hernández**

*Directora de Desarrollo Académico y  
Docente*

## **José de Jesús Mendoza Rivas**

*Director de Económico Administrativo*

## **Eduardo Pérez Gutiérrez**

*Director de Tecnologías Emergentes  
Industriales e Informáticas*

## **Ma. de Jesús Armenta Ortiz**

*Subdirectora de Económico  
Administrativo*

## **José Jaime Ávila Morales**

*Subdirector de la Unidad Académica  
del Sureste*

## **Laura Paulina Badillo Canchola**

*Subdirectora de Tecnologías  
Emergentes Industriales e  
Informáticas*

## **Adolfo Israel Lomelí García**

*Subdirector de Industrial Sustentable*

# Comité Editorial

---

## **Liliana González Arredondo**

*Directora Editorial*

## **Pedro Andrés Meza Torres**

*Aseguramiento de calidad*

## **Daniel Israel Rodríguez Gante**

*Diseño web*

## **Laura Elizabeth Martínez Olaz**

*Diseño gráfico y editorial*

## **María de la Luz García Cárdenas**

*Corrección Editorial*

## **Jessica Sandoval Palomares**

*Representante de Área de la Dirección de  
Desarrollo Académico y Docente*

## **Ma. Guadalupe Serrano Torres**

*Representante de Área de la Dirección  
Económico-Administrativa*

## **Roberto Gutiérrez Guerra**

*Representante de Área de la Dirección de  
Tecnologías Emergentes Industriales e  
Informáticas*

## **Anahí Torres Tinoco**

*Representante de Área de la Dirección de  
Tecnologías Emergentes Industriales e  
Informáticas*

## **J. Guadalupe Santos Gómez**

*Representante de Área de la Dirección de  
Tecnologías Emergentes Industriales e  
Informáticas*

## **Mayra Verónica Barrera**

### **Figueroa**

*Representante de la Unidad Académica  
del Sureste*





## Carta editorial

Reacción Año 12, número 1

Nos complace presentar la trigésima cuarta edición de la revista Reacción. Este número se caracteriza por su enfoque en la innovación y las mejoras de dispositivos y procesos. En efecto, integrado por cuatro colaboraciones del área de las Ingenierías, y una de Biología y Química, los contenidos de este ejemplar muestran la factibilidad de las optimizaciones y las ventajas de estos desarrollos tecnológicos.

Para iniciar, en el ámbito de las industrias que requieren mediciones constantes del nivel de acidez o alcalinidad y de otras variables como conductividad y temperatura, las personas autoras de **Automatización de lecturas multiparamétricas desde un dispositivo Hanna HI2550** muestran el desarrollo de una aplicación innovadora que permite la obtención y el procesamiento de estos datos en tiempo real, lo que resulta útil en casos diversos, tales como los laboratorios de análisis químicos, la industria agrícola, la de cuidado del agua e incluso algunas del sector alimentario.

Continuando en el mismo eje de conocimiento de las Ingenierías, el equipo autoral de **Prototipo de un sistema AIoT para lectura braille** presenta un desarrollo inspirado en la importancia de aplicar la inclusión y desarrollar la autonomía de las personas con discapacidad visual; basado en las tecnologías del internet de las cosas y la inteligencia artificial, el dispositivo ergonómico resulta económicamente accesible y tiene las ventajas de proporcionar una experiencia personalizada a quien lo utilice, dada su posibilidad de aprender y adaptarse.

En cuanto al área de Biología y Química, enfrentándose al desafío que representa la necesidad de contar con formas nuevas de almacenamiento y conversión de energía, así como ante la urgencia de aprovechar los recursos y al mismo tiempo proteger al medio ambiente, los autores de **Baterías de litio-azufre (Li-S) con carbones a partir de residuos de la producción del tequila** identificaron que existen posibilidades de que, a partir del procesamiento de bagazo de agave, pueda mejorarse la capacidad de este tipo de fuentes de energía.



Volviendo al eje de las Ingenierías, y considerando la contaminación que se presenta en las zonas altamente industrializadas, el artículo **Validación experimental de las concentraciones de  $PM_{10}$  de una estación de monitoreo atmosférico** destaca la relevancia de que la medición automática de la concentración de partículas finas suspendidas en el aire se contraste con datos provenientes de procedimientos manuales, tales como los gravimétricos, a fin de validar la información que fundamente la toma de decisiones sobre la salud, el cuidado y bienestar de la población.

Continuando con el eje de las Ingenierías, y en el contexto de que el estado de Guanajuato es el principal productor de zapatos en México, los autores del artículo **Evaluación de eficiencia en proceso de calzado por medio de simulación y análisis de métodos** enfrentan el reto de mejorar la productividad, y para ello exploran las alternativas de la redistribución de planta y el balanceo de las líneas de producción, lo que efectivamente disminuyó el desperdicio y mejoró la rentabilidad; y proponen la aplicación de un sistema de gestión de mejora continua para que estos resultados se consoliden.

Confiamos en que la lectura de este número de Reaxión provocará en el público lector la visualización de múltiples horizontes en el desarrollo de la ciencia y la tecnología.

**A t e n t a m e n t e.**

**Comité Editorial**



# Índice

- 7.**      **Automatización de lecturas multiparamétricas desde un dispositivo Hanna HI2550**
  
- 16.**     **Prototipo de un sistema IAoT para lectoescritura Braille**
  
- 29.**     **Baterías de litio-azufre (Li-S) con carbones a partir de residuos de la producción del tequila**
  
- 39.**     **Validación experimental de las concentraciones de PM<sub>10</sub> de una estación de monitoreo atmosférico**
  
- 54.**     **Evaluación de eficiencia en proceso de calzado por medio de simulación y análisis de métodos**

---

REAXXION



# Automatización de lecturas multiparamétricas desde un dispositivo Hanna HI2550

*Automated multiparametric reading from Hanna HI2550 device*

Yajaira Galilea Hernández-Juárez, Miguel Angel Gil-Rios, Alan Daniel Villalobos- Lara y María Dolores Juárez-Ramírez / Universidad Tecnológica de León

## Resumen

En este artículo se presenta el diseño de una aplicación novedosa que permite automatizar la lectura de parámetros químicos como la acidez-alcalinidad ( $pH$ ), conductividad ( $mV$ ) y la temperatura ( $^{\circ}C$ ), entre un dispositivo Hanna HI2550 y una computadora mediante el estándar RS-232, a través de un puerto USB. Los resultados obtenidos permitieron conocer que la frecuencia máxima de lectura que soporta el dispositivo Hanna HI2550 fue de un segundo, lo cual fue validado mediante un estudio estadístico a partir de diez ejecuciones independientes del experimento, considerando diferentes frecuencias de lectura. Finalmente, los resultados obtenidos permitieron concluir que la aplicación desarrollada es factible de ser utilizada en ambientes industriales, en donde se requiera de la lectura constante de parámetros químicos por periodos prolongados de tiempo de manera automática.

**Palabras clave:** automatización, Hanna HI2550, puerto serial, Java, JavaFX

## Abstract

This article presents the design of a novel application that allows the automation of the reading of chemical parameters such as acidity-alkalinity ( $pH$ ), conductivity ( $mV$ ) and temperature ( $^{\circ}C$ ), between a Hanna HI2550 device and a computer using the RS-232 standard, through a USB port. The results obtained allowed us to know that the maximum reading frequency supported by the Hanna HI2550 device was one second, which was validated through a statistical study based on ten independent executions of the experiment, considering different reading frequencies. Finally, the results obtained allowed us to conclude that the developed application is feasible to be used in industrial environments, where the constant reading of chemical parameters for long periods of time is required automatically.

**Keywords:** automation, Hanna HI2550, serial port, Java, JavaFX



## Introducción

La ingeniería de software se ha vuelto fundamental en la automatización de procesos industriales controlados por computadoras y aplicaciones<sup>1</sup>. Dentro de la base de datos de ScienceDirect existen más de 16 millones de artículos, distribuidos en 2500 *journals*, los cuales presentan innovaciones sobresalientes relacionadas con la automatización de procesos<sup>2</sup>. Considerando este antecedente, resulta relevante que el área de la química aplicada en procesos industriales también podría beneficiarse con la automatización de procesos<sup>3</sup>.

Actualmente, en la Universidad Tecnológica de León, dentro del área académica de Química y procesos industriales, se cuentan con varios dispositivos de medición multiparamétrica Hanna HI2550. Estos dispositivos son empleados por las y los alumnos, profesoras y profesores e investigadores(as) para la realización de diversas actividades, en las que se requiere medir niveles de acidez-alcalinidad, conductividad y temperatura. Sin embargo, existen procesos químicos, como los relacionados con la electrocoagulación, en los cuales es deseable realizar mediciones de manera constante durante periodos prolongados. De manera tradicional, para obtener las mediciones citadas anteriormente, se requiere de una operación manual del dispositivo Hanna HI2550. La propuesta de este trabajo es el desarrollo de una aplicación que permite automatizar la lectura de los diversos parámetros químicos mencionados previamente. Así mismo, los resultados presentados en este trabajo permitieron validar de manera estadística la mayor frecuencia de lectura con la que el dispositivo Hanna HI2550 puede operar, la cual es de 1 segundo. Este mismo análisis permitió validar la factibilidad de la aplicación desarrollada para ser utilizada

en conjunto con el dispositivo Hanna HI2550 en procesos industriales complejos y prolongados en los que se requiere una lectura constante de parámetros químicos de manera automatizada.

Este artículo está dividido en cinco secciones, comenzando con una introducción al problema estudiado. En la segunda sección se define el objetivo; en la tercera se caracteriza el planteamiento del problema; en la cuarta se definen los conceptos y metodología utilizados en el desarrollo de la aplicación; en la quinta se describe la solución propuesta. Finalmente, en la conclusión se hace una síntesis de los hallazgos significativos a partir de los resultados logrados. Es importante mencionar que, con base en los resultados que se obtuvieron, se pudo concluir que la aplicación construida es factible de ser utilizada en ambientes y procesos industriales, donde se requiera una lectura constante de parámetros químicos de manera automatizada, mediante el uso del dispositivo Hanna HI2550 y una computadora.

### Objetivo:

Lograr la lectura automática continua de parámetros químicos desde un dispositivo Hanna HI2550.

### Planteamiento del problema

El problema por resolver es la lectura de parámetros químicos desde un dispositivo Hanna HI2550 hacia una computadora a través del puerto USB, mediante una comunicación serial, de manera constante y automática, en la que no se requiera de la supervisión y operación manual, por parte de una persona, durante el proceso de lectura. Así mismo, se requiere conocer la frecuencia máxima con la que el dispositivo Hanna HI2550 es capaz de responder a las peticiones de lectura.





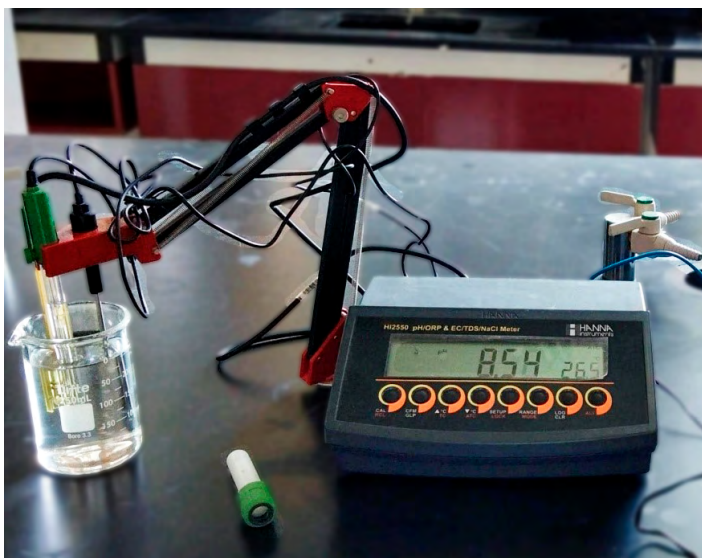
## Método de trabajo

### Instrumentos de medición multiparamétricos

La mayoría de los equipos de medición de factores químicos utilizan electrodos para realizar las mediciones de los diferentes parámetros. Dichas mediciones se realizan mediante una diferencia de potencial, para generar una respuesta del parámetro que se desea cuantificar. Un aspecto bastante importante que se debe considerar en casi todos estos dispositivos es la necesidad de una calibración previa al análisis, con la finalidad de asegurar que los valores que se están obteniendo tengan un sentido físico.

### Dispositivo Hanna HI2550

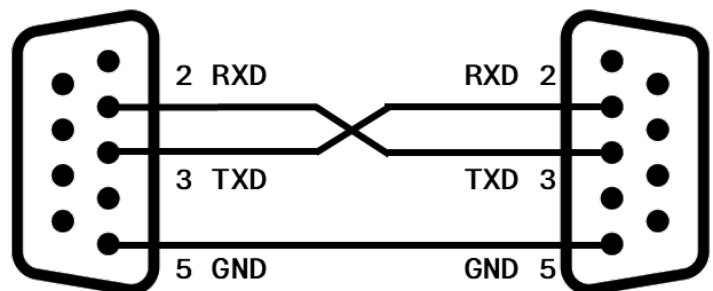
El medidor multiparamétrico Hanna HI2550 es para la medición de diversos parámetros, entre ellos la alcalinidad-acidez, la temperatura y la conductividad. Se utiliza en campos como la química, la biología y la industria, como una herramienta fundamental para el monitoreo de sustancias. La Figura 1 ilustra uno de los dispositivos Hanna HI2550 con los que cuenta la Universidad Tecnológica de León.



**Figura 1.** Dispositivo Hanna HI2550.  
Fuente: elaboración propia

### Comunicación serial en Java

La interfaz de comunicación RS-232 es la más ampliamente utilizada como medio de comunicación para el envío y recepción de datos entre la computadora y diversos dispositivos electrónicos e industriales, como el Hanna HI2550<sup>4, 5</sup>. Hasta el año 2010 aproximadamente, algunos modelos de computadoras solían incorporarlo como el puerto serial COM o DB9, el cual contaba con 9 pines para la comunicación. Para la transmisión de datos, era común utilizar un método de conexión con 3 hilos, conocidos como tierra (GND), pin de lectura (RXD) y pin de transmisión (TXD)<sup>6</sup>. La Figura 2, muestra el esquema de comunicación serial con el estándar RS-232 mediante el puerto DB9.



**Figura 2.** Comunicación serial mediante el protocolo RS232 a través del puerto DB9. Fuente: elaboración propia

Actualmente, la gran mayoría de las computadoras y *laptops* carecen de este puerto debido, principalmente, a la considerable reducción de tamaño que han tenido en los últimos años. Sin embargo, aún es posible trabajar con el protocolo RS-232 mediante la conexión a un puerto USB (*Universal Serial Bus*) el cual, mediante el controlador adecuado, permite emular el protocolo RS-232. Para el caso de la plataforma Java<sup>7, 8, 9</sup>, existe la librería *jSerialComm*<sup>10</sup>, que permite establecer comunicación con diferentes dispositivos mediante el puerto serial a través del estándar RS232.

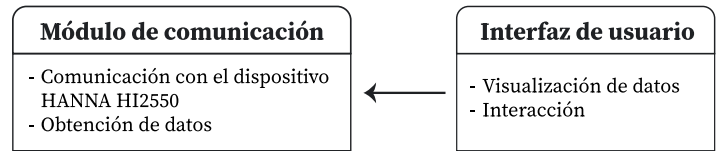
## JavaFX

JavaFX es un *framework* enfocado en el desarrollo de aplicaciones gráficas, el cual permite implementar estilos visuales que dan como resultado aplicaciones conocidas como *clientes ricos* o *rich clients* (siendo "Rich" un término para describir cuán atractiva e interactiva es una interfaz de usuario en el nivel de presentación)<sup>11,12</sup>.

## Propuesta de solución

En este artículo se presenta una propuesta de solución para automatizar la lectura de parámetros químicos desde un dispositivo Hanna HI2550, basada en una aplicación que contiene una interfaz de usuario completamente gráfica que facilita la interacción con diferentes modos de lectura, incluyendo la adquisición automática de mediciones de parámetros de manera continua.

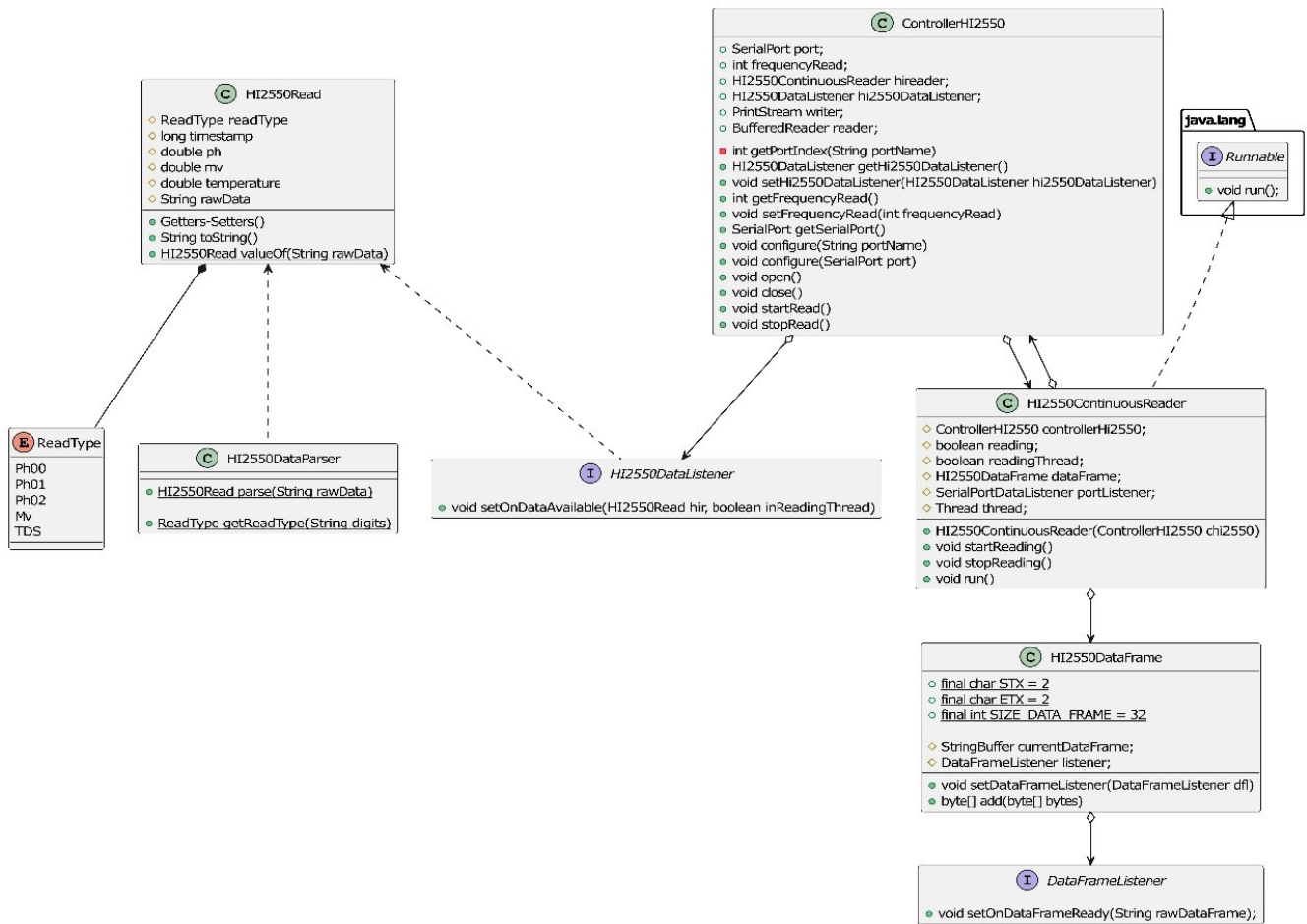
El diseño de la solución consta de dos módulos, los cuales permiten tener una estructura flexible y organizada de recursos y código. Dichos módulos corresponden a la comunicación y a la interfaz gráfica de usuario. El primer módulo es el encargado de establecer la comunicación con el dispositivo Hanna HI2550 para la lectura continua de los parámetros químicos de las sustancias, proporcionando una recopilación de datos en tiempo real. Por otra parte, el módulo de la interfaz el usuario se encarga de brindar una experiencia de usuario enfocada en la facilidad de uso mediante la implementación de una interfaz gráfica amigable. Dentro de esta se muestran los valores de las lecturas recolectadas, para que el monitoreo de los valores obtenidos se vuelva más sencillo, siendo accesible la lectura de tres diferentes parámetros en una sola pantalla y con la capacidad de exportar estos datos a un archivo para su lectura y procesamiento posterior. La Figura 3, ilustra el diseño modular de la aplicación desarrollada.



**Figura 3.** Diseño modular de la aplicación desarrollada.  
Fuente: elaboración propia

Dado que el dispositivo Hanna HI2550 tiene la capacidad de medir diferentes parámetros como la acidez, conductividad y temperatura, el módulo de comunicación se diseñó para que pudiera tomar las lecturas de todos los parámetros de forma simultánea. Para la medición de la alcalinidad-acidez se utilizó la medida de *pH*; para la conductividad se utilizó la unidad del milivoltio (*mV*); finalmente, para la temperatura la unidad utilizada fueron los grados centígrados ( $^{\circ}C$ ).

Las unidades de medida descritas previamente para los diferentes parámetros son predeterminadas del dispositivo Hanna HI2550 y no pueden modificarse. Solo puede modificarse la resolución o precisión de lectura para el caso del *pH*. La Figura 4, ilustra la arquitectura diseñada para el módulo de comunicación encargado de la lectura asíncrona de datos desde el dispositivo Hanna HI2550.



**Figura 4.** Arquitectura del componente de comunicación para la lectura asíncrona de valores de parámetros desde el dispositivo Hanna HI2550. Fuente: elaboración propia

## Resultados

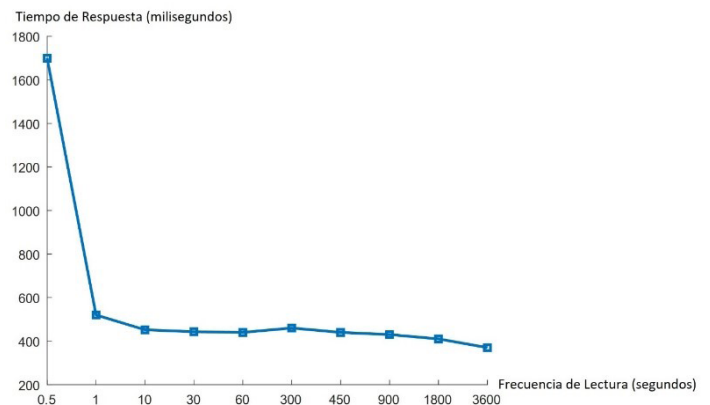
Una vez terminado el desarrollo de la aplicación, se realizaron diferentes pruebas de comunicación y de lecturas automatizadas con la finalidad de asegurar los resultados obtenidos. Para la experimentación se utilizó una computadora con un procesador Intel Core i7 vPro de 7ma. Generación y 8 GB de RAM. La aplicación desarrollada se ejecutó sobre la distribución completa (JDK Full) Liberica JDK 17 a 64 bits<sup>13</sup>.

La Tabla 1 describe un análisis estadístico a partir de los resultados obtenidos al realizar 10 pruebas independientes con diferentes frecuencias de lectura en un rango de [0.5, 3600] segundos. Cada prueba fue ejecutada por un periodo de 30 horas.

**Figura 4.** Tabla 1. Análisis estadístico de los tiempos de respuesta del dispositivo Hanna HI2250 considerando diferentes frecuencias de lectura (F.L.) en un rango de [0.5, 3600] segundos. Se contempla el tiempo mínimo (Min), máximo (Max), promedio (Media), mediana (Mediana) y desviación estándar (Desv. Est.), del tiempo de respuesta, medido en segundos. Fuente: elaboración propia

F. L.	Min	Max	Media	Mediana	Desv. Est.
0.5	0.472	.87	1.701	.94	0.02
1.0	0.37 0	.72	0.52 0	.55	0.04
10.0 0	.33	0.58 0	.45	0.49 0	.05
30.0 0	.32	0.57 0	.44	0.47 0	.05
60.0 0	.34	0.53 0	.44	0.44 0	.05
300.0	0.40 0	.51	0.46 0	.47	0.05
450.0	0.33 0	.49	0.41 0	.41	0.05
900.0	0.31 0	.49	0.43 0	.44	0.05
1800.0 0	.32	0.48 0	.41	0.42 0	.05
3600.0 0	.32	0.45 0	.37	0.38 0	.04

De acuerdo con los datos presentados en la Tabla 1, se pudo comprobar y verificar que la mayor frecuencia de lecturas constantes que se puede establecer para lecturas continuas es de 1000 milisegundos. Establecer un valor menor a 1000 significa realizar más de una lectura en menos de un segundo. Esto provoca que el dispositivo Hanna HI2550 deba encolar las peticiones, así como los procesos de lectura, provocando retrasos en la devolución de los resultados. Por lo tanto, la frecuencia de lectura máxima es de 1 segundo. En contraste, mientras menor sea la frecuencia de lectura, menor es la variación en el tiempo de respuesta, pues da oportunidad al dispositivo de procesar la petición, realizar la medición y devolver el resultado de manera adecuada. La Figura 5, ilustra el tiempo de respuesta promedio en milisegundos, que se obtuvo al realizar lecturas automatizadas a diferentes frecuencias.



**Figura 5.** Tiempo de respuesta promedio en milisegundos (eje y) del dispositivo Hanna HI2550 considerando diferentes frecuencias de lectura en segundos (eje x) en el rango [0.5, 3600]. Fuente: elaboración propia



Considerando los resultados ilustrados en la Figura 5, se puede verificar que el dispositivo Hanna HI2550 puede dar tiempos de respuesta adecuados a una frecuencia de lectura máxima de un segundo.

Una vez realizadas las pruebas previamente descritas, se hicieron otras adicionales para validar los resultados de las lecturas realizadas tanto en un ambiente controlado como en uno real, utilizando diferentes muestras de líquidos con distintos elementos diluidos. Al realizar estas pruebas se obtuvieron los datos esperados por el especialista, los cuales fueron desplegados y graficados dentro de la interfaz visual de la aplicación, como se ilustra en la Figura 6.

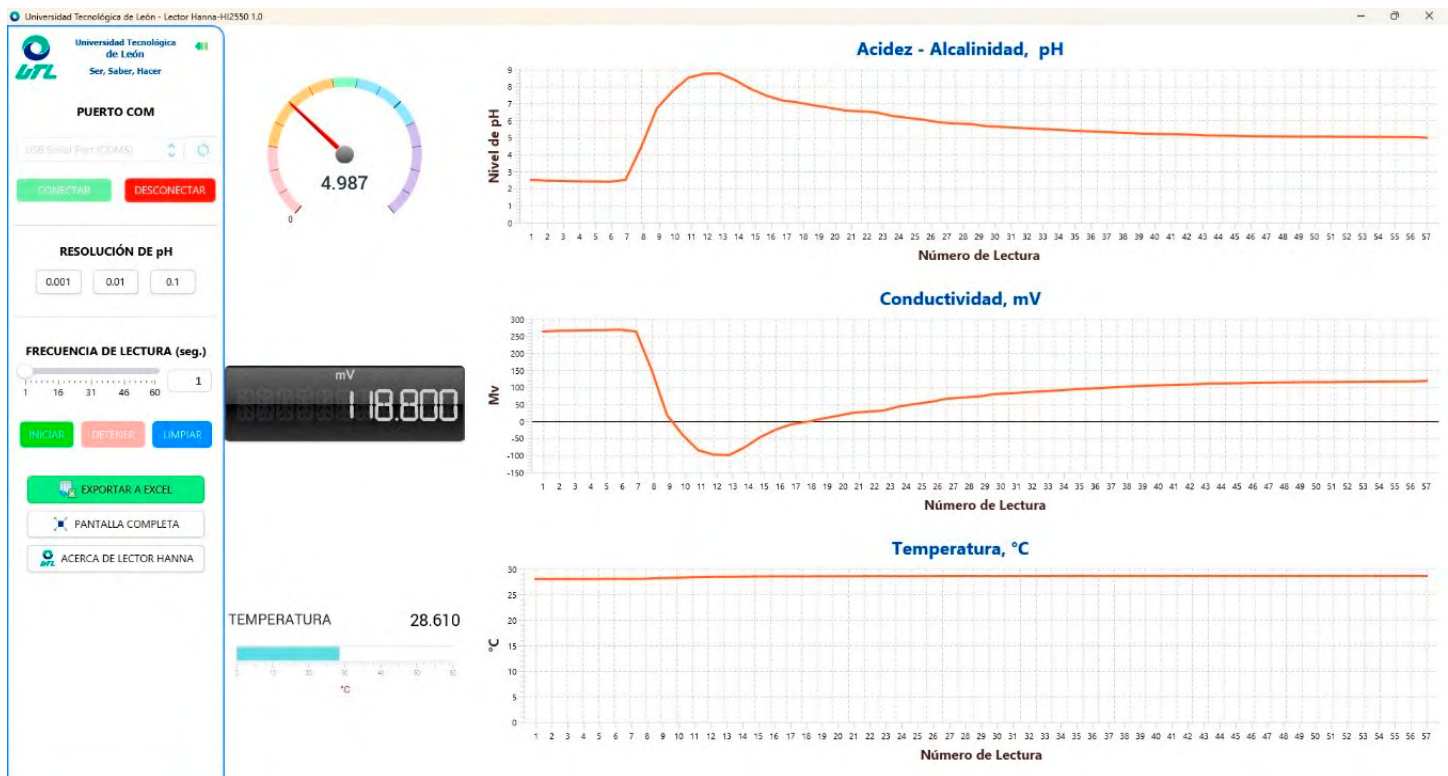


Figura 6. Interfaz de usuario principal de la aplicación.  
Fuente: elaboración propia



## Discusión

Una vez concluida las etapas de desarrollo y experimentación, algunos hallazgos relevantes fueron, por ejemplo, el hecho de que el dispositivo Hanna HI2550 tiene una frecuencia máxima de petición de lectura multiparamétrica de 1 segundo. Esta frecuencia es suficiente en casi todos los escenarios que no son de misión crítica y donde es adecuado el uso del dispositivo HI2550. Por otra parte, las posibilidades de procesamiento de información que se tienen al lograr realizar lecturas multiparamétricas de manera continua son muchas, de acuerdo con los diferentes contextos de aplicación en el área de la química. Finalmente, resulta relevante el hecho de que con esta propuesta ya no se requiere de una persona que opere el dispositivo de forma manual para la lectura de parámetros químicos, lo que posibilita la recolección de valores de dichos parámetros por periodos prolongados de tiempo, así como en escenarios de alto riesgo derivados de la propia naturaleza de sustancias químicas que resultan nocivas y peligrosas para los seres humanos.

## Conclusiones

En este trabajo se presentó el diseño y desarrollo de una aplicación innovadora que permite automatizar las lecturas, en tiempo real, de un dispositivo Hanna HI2550 conectado con un equipo de cómputo mediante el puerto serie de bus universal (USB). Al realizar un análisis del estado del arte, así como de las tecnologías actuales presentes en el mercado, no se encontró una aplicación similar, por lo que la propuesta descrita en este artículo resultó relevante.

Para medir la fiabilidad de los resultados obtenidos se realizaron diferentes pruebas de lectura. De manera consecuente, considerando los resultados obtenidos al realizar las diferentes pruebas, fue posible validar de manera estadística la confiabilidad de la aplicación desarrollada para la lectura multiparamétrica (acidez-alcalinidad, conductividad y temperatura).

Es necesario mencionar que una de las principales limitantes de la aplicación desarrollada es el hecho de que solo puede trabajar con el dispositivo Hanna HI2550, debido a que cada fabricante, e inclusive otros modelos de la marca Hanna, envían los datos estructurados de forma diferente. Por lo tanto, el utilizar un dispositivo diferente al Hanna HI2550 implica consultar la documentación técnica de dicho dispositivo para poder extraer e interpretar los datos de forma correcta. Adicionalmente, debe considerarse que no en todos los casos, los fabricantes proveen la información técnica relacionada con la manera en que los datos son estructurados o encriptados y posteriormente enviados por los medios de comunicación como el puerto USB.

Finalmente, se puede concluir que la aplicación desarrollada es factible de ser utilizada en ambientes industriales donde se requiera la lectura constante de parámetros químicos de manera automatizada a través de un dispositivo Hanna HI2550. Además, es importante destacar que la aplicación no presenta ningún problema de licenciamiento, lo que facilita su implementación y uso en los entornos ya mencionados.



## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica de León por brindar las facilidades para la realización de este trabajo.

De igual manera, se agradece al Ing. Isaac Falcón Ruiz por todo su apoyo y guía en la parte del conocimiento y operación de los dispositivos electrónicos de medición, así como de la asesoría técnica brindada en el área de manejo de sustancias químicas y uso del laboratorio de química de procesos industriales. También se agradece a la Ing. Nancy Verónica Álvarez Rodríguez por el apoyo brindado en la asignación de un espacio para trabajo constante en el laboratorio de química de la Universidad Tecnológica de León.

## Referencias

1. VYATKIN, Valeriy. Software Engineering in Industrial Automation: State-of-the-Art Review. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. Vol. 9, pp: 1234-1249. Agosto de 2013. ISSN: 1551-3203.
2. VANDINTER, Raymon; Tekinerdogan, Bedir and Catal, Cagatay. Automation of systematic literature reviews: A systematic literature review. *Information and Software Technology*. Vol. 136, pp: 1-16. Agosto de 2021. [Fecha de consulta: 18 de septiembre de 2024]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950584921000690> ISSN: 0950-5849.
3. GUIDI, Mara; Seeberger, Peter H. and Gilmore, Kerry. How to approach flow chemistry. *Chemical Society Reviews*. Vol. 49 (24). 03 de noviembre de 2020. [Fecha de consulta: 18 de septiembre de 2024]. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2020/cs/c9cs00832b> ISSN: 1460-4744.
4. FAN, Yizhi; Wenxiang, Jiang and Liyuan, Chen. *Serial communication control based C++Build and RS232*. Tsinghua University Press. Beijing. 2002. pp: 2-18.
5. HOLLINGWORTH, Jarrod; Butterfield, Dan; Swart, Bob; Allsop, Jamie; et al. *C++ Builder 5 Developer's Guide*. Indianapolis, EUA. SAMS. 2000. pp. 530-570. ISBN: 9780672319723.
6. FIRST ACIS INTERNATIONAL SYMPOSIUM on cryptography, and network security, data mining and knowledge discovery, e-commerce and its applications, and embedded systems. *The Designing of Serial Communication Based on RS232*(authors: Xinghai, Han and Xiangxin, Kong). 2010. pp. 382-384.
7. CEBALLOS, Fco. Javier. *Java 2: Lenguaje y aplicaciones*. Madrid. RA-MA Editorial. 2015. ISBN: 978-84-7897-745-1.
8. ARNOLD, Ken; Gosling, James y Holmes, David. *El lenguaje de programación Java*. 3ra. Edición, 600 pp. Pearson Publishing, 2001.
9. WINDER, Rusell and Roberts, Graham. *Developing Java Software*. 3rd ed. Reino Unido. Wiley, 2006, 912 pp. ISBN: 978-04-7009-025-1.
10. HEDGECOCK, Will. *jSerialComm*. [En línea]. 2023. [Fecha de consulta: 25 de octubre del 2023]. <https://fazecast.github.io/jSerialComm/>
11. ALOR HERNÁNDEZ, Giner; Rosales,-Morales, Viviana Yarel y Colombo Mendoza, Luis Omar. *Frameworks, Methodologies, and Tools for Developing Rich Internet Applications*. Hershey PA: Information Science Reference, 2014. ISBN: 978-14-6666-438-8.
12. VOS, Johan; Chin, Stephen; Gao, Weiqui; Weaver, James and Iverson, Dan. *Pro JavaFX 9. A Definitive Guide to Building Desktop, Mobile and Embedded Java Clients*. pp. 1-3. Fourth edition. s. l. Apress, 2018. ISBN: 978-1-4842-3041-1.
13. Bellsoft. *Liberica JDK Download Center*. [En línea]. 2024. [Fecha de consulta: 18 de septiembre de 2024]. <https://download.bell-sw.com/java/17.0.12+10/bellsoft-jdk17.0.12+10-windows-amd64-full.msi>

Fecha de recepción

5/11/2023

Fecha de aceptación

4/5/2024

Fecha de publicación

30/09/2024



# Prototipo de un sistema AIoT para lectura braille

*Prototype of an AIoT system for braille reading*

**Cristal Karina Urbano Márquez, José Luis López Ramírez, German Pérez Zúñiga y Juan de Anda Suarez / Tecnológico Nacional de México / ITS Purísima del Rincón / Universidad Virtual del Estado de Guanajuato**

## Resumen

Este proyecto se centra en el desarrollo tecnológico de un prototipo basado en AIoT (Inteligencia Artificial de las Cosas), un novedoso sistema de lectoescritura braille, el cual busca promover la lectura en dicha lengua escrita, para personas con discapacidad visual. Hoy en día existe poca preocupación por resolver esta problemática en la sociedad. En el mercado hay algunos dispositivos para atender esta necesidad, sin embargo, los precios son de poca accesibilidad para las y los usuarios. Por este motivo se diseñó un instrumento con capacidad de traducir al braille para su lectura, los documentos digitales que se encuentran redactados en español, brindando autonomía e inclusión social a personas con discapacidad visual. Este proyecto cuenta con un elemento cómodo y práctico para quienes lo necesiten. La implementación física del sistema cumple con estándares de calidad en el diseño mecánico del encogimiento (carcasa) y la instrumentación electrónica del dispositivo.

**Palabras clave:** inteligencia artificial, dispositivos electrónicos, internet de las cosas, lectura, escritura, braille, discapacidad visual.

## Abstract

This project focuses on the technological development of a prototype based on AIoT (Artificial Intelligence of Things), a novel braille reading system, which seeks to promote reading in braille for people with visual disabilities. Today, there is little concern about solving this problem in society. There are some devices on the market to address this need, however, prices are not very accessible for users. For this reason, an instrument was designed with the capacity to translate digital documents written in Spanish into Braille for reading, providing autonomy and social inclusion to people with visual disabilities. This project has a comfortable and practical element for those who need it. The physical implementation of the system meets quality standards in the mechanical design of the casing and the electronic instrumentation of the device.

**Keywords:** Artificial Intelligence, Electronic Devices, Internet of Things, Reading, Braille, Visual Disability.





## Introducción

A lo largo de la historia, ha persistido la discriminación contra las personas con discapacidad visual. Esta discriminación se basaba, antiguamente, en la creencia errónea de que eran una carga familiar y en la superstición de que estaban marcadas por alguna maldición. Tanto el hecho de nacer con esta discapacidad como la pérdida de la vista debido al envejecimiento eran razones suficientes para justificar el castigo y la marginación de estas personas<sup>1</sup>.

En la actualidad, las personas que cuentan con una discapacidad visual requieren de la lectura tanto como la escritura para incrementar sus conocimientos y atender sus necesidades. En otras palabras, estar en convivencia con la sociedad, minimizando los problemas que genera dicha discapacidad; siendo el código braille el sistema estándar utilizado por las personas que experimentan ceguera.

El código braille permite, desde su creación, que las personas gocen de una buena calidad en su educación, tengan contacto con su sociedad actual y adicionalmente tener acceso a la información que mayormente se encuentra de manera escrita (textos digitales). Es importante destacar que para las personas con discapacidad visual, el braille no es simplemente un código, sino su medio de comunicación alternativo.

En la educación inclusiva, las y los pedagogos (normalistas, psicólogos y neurofisiólogos) encargados(as) de la alfabetización para personas con discapacidad visual, se encuentran con un material limitado y anticuado para enseñar el código braille. Esto es debido a los altos costos que se generan para elaborar libros adaptados en texto braille, ya que estos tardan el doble de tiempo para ser desarrollados, en comparación con un libro de lectura de tinta<sup>2</sup>.

Por consiguiente, es importante trabajar en el desarrollo de nuevas tecnologías estandarizadas para acelerar los procesos de aprendizaje para los estudiantes.

El material didáctico debe de ser intuitivo para los usuarios. Tal que, les motive y aumente el interés por salir adelante con la vida a pesar de su discapacidad. El desarrollo de herramientas educativas para personas con capacidades diferentes es de poco interés para los desarrolladores de tecnologías<sup>2</sup>.

Con el fin de promover la integración de las personas con discapacidad visual en la sociedad, es esencial explorar innovaciones que faciliten esta inclusión. Por lo tanto, se plantea la creación de un dispositivo capaz de establecer una comunicación efectiva entre el individuo y la tecnología, como un teléfono celular o una computadora. Este dispositivo se centraría en la lectura, logrando convertir la información digital en código braille.

Este dispositivo está especialmente dirigido a aquellos individuos que enfrentan una discapacidad visual. Su desarrollo busca contribuir significativamente a mejorar la calidad de vida de estas personas y a fortalecer los lazos sociales en la comunidad.

## Objetivo general

Diseñar e implementar físicamente un dispositivo ergonómico para el aprendizaje del lenguaje braille, dirigido especialmente para las personas con discapacidad visual.

## Objetivos específicos

1. Lograr que el dispositivo sea accesible para las personas, ya que se pretende que el precio no influya en la decisión de adquirirlo.
2. Lograr que el prototipo permita crear una comunicación persona-dispositivo, ya que tendrá la capacidad de transformar la información digital a lenguaje braille.
3. Impulsar la inclusión de las personas con discapacidad visual, pues el dispositivo brindará la facilidad de acceder a la información, y ofrecer autonomía.

## Planteamiento del problema

Hoy en día, el aprendizaje del lenguaje braille se ve muy restringido por los equipos que son usados, sin embargo, en el mercado existen algunos dispositivos idóneos para ayudar a las personas con deficiencia visual a que tengan un acceso más práctico a la información y la forma de comunicación con el exterior.

Estos dispositivos están relacionados con el sistema braille, el cual es un código de lectoescritura de puntos en relieve, los cuales se pueden sentir a través del tacto, con ayuda de las yemas de los dedos. El artefacto a diseñar habrá de tener la capacidad de poder hacer una comunicación persona-dispositivo (celular, computadora, etc.), haciendo el énfasis en la lectoescritura braille, es decir, el objetivo es transformar cualquier información digital a dicho lenguaje, con el fin de promover la inclusión social de las personas con discapacidad visual, para sumar a su calidad de vida y reconstrucción del tejido social.

Este artefacto está mayormente dirigido a las personas que presenten una discapacidad visual, con el propósito de mejorar su bienestar y reintegración a la sociedad, además de

subsancar esta necesidad, pues existen algunos dispositivos que pueden realizar esta interpretación de la lectura braille, pero las personas o sus familiares no lo pueden adquirir por su precio tan elevado.

Este dispositivo también se enfoca en ayudar a las personas en su autosuficiencia, contribuyendo a su incorporación en la sociedad.

## Marco conceptual

### Discapacidad visual

La discapacidad visual se divide en dos grandes grupos. El primer grupo es la baja visión, que abarca a aquellas personas que cuentan con un resto visual que no puede ser mejorado por medios convencionales como anteojos y lentes de contacto. En cambio, requieren ser rehabilitados con ayudas ópticas no convencionales, como sistemas de amplificación de la imagen, lupas, microscopios y telescopios. El segundo grupo es la ceguera, que se caracteriza por la ausencia total del sentido de la vista. Ambas clasificaciones son irreversibles.

Una parte de la población se ve dañada por la discapacidad visual, la cual habitualmente es secundaria a patologías oculares o sistemáticas; lo que significa que la ceguera provenga de enfermedades primarias, idiopáticas o congénitas. Datos obtenidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) a lo largo del año 2000 informan niveles altos de ceguera por grupo etario de 1.5 millones de habitantes de 0 a 14 años; , 2.5 millones de ciudadanos va desde los 15 a 44 años, 16 millones de la población va de 45 a 59 años, y por último 30 millones de la población de personas invidentes es de habitantes mayores de 60 años<sup>3</sup>.



Al pasar de los años, las personas suelen hacer cada vez más uso de la tecnología, lo que significa que utilizan computadoras, celulares, o monitores, debido a que estos son requeridos para estudiar y trabajar, por lo que constantemente se está expuesto a perder considerablemente la visión. Las ametropías y las cataratas son las principales causas de discapacidad visual reversible, afectando a un total de 153 millones de personas, perjudicando a personas de entre 5 y 15 años<sup>3</sup>. Una de las ametropías que amenaza más a la población es la miopía, no solo por su alta prevalencia, sino también porque esta favorece a la morbilidad visual, por lo que aumenta el riesgo de enfermedades que afectan a la visión<sup>4</sup>.

La facultad visual es uno de los principales cinco sentidos del ser humano, por lo que lo hace muy importante, ya que con este se es capaz de percibir la luz, de identificar objetos, colores, o movimientos. A las personas que pueden tener la capacidad de ver sin problemas, se les dificulta comprender la importancia que tiene ésta en la vida, ya que desempeña un papel importante y fundamental en cada una de las etapas de la vida de las personas. Sin ella, al ser humano le cuesta más aprender a realizar actividades como lo son caminar, escribir, leer, participar en trabajos y/o escuela<sup>5</sup>.

## Causas principales de la discapacidad visual a nivel global

Se debe considerar que estas causas varían de un país a otro, ya que esto depende de la atención que reciben las personas por parte de profesionales de la salud visual (oftalmólogos y optometristas), de su economía, y de su nivel de educación<sup>5</sup>. A continuación se mencionan las principales causas que pueden llevar a una persona a sufrir de discapacidad visual, destacando que las dos primeras enfermedades son reversibles, mientras que las dos últimas resultan ser irreversibles:

- ▶ Errores de refracción
- ▶ Cataratas
- ▶ Retinopatía diabética
- ▶ Degeneración macular relacionada con la edad

## Surgimiento del braille

A medida que pasan los años, se han desarrollado alternativas para integrar a las personas con discapacidad visual al sistema de lectura y escritura. Aunque estos intentos

no lograron su objetivo por completo, fueron fundamentales para desarrollar técnicas que ayudaran a estas personas a participar en la lecto-escritura (ver la Figura 1).

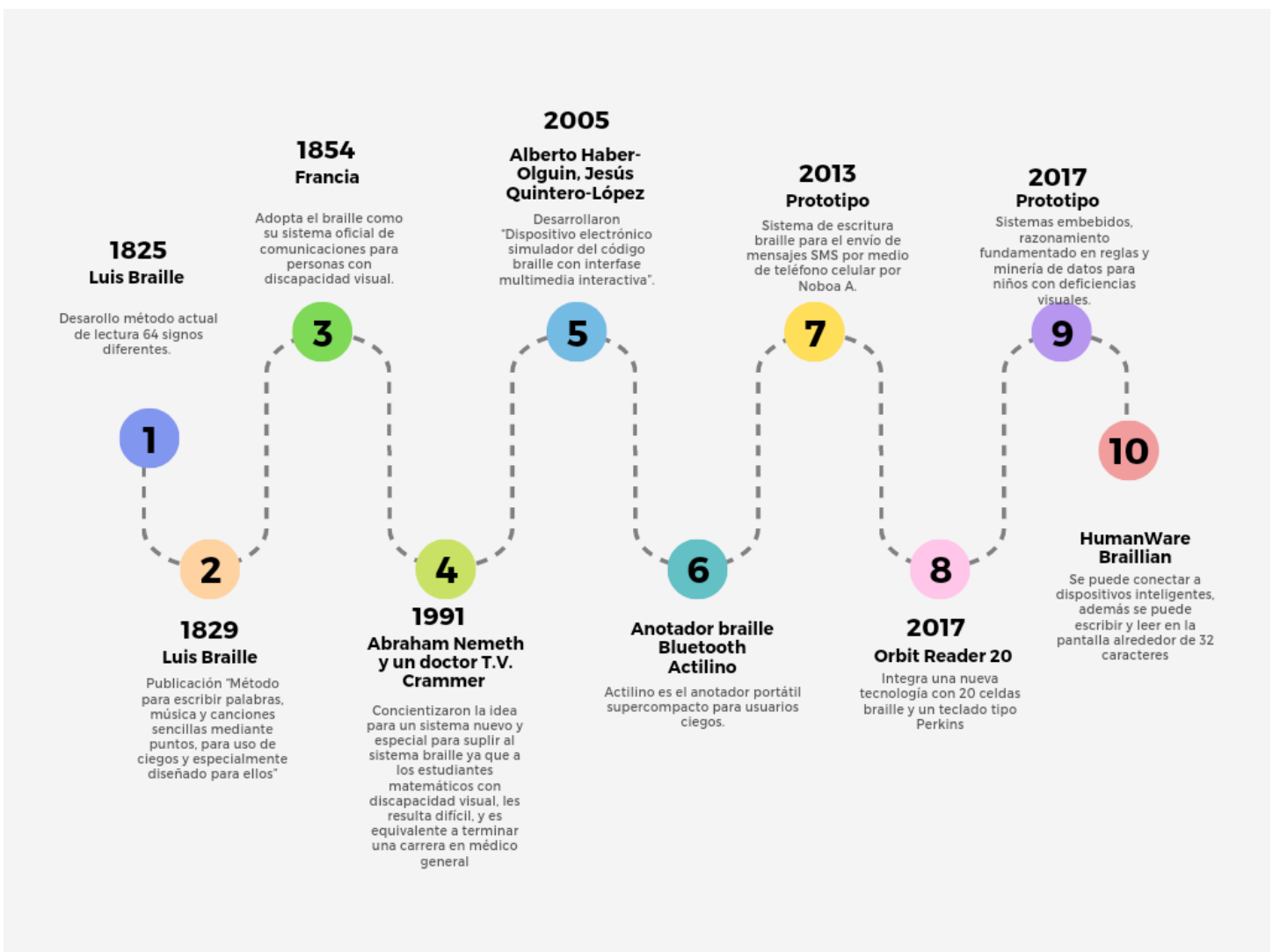


Figura 1. Línea del tiempo de los sistemas de lectoescritura braille<sup>6</sup>.



## Braile

El braille es un sistema fundamental utilizado por personas con discapacidad visual. Este método de lectoescritura está compuesto por seis puntos que pueden ser percibidos mediante el tacto de las yemas de los dedos, dichos puntos van del 1 al 6, donde la fila de la parte superior es correspondiente a los puntos 1 y 4, la fila que se ubica en el centro corresponde a los puntos 2 y 5, y por último la fila superior es correspondiente a los puntos 3 y 6. Se le conoce como “signo generador” al acomodo de los 6 puntos, ya que este es el origen para todas las disponibles combinaciones de puntos<sup>7</sup>.

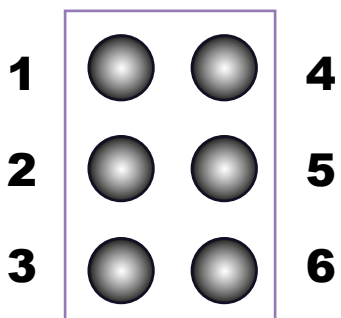


Figura 2. Signo generador<sup>7</sup>.

Estos puntos están dispuestos en una matriz de tres por dos, lo que permite la creación de una serie de códigos con significados específicos, tales como letras, números y signos especiales<sup>2</sup>.

Las personas con discapacidad visual grave interpretan estos códigos utilizando el sentido del tacto, lo que les permite leer y escribir. Este método táctil proporciona acceso a la información escrita y empodera a las personas con discapacidad visual, permitiéndoles participar activamente en la sociedad y enriquecer sus vidas de diversas maneras<sup>2</sup>.

## Lectoescritura del braille

El braille es un sistema de lectoescritura que usa una combinación de códigos diferentes al alfabeto de la escritura en tinta, por esta razón implica un aprendizaje distinto. Para la lectura es necesario reconocer por medio del tacto letra por letra, que a diferencia de la tinta es por reconocimiento de palabras completas. Es importante considerar que para lograr esto se requiere de una concentración muy alta, la cual es difícil de alcanzar a tempranas edades<sup>8</sup>, por lo que resulta más difícil la enseñanza para niños, sin embargo es importante que se les comience a involucrar en el aprendizaje del braille, para que logren la identificación de la mayoría o todos los códigos existentes en el sistema.

Regularmente para la comprensión de la lectura en braille se hace uso de los dedos índice, haciendo un deslizamiento muy ligero de izquierda a derecha. Para esto se indica que la velocidad media de lectura de una persona con una deficiencia visual es de unas 100 palabras por minuto, esto considerando diferentes factores de la persona<sup>8</sup>.

Para realizar la escritura en braille, ya sea utilizando una pizarra y punzón o una máquina, se necesitan diferentes elementos. En el caso de la pizarra y punzón, se requieren tres elementos esenciales: una regleta con celdillas, un punzón y una hoja de papel específica. Por otro lado, para utilizar la máquina Perkins, solo se necesitan dos elementos: la máquina misma y el papel adecuado. Es importante señalar que este papel no es convencional; debe tener un grosor mínimo para que los puntos punzados puedan resistir la fricción de los dedos sin deteriorarse fácilmente. Al utilizar la regleta es necesario escribir los signos de manera invertida, es decir, con el punzón sobre el papel, de derecha a izquierda; este proceso asegura la correcta formación de los caracteres braille<sup>2</sup>.

## Escritura alfabética en braille

En todos los idiomas se hace uso de acentos o de otros signos, para el complemento de la lectoescritura. En todos los idiomas se hace uso de acentos o de otros signos, para el complemento de la lectoescritura. En el idioma inglés existe el “acento prosódico”, este acento es apreciado en la pronunciación verbal. De esta forma se desestima la necesidad de memorizar símbolos especiales (acentos o tildes) que otros idiomas emplean. Por otro lado, tanto en el idioma español como en el francés, todas las vocales pueden estar o no acentuadas (modificando el acento o el diferente tipo de acento, o en ocasiones el significado de la palabra), en estos casos se ha notado el requisito de contar con signos especiales que simbolizan las vocales acentuadas<sup>9</sup>.

## Aprendizaje del braille

Al momento de leer braille se hace de letra por letra, ya que el tacto y la percepción espaciotemporal, solo permite leer letras y después formar las palabras. Para solucionar estos problemas, es esencial fomentar el aprendizaje por interpretaciones orales con la ayuda de utensilios tridimensionales.

### Tipos de movimiento de manos que existen para explorar líneas en un texto de braille

Se observan variaciones en la forma en que los lectores de braille mueven sus manos al explorar líneas de texto y al desplazarse de una línea a otra.

- En la **lectura unimanual**, una sola mano se utiliza para examinar el texto, donde el dedo de la mano izquierda se mantiene en el inicio de la línea mientras el dedo de la mano derecha se desplaza a lo largo del texto.

- En el caso de la **exploración conjunta**, ambos dedos índices se mueven juntos a lo largo de la línea, desplazándose uno al lado del otro.
- La **exploración disjunta** implica que los dedos índices se mueven de forma independiente a lo largo de la línea, de modo que cada mano estudia diferentes partes. Un ejemplo claro podría ser que, mientras una mano explora el principio de la línea, la otra se enfoca en la parte final de la línea.
- En la **exploración disjunta simultánea**, las dos manos leen distintas partes del texto al mismo tiempo, recopilando información en paralelo.
- Finalmente, la **exploración mixta** combina elementos de la exploración conjunta y la disjunta<sup>5</sup>.

### Técnicas para cambiar de una línea a otra en el lenguaje braille

El **patrón unimanual** implica que una sola mano realiza la transición a la siguiente línea, ya sea retrogradando a lo largo de la línea previamente leída o descendiendo a la línea siguiente y retrocediendo desde su inicio.

- El **patrón unimanual** con indicadores se caracteriza por el cambio de línea de una mano, mientras que el dedo índice de la otra mano se emplea como referencia para los cambios de línea, posicionándose al inicio de cada nueva línea.
- El **patrón bimanual-unimanual** involucra que ambas manos se coloquen al final de la línea; una de ellas desciende primero a la línea siguiente, seguida luego por la otra mano para reunirse con la primera.
- En el **patrón disjunto**, antes de que una mano haya completado la exploración de una línea, la otra se desplaza a la línea siguiente<sup>2</sup>.



## Método del trabajo

### Impacto del dispositivo

Para conocer si el dispositivo a realizar tendría un impacto dentro del grupo al que está dirigido (personas con discapacidad visual), se indagó en las estadísticas para conocer el problema de visión a nivel nacional, e incluso mundial. Se detectó que cada día más personas sufren de problemas de visión, ya que diversas enfermedades como lo es la diabetes son factores para desarrollar problemas de vista, también múltiples actividades que se realizan constantemente, como lo es el uso del celular, computadoras, o televisores; han llevado a las personas a tener una pérdida notable de visión.

Considerando lo antes mencionado, se comprende que el dispositivo a realizar se considera de gran ayuda para la sociedad, pues está diseñado para ser un artículo ergonómico, capaz de ayudar a la integración de las personas con discapacidad visual, facilitando la enseñanza y aprendizaje de la lectoescritura braille.

### Diseño del prototipo

El diseño del prototipo es algo importante por considerar, ya que se buscaba un dispositivo que tuviera un tamaño apto para poder llevarse fácilmente a todos lados, que fuera fácil de usar, y que el lenguaje se tradujera de manera clara. Para esto se contempló una estructura en forma de ratón vertical ergonómico, ya que este tipo de modelo cumpliría con la característica de ser un dispositivo cómodo, logrando que la mano y el brazo tengan una postura relajada.

El prototipo fue realizado en el software SolidWorks, y para la obtención de este se hizo uso de la impresión 3D.

### Diseño de la placa PCB

La placa PCB (de sus siglas en inglés, *Printed Circuit Board*) fue diseñada en el software de Proteus, la forma fue de acuerdo con la estructura que tiene la carcasa, que en este caso se tomó como referencia la base del *mouse*. Para la realización de la placa fue necesario hacer uso de diagramas para las conexiones de los solenoides.



**Figura 3.** Diagrama esquemático para la activación de un solenoide<sup>10</sup>

En la Figura 3 se muestra el diagrama esquemático de la instrumentación electrónica que hace posible que el microcontrolador ES32 envíe un pulso y active el solenoide.

Por otro lado, dentro del software Proteus, fue necesario hacer el acomodo de los elementos electrónicos, que conforman el dispositivo, los cuales se enumeran a continuación:

- ▶ ESP32 (microcontrolador de bajo costo)
- ▶ MOSFET
- ▶ Diodos
- ▶ Resistencias
- ▶ Regulador de voltaje (fue usado para que la batería alimente al microcontrolador y a los solenoides por separado).
- ▶ Solenoides

Estos componentes fueron acomodados en la placa tomando en cuenta los tamaños y simetrías. Después de obtener el diseño completo, se procedió a imprimir la placa con ayuda de la maquina fresadora CNC, haciendo uso de una fresa de 20 grados para realizar la impresión de las pistas, y con ayuda de una broca con un calibre más grande se realizó el corte (forma de la placa) y luego se comenzó con la perforación de la placa. Ya con la placa impresa, se procede a acomodar los componentes (microcontrolador, resistencias, diodos, MOSFET (por sus siglas en inglés, *Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor*, regulador de voltaje y solenoides) en los lugares indicados.

## Programación

Para la programación del dispositivo fue necesario hacer uso de códigos binarios, con el propósito de accionar cada uno de los solenoides, para esto se usaron aproximadamente 25 códigos. Se especificó cada una de las salidas de los pines, ya que esto se utilizó para acceder al texto y mandar a llamar cada uno de los códigos en binario, cada vez que se ingresa un texto, imprime el código binario, en este caso accionando cada uno de los solenoides. De esta forma se empiezan a formar las palabras por medio de los solenoides, y así la persona puede comenzar a identificar la lectoescritura en braille.

## Resultados

### Diseño del prototipo

A continuación se observa el diseño obtenido en el software SolidWorks (ver Figura 4), este tiene la forma de un mouse ergonómico (como se mencionó anteriormente), así mismo en la parte superior se muestran los solenoides acomodados en una matriz de tres por dos, cumpliendo el acomodo de los puntos para leer en braille, llamado "signo generador", que son los encargados de generar las palabras en braille a través de pequeños golpes que se dan en los dedos índice y medio de la mano de la persona.

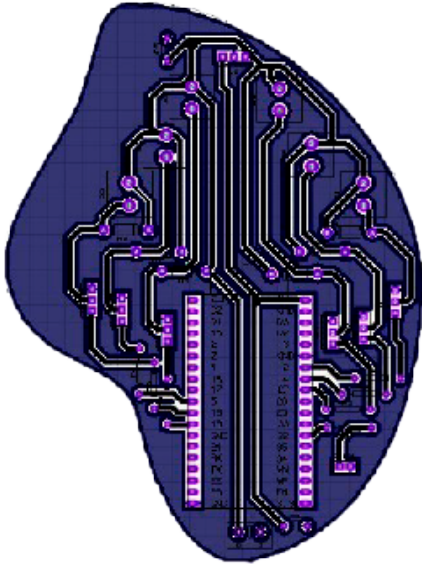


**Figura 4.** Diseño del mouse en SolidWorks (elaboración propia)"

### Diseño de la placa PCB

Se presenta el diseño de una placa PCB (ver Figura 5), funcional en su totalidad, y diseñada de acuerdo con las necesidades y estándares del dispositivo propuesto.

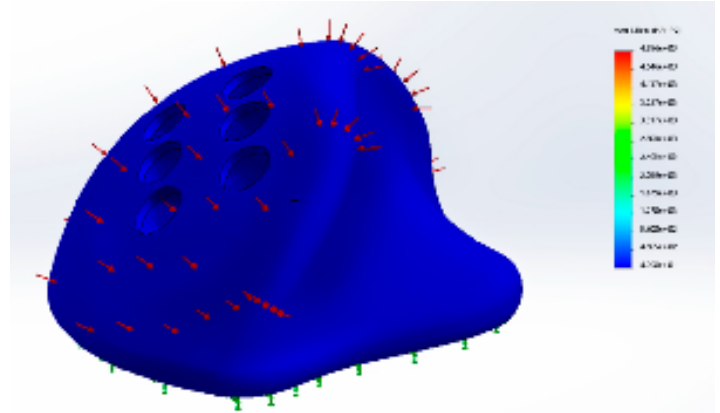




**Figura 5.** Diseño de placa PCB, del dispositivo propuesto (elaboración propia, se utilizó el software Proteus)<sup>10</sup>

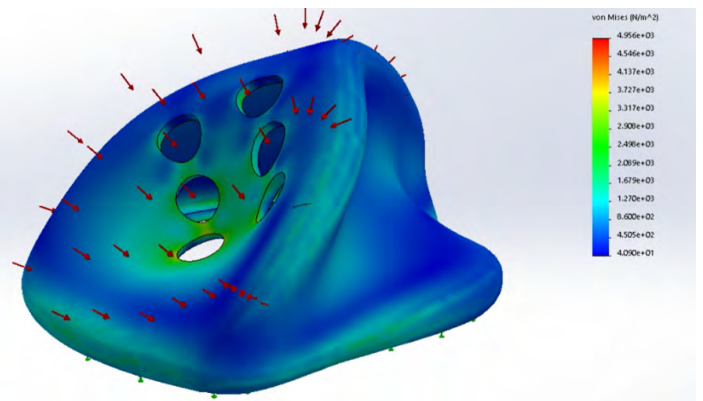
## Pruebas de fuerzas a la carcasa en SolidWorks

Posteriormente se obtuvo un prototipo en forma de *mouse* operacional para poder leer braille con ayuda de dos dedos (anular y medio), capaz de auxiliar a las y los usuarios a leer documentación digital en lenguaje braille. El diseño fue sometido a fuerzas ( $N/m^2$ ), esto se realizó en el software SolidWorks, las pruebas van desde una fuerza nula como se muestra en la Figura 6, una fuerza media que se observa en la Figura 7, y hasta una fuerza máxima que se puede ver en la Figura 8.



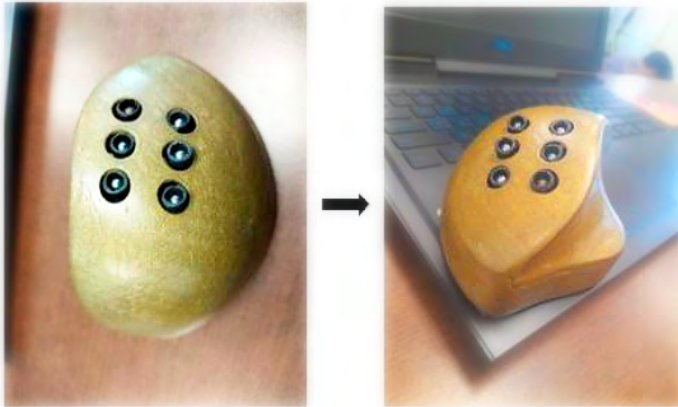
**Figura 6.** Distribución de fuerza nula (elaboración propia, se utilizó el software SolidWorks)<sup>11</sup>

En la Figura 6, se observa un estado sin aplicación de carga, lo cual da una referencia de las condiciones base del modelo. En este escenario, no hay deformaciones ni tensiones internas que afecten la estructura del *mouse*.



**Figura 7.** Distribución de fuerza media (elaboración propia, se utilizó el software SolidWorks)<sup>11</sup>

En la Figura 7, se aplica una fuerza intermedia, que simula condiciones normales de uso. Se pueden ver tensiones moderadas concentradas en áreas específicas de la carcasa, pero dentro de los límites seguros para su uso diario.

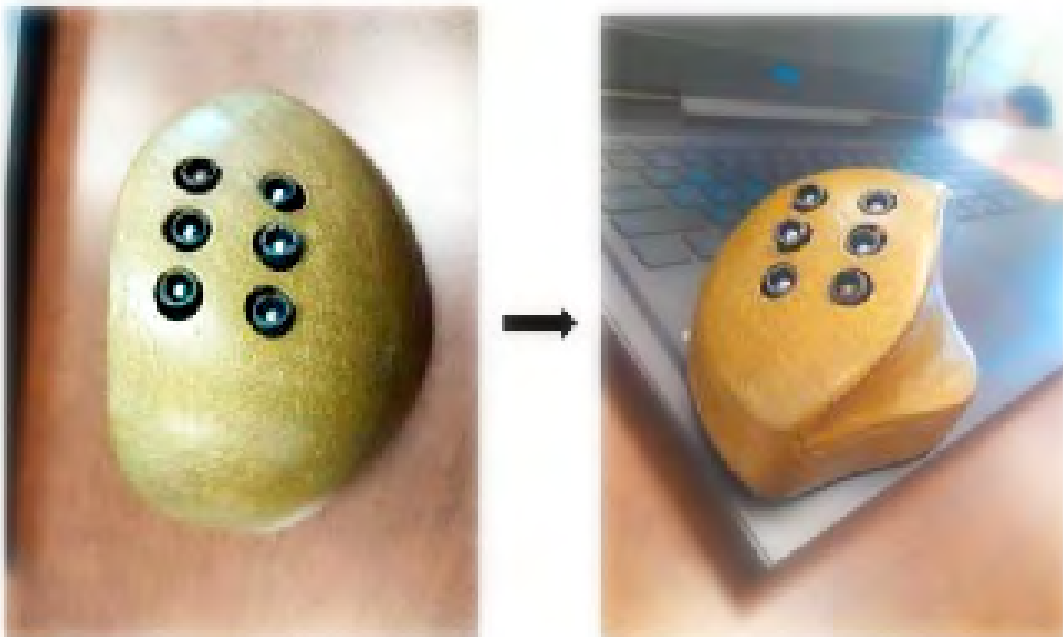


**Figura 8.** Distribución de fuerza máxima (elaboración propia, se utilizó el software SolidWorks)<sup>11</sup>

En la Figura 8, se muestra cómo la carcasa responde a una carga máxima. Las tensiones y deformaciones alcanzan sus valores más altos, particularmente en las zonas de mayor contacto, permitiendo evaluar la resistencia total del diseño.

### Prototipo final

Ya con todos los diseños (mecánicos y electrónicos) del *mouse*, se procedió a realizar su armado, haciendo las conexiones necesarias para su correcto funcionamiento. En la Figura 9 se puede observar el ensamble completo de cada una de las piezas desarrolladas, donde se muestra la carcasa en forma de un mouse ergonómico, y en la parte superior de este se observan los solenoides, que son los que darán pequeños golpes a los dedos índice y medio para formar palabras, y la persona con DV (discapacidad visual) pueda percibir las en lenguaje braille.



**Figura 9.** Ensamble completo (elaboración propia)



## Discusión

El diseño e implementación física de este dispositivo simboliza un avance significativo en la inclusión educativa y la accesibilidad para personas con discapacidad visual. Este proyecto se enfoca en la creación de un aparato en forma de mouse capaz de traducir documentos digitales a lenguaje braille mediante pequeños golpes por solenoides en los dedos índice y medio, utilizando el "signo generador de braille". La integración de la tecnología IoT (Internet de las cosas) y la IA (Inteligencia Artificial) en el dispositivo permite una experiencia de usuario más personalizada y adaptativa. La capacidad del dispositivo para aprender y adaptarse a la o el usuario mejora la precisión y la eficiencia de la traducción.

Este dispositivo en relación con otros desarrollos tecnológicos orientados a la lectura en braille, como las pantallas y los lectores electrónicos táctiles, cuenta con algunas ventajas, una que resalta es el bajo precio. Adicionalmente, a diferencia de estos, el diseño en forma de mouse ofrece una solución más compacta y portátil, centrada en la interacción directa con documentos digitales a través de un formato ergonómico.

Entre las limitaciones del dispositivo se encuentra su dependencia de una fuente de energía constante para los solenoides, así como la necesidad de refinar la precisión en la interpretación de caracteres braille en textos más complejos. La delimitación del proyecto se enfoca en su uso para la lectura de documentos sencillos, siendo necesaria una evolución posterior para aplicaciones más avanzadas como la lectura de gráficos o textos científicos.

## Conclusión

Este dispositivo es una herramienta que ofrece a las personas con discapacidad visual una alternativa para ampliar sus conocimientos. Producir libros en lenguaje braille resulta difícil y costoso, por lo que son escasos y, además, los existentes son principalmente literarios. Sin embargo, con este aparato, las personas pueden traducir libros de diversos temas sin preocuparse por la disponibilidad de una versión en braille. Además, el prototipo beneficia a quienes desean aprender o enseñar braille.

En las escuelas dedicadas a este lenguaje, los pocos libros existentes suelen estar desgastados y viejos, dificultando su lectura; ante esta situación, el dispositivo diseñado ayuda a mitigar el problema.

En resumen, este proyecto es de gran utilidad y fomenta la inclusión. Es importante destacar que no todas las personas tienen las mismas oportunidades, por lo que el objetivo principal del equipo autoral es asegurar la igualdad de oportunidades en la enseñanza del braille para todos y todas.

Adicionalmente, en la siguiente fase del proyecto, se llevarán a cabo pruebas exhaustivas del dispositivo con usuarias y usuarios finales para evaluar su funcionalidad y efectividad en un entorno real. Estas pruebas se realizarán en colaboración con la Secretaría de Educación de Guanajuato, mediante un convenio que permitirá trabajar directamente con estudiantes de educación básica con discapacidad visual. Este acuerdo facilitará la recolección de datos sobre la usabilidad del dispositivo y su impacto en el aprendizaje del braille. Los resultados de estas pruebas serán fundamentales para realizar ajustes en el diseño y asegurar que el dispositivo cumpla con las necesidades educativas de las y los estudiantes.

## Referencias

1. MARTÍNEZ-LIÉBANA, Ismael y Polo Chacón, Delfina. *Guía didáctica para la lectoescritura braille*. Madrid. Organización Nacional de Ciegos Españoles (ONCE). 2004. 95 pp. ISBN: 84-484-0149-2.
2. LLANOS BERMÚDEZ, Jorge Esteban y Hurtado Pardo, Édgar Felipe. Aplicación móvil con procesamiento de imágenes en la nube para la transcripción de Braille literario a texto en español. *Repositorio Institucional Universidad Distrital - RIUD*. [En línea]. Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas. Diciembre 6, 2022. [Fecha de consulta: 11 de septiembre de 2023]. <http://hdl.handle.net/11349/31254>.
3. SUÁREZ ESCUDERO, Juan Camilo. Discapacidad visual y ceguera en el adulto: Revisión de tema. *Medicina UPB*. [En línea]. Vol.30 (2), pp. 170-180. Jul-Dic 2011. Fecha de consulta: 11 de septiembre de 2023]. <https://www.redalyc.org/pdf/1590/159022496008.pdf>
4. GOSS, David A., Grosvenor, Theodore.P., Keller, Jeffrey. T., Marsh-Tootle, Wendy, Norton., Thomas T. and Zadnick, Karla. *Care of the patient with myopia*. St. Louis, Missouri, EE. UU. American Optometric Association. 1997, rev. 2001.
5. ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. *Ceguera y discapacidad visual*. [En línea]. Agosto 10, 2023. [Fecha de consulta: 14 de junio de 2023]. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/blindness-and-visual-impairment>
6. LOPEZ MUÑOZ, Stephany; Urbano Márquez, Cristal K., Ordaz Cervantes, María G., López Ramírez, José L., Pérez Zuñiga, Germán y Colín Robles, José de J. Sistema de Lectoescritura Braille, Como Herramienta de Aprendizaje. *Investigaciones y Desarrollos Tecnológicos en México*. No. 1, Tomo 6 Ingenierías, pp. 57-62. 2023. Disponible en [https://www.cio.mx/archivos/investigaciones\\_desarrollos\\_tecnologicos/tomo\\_6.pdf](https://www.cio.mx/archivos/investigaciones_desarrollos_tecnologicos/tomo_6.pdf)
7. RUIZ BARRERO, Olga Lucía. *INTERACTUANDO CON EL BRAILLE*. Bogotá : Instituto Nacional para Ciegos -INCI. 2020. <https://www.inci.gov.co/sites/default/files/cartillas/InteractuandoconelBraille.pdf>
8. SIMÓN, Cecilia; Ochaíta, Esperanza y Huertas, Juan Antonio. El sistema Braille: Bases para su enseñanza-aprendizaje. *Comunicación, lenguaje y educación*. No. 28, pp. 91-102. 1995.
9. LOZA PEÑALOZA, Oscar Patricio. Sistema electrónico braille para la ayuda en el aprendizaje de personas no videntes. [En línea]. [Fecha de consulta: 20 de agosto de 2023]. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5968323.pdf>
10. LABCENTER ELECTRONICS. Proteus Design Suite (Versión 8.14). [Software de desarrollo y simulación electrónico]. 2024. York, Reino Unido: Labcenter Electronics Ltd.
11. DASSAULT SYSTEMES. SolidWorks (Versión 2024) [Software de diseño CAD]. Dassault Systèmes. <https://www.solidworks.com>

**Fecha de recepción**

10/11/2023

**Fecha de aceptación**

13/06/2024

**Fecha de publicación**

30/09/2024



# Baterías de litio-azufre (Li-S) con carbones a partir de residuos de la producción del tequila

*Lithium-sulfur (Li-S) batteries with carbon from tequila production waste*

Javier Antonio Arcibar Orozco y Oscar Emmanuel Valdivia Moreno / Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas (CIATEC)

## Resumen

La crisis energética actual motiva la investigación de nuevas formas de almacenamiento de energía. Las baterías de litio-azufre (Li-S) son candidatas a ser la nueva generación de baterías recargables, si pueden mejorarse sus reacciones internas. El soportar azufre dentro de carbón poroso puede facilitar la electroquímica de estas baterías. La modificación del carbón poroso es determinante en su desempeño como cátodo. Los nitruros de carbón grafítico ( $g-C_3N_4$ ) pueden mejorar la adsorción de polisulfuros, disminuyendo la pérdida de azufre, mejorando así la capacidad y estabilidad de las baterías. El presente trabajo ofrece los resultados de la obtención de carbones porosos a partir de fibras de bagazo de agave modificados con  $g-C_3N_4$  y su efecto en las baterías Li-S. Los resultados sugieren la mejora en obtención de energía por el nitruro de carbón grafítico. Estos resultados son prometedores para el mejoramiento de la capacidad de baterías de litio azufre.

**Palabras clave:** litio-azufre, energía, baterías, nitruro, tequila

## Abstract

The current energy crisis motivates the investigation of new forms of energy storage. Lithium-sulfur (Li-S) batteries are candidates to be the next generation of rechargeable batteries, if their internal reactions can be improved. Supporting sulfur within porous carbon can facilitate the electrochemistry of these batteries. The modification of porous carbon is decisive in its performance as a cathode. Graphitic carbon nitrides ( $g-C_3N_4$ ) can improve the adsorption of polysulfides, decreasing sulfur loss, thus improving the capacity and stability of the batteries. The present work offers the results of obtaining porous carbons from agave bagasse fibers modified with  $g-C_3N_4$  and its effect on Li-S batteries. The results suggest the improvement in energy harvesting by graphitic carbon nitride. These results are promising for the improvement of the capacity of lithium sulfur batteries.

**Keywords:** lithium-sulfur, energy, batteries, nitride, tequila



## Introducción

Hoy en día existe una evidente crisis energética relacionada con el almacenamiento de energía, numerosos estudios han confirmado que las baterías actuales de litio no tienen capacidad para satisfacer la demanda energética actual y futura<sup>1</sup>, por esta razón se invierte una gran cantidad de tiempo y recursos en investigar nuevas formas de almacenamiento y conversión de energía.

Dentro de los nuevos tipos de baterías, se encuentran las de litio-azufre (LISB), las cuales tienen una capacidad teórica de hasta cinco veces mayor a las de ion de litio, sin embargo, las baterías de litio-azufre aún tienen varios problemas que no permiten alcanzar su capacidad teórica y tienen que ver con la falta de reversibilidad de sus reacciones químicas. Cuando una LISB se descarga, los iones de litio rápidamente reaccionan con el azufre formando polisulfuros de litio y reduciendo el azufre ( $2\text{Li} + \text{S} \leftrightarrow \text{Li}_2\text{S}$ ). A su vez, los polisulfuros seguirán reaccionando con los iones de litio hasta alcanzar su estado más reducido.

Durante el proceso de reducción, se obtiene corriente a un voltaje de entre 1.9 a 2.8 V. Al aplicar corriente en la dirección contraria, los iones de litio se oxidan regresando a las condiciones originales de la pila (es lo que dice la teoría). En la práctica, cuando la pila se reduce, se forman polisulfuros de litio de cadena larga, los cuales son solubles en los electrolitos empleados. Por lo tanto, a medida que se forman, una parte se desprende del cátodo y migra de vuelta al ánodo, donde contribuye a reacciones indeseables que desvanecen la capacidad de la batería. Con el tiempo, se descubrió que es posible disminuir este efecto al soportar el azufre dentro de los poros de un material carbonáceo<sup>2</sup>. Así, el carbón sirve como

un adsorbente, reteniendo los polisulfuros y permitiendo que se reduzcan antes de desprenderse del cátodo. La efectividad del carbón empleado dependerá de su estructura porosa y química superficial, que a su vez dependen de la forma que fueron obtenidos y su material de origen<sup>3</sup>. Cuando se obtienen a partir de residuos, no solamente se da una solución tecnológica con atractivo comercial, sino que inherentemente se contribuye a la disminución del impacto ambiental de las baterías.

Recientemente, se ha encontrado que, si se incrementa la cantidad de nitrógeno en el carbón, se puede mejorar la capacidad de retención de estos polisulfuros mejorando la estabilidad de la batería<sup>4</sup>, sin embargo, esto dependerá de la estructura porosa y condiciones de síntesis de carbón.

En el presente trabajo de investigación se muestra la obtención de carbón activado, a partir de bagazo de agave, empleando microondas para su activación y posteriormente modificándolo para introducir una elevada cantidad de nitrógeno en la forma de nitruro de carbón gráfico ( $\text{g-C}_3\text{N}_4$ ).

### Objetivo:

Evaluar el efecto de la presencia de nitruro de carbón gráfico sobre carbones obtenidos a partir de residuos del bagazo de agave activados a dos temperaturas diferentes, sobre la capacidad específica de baterías de litio-azufre.



## Planteamiento del problema

La elaboración de un litro de tequila produce hasta 4 kg de residuos, siendo el más importante de ellos el bagazo de agave. En el 2023 se produjeron cerca de 640 000 000 L de tequila<sup>5</sup>, es decir 2 560 000 t de residuos, de los cuales el 13 % (332 800 t) se generaron en Guanajuato. El bagazo de agave es un residuo rico en lignina, por eso puede ser convertido en un carbón poroso. Dicho carbón ha demostrado tener una excelente estructura porosa compuesta de mesoporos y microporos que permiten la captura y almacenamiento de compuestos de interés, entre los cuales se encuentra el azufre. Así es posible conformar cátodos para obtener baterías de litio-azufre<sup>6</sup>.

Aunque se han demostrado las ventajas de soportar azufre en carbón, aún no es posible obtener baterías que tengan las condiciones adecuadas para que puedan ser escaladas a un nivel comercial. Esto es debido a que el carbón poroso en sí no impide en su totalidad el desprendimiento de los polisulfuros de cadena larga. Es decir, carece de afinidad química por los intermediarios. Por lo tanto, se ha buscado insertar grupos químicos en el carbón que retengan los polisulfuros formados, impidiendo la pérdida de material activo, mejorando así las reacciones de la batería y con ello su capacidad.

El nitruro de carbón grafítico ( $g\text{-C}_3\text{N}_4$ ), es un semiconductor rico en nitrógeno que puede funcionar como un sitio activo para la atracción electrostática de polisulfuros<sup>7</sup>, lo que puede promover la reducción de estos antes de que se desprendan del cátodo. Sin embargo, es importante preservar la porosidad del carbón, ya que, si el nitruro se deposita bloqueando los poros de este, disminuirá su capacidad para acumular azufre.

## Método de trabajo

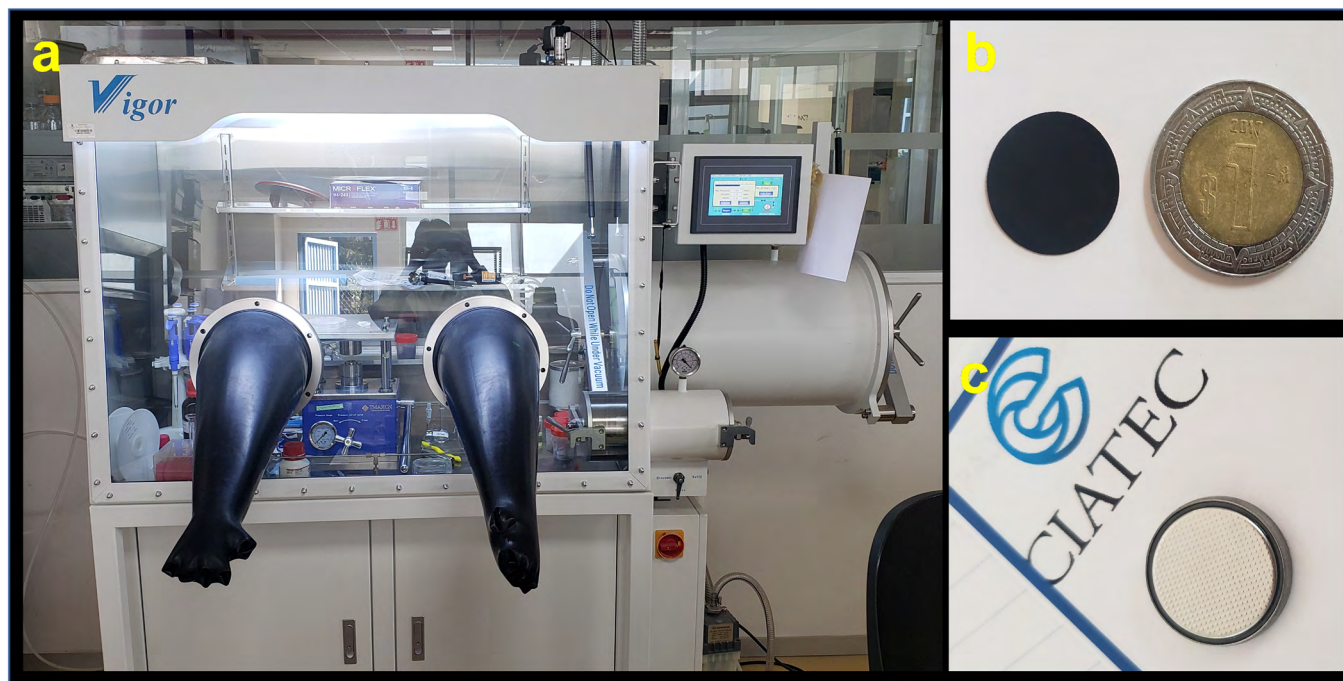
Se obtuvieron dos carbones activados con condiciones de pirólisis diseñadas para crear diferencias en su porosidad.

Durante la síntesis, el bagazo de agave se pirolizó a una temperatura de 430 °C durante 40 minutos para el M1 y 800 °C durante 120 min para el M2. Para la activación se mezcló el carbón e hidróxido de potasio en una relación 1:1, posteriormente, cada uno de los carbones se activaron en un microondas (15 minutos).

Después de la activación, los materiales se lavaron con agua desionizada hasta pH constante de 7. Para la incorporación del nitruro de carbón grafítico, los carbones sintetizados M1 y M2 se mezclaron con un precursor (dicianamida), en una relación 4:1. El material fue calentado a 550 °C durante 4 h y posteriormente se lavaron con agua desionizada hasta pH constante de 7. Los materiales sintetizados se nombraron M1gC3N4 y M2gC3N4, estos se caracterizaron mediante difracción de rayos X (se utilizó un difractómetro Bruker D8 Advance), microscopía electrónica de barrido (mediante un microscopio Helios 600 Nanolab), espectroscopía infrarroja (se usó un espectrómetro Thermo Nicolet i10) y carga superficial en una tituladora automática (Metrohm 800 Dosino).

La deposición de azufre en los materiales se llevó a cabo mediante la reducción del tiosulfato de sodio en solución acuosa con ácido sulfúrico. Las condiciones se obtuvieron de la literatura<sup>8</sup> con el objetivo de obtener un 80 % de azufre con respecto a la masa del carbón con nitruro de carbón grafítico. Los materiales se nombraron con un extra "+S" para identificar que contienen azufre. Para la síntesis de los cátodos, los materiales con azufre se mezclaron con negro de carbón y fluoruro de polivinilideno en una relación (70:10:20), empleando dimetilsulfóxido como solvente<sup>6</sup>; esta mezcla se depositó sobre un sustrato de cobre y se secó para formar una película que posteriormente se cortó en discos de 1.5 cm. Los cátodos fueron introducidos en una caja de guantes con atmósfera de argón, donde

se ensamblaron baterías tipo moneda (CR2032) usando una lámina de litio como ánodo y como electrolito una mezcla de 1,2 dimetoxietano y éter dimetílico de tetraetilenglicol (ver Figura 1). Las baterías ensambladas se evaluaron en un medidor de rendimiento de baterías (Landtl CT3002AU).



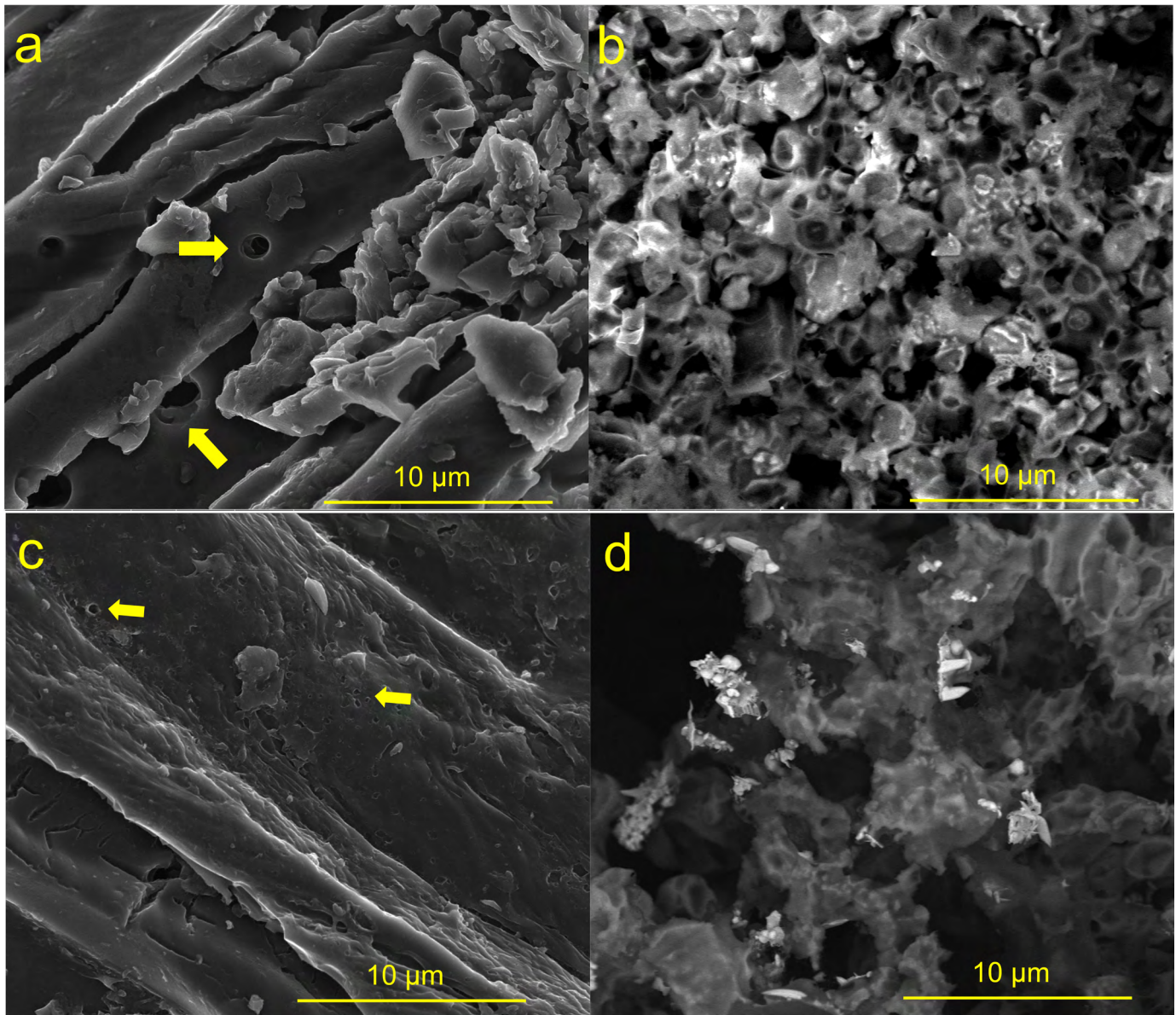
**Figura 1.** a) Caja de guantes empleada para el armado de baterías; b) Cátodo sintetizado y cortado, se muestra una moneda de 1 MXN para comparación y c) fotografía de la batería CR2032 armada.

## Resultados

Las micrografías de los materiales se muestran en la Figura 2. La superficie de la muestra M1gC3N4 (Figura 2a) denota una clara porosidad y una estructura predominantemente amorfa, donde la presencia de hojuelas en la superficie sugiere la presencia de dominios con  $g\text{-C}_3\text{N}_4$ . La Figura 2b muestra el M1gC3N4+S, donde se observa un recubrimiento similar al de una esponja macroporosa. El material M2gC3N4 (Figura 2c) muestra una estructura con canales

porosos conectados a la superficie y una mayor rugosidad, que se atribuye a la mayor temperatura empleada en la síntesis con respecto al M1gC3N4, y a las ventajas del uso de microondas como instrumento de activación. La figura 2d, muestra el material M2gC3N4+S, donde su estructura es similar a la observada en el M1gC3N4+S y predominantemente controlada por la presencia de azufre.





**Figura 2.** Micrografías de los materiales sintetizados, la imagen corresponde a los materiales: a) M1gC3N4, b) M1gC3N4+S, c) M2gC3N4 y d) M2gC3N4+S. Todas las imágenes se obtuvieron a 5000x de magnificación. La flecha señala los canales porosos en los materiales sin azufre.

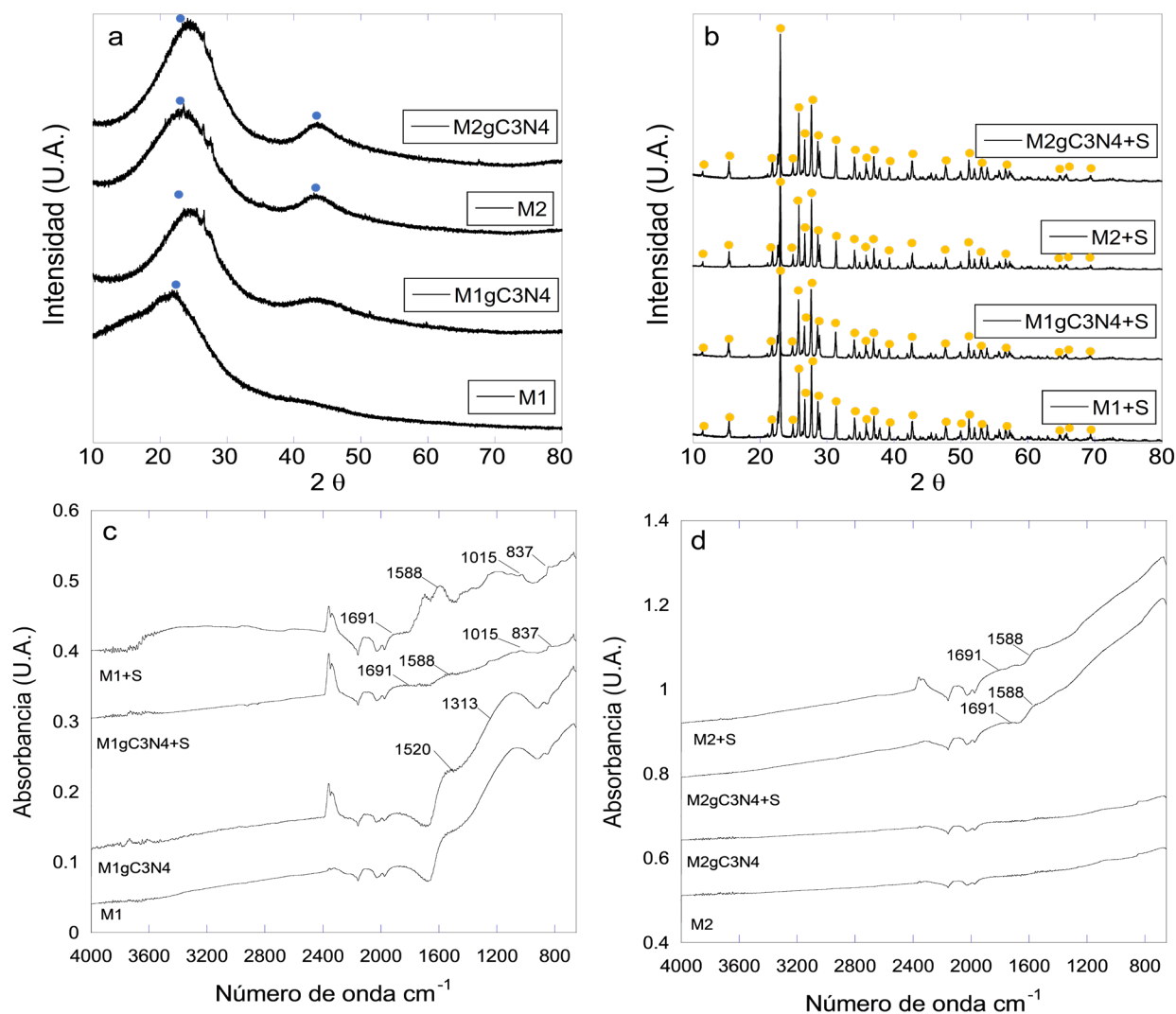
Los resultados de la difracción de rayos X se encuentran en la Figura 3a y 3b. M1 presentó solamente un pico a  $22^\circ$ , que está relacionado con el plano (002) del grafito; el pico está ensanchado, indicando la naturaleza amorfa del carbón y su bajo nivel de carbonización.

Por otro lado, el M2 demostró dos picos ensanchados a  $23.4^\circ$  y  $43.1^\circ$  correspondientes a los planos (002) y (101)<sup>9</sup>. Ambos carbonos arrojaron patrones similares a los de carbonos amorfos, como se esperaba de estos materiales. Los picos entre  $10^\circ$  y  $30^\circ$  pueden estar relacionados

con el contenido inorgánico natural de estos materiales, que se vuelve intenso a medida que incrementa la pirólisis (por la pérdida de carbón).

Los espectros de Infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR) de los materiales se muestran en la Figura 3 c y d, el M1 y M2 indicaron que hay una baja concentración de grupos oxigenados

o de otro tipo sobre la superficie de los carbones. La presencia del nitruro de carbón gráfico no demostró rasgos característicos, salvo por pequeñas vibraciones a 1520 y 1313  $\text{cm}^{-1}$ , presentes únicamente en el M1gC3N4. Los materiales con azufre demuestran bandas a 1691, 1588 y 1015 y 837  $\text{cm}^{-1}$ , atribuibles al azufre octaédrico<sup>10</sup>.

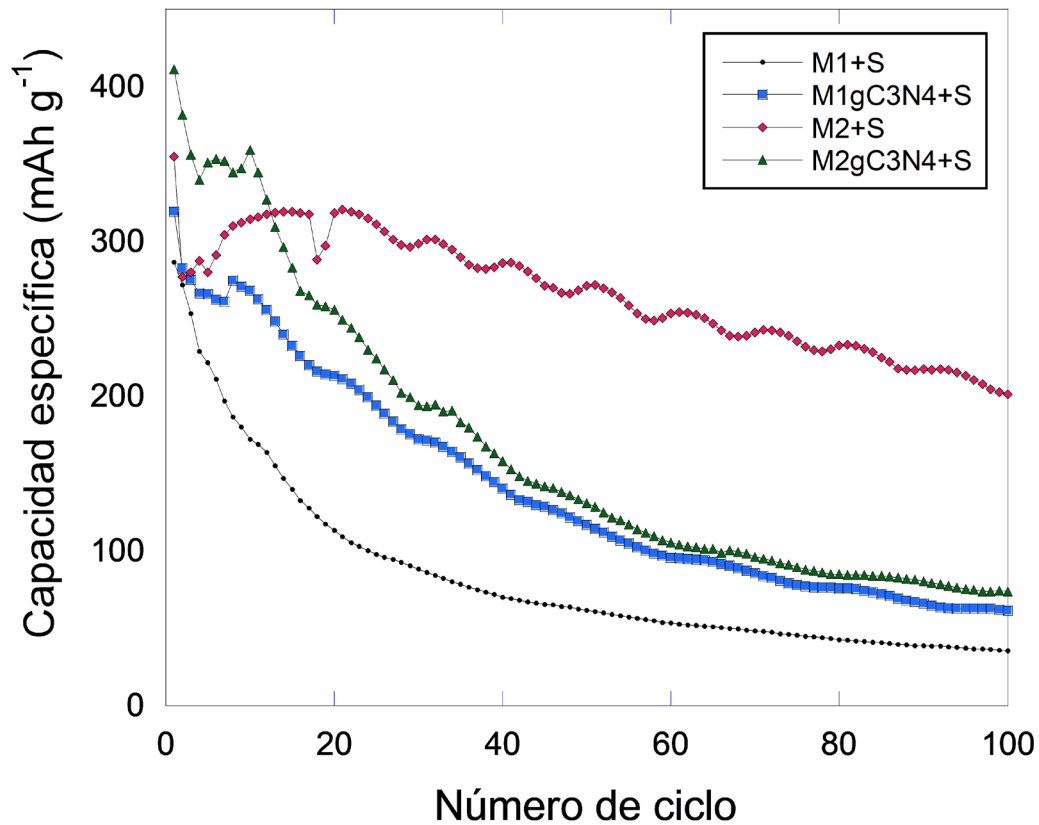


**Figura 3.** Resultados de la caracterización de los materiales estudiados a) XRD de las muestras M1 y M2 con y sin g-C3N4, donde los círculos azules corresponden al grafito b) XRD de las muestras M1 y M2 con y sin g-C3N4 con azufre, donde los círculos naranjas corresponden al azufre octaédrico c) FTIR de las muestras M1, M1gC3N4, M1gC3N4+S y M1+S, d) FTIR de las muestras M2, M2gC3N4, M2gC3N4+S y M2+S.



Finalmente, el rendimiento de las baterías se muestra en la Figura 4. El material M1+S tuvo una capacidad inicial de  $286 \text{ mAhg}^{-1}$  y rápidamente disminuyó hasta  $172 \text{ mAhg}^{-1}$  en el ciclo 10, y  $113 \text{ mAhg}^{-1}$  en el ciclo 20. Para el ciclo 40 se encontraba en  $70 \text{ mAhg}^{-1}$  y para el 100

en  $35 \text{ mAhg}^{-1}$ , es decir con una disminución en promedio de  $1.14 \%$  en cada ciclo o alrededor de una pérdida de capacidad de  $0.59 \text{ mAhg}^{-1}$  en cada ciclo.



**Figura 4.** Resultados de las pruebas de carga y descarga de los materiales estudiados a 100 ciclos.

## Discusión de resultados

Morfológicamente no fue posible identificar una región completamente atribuible al nitruro, en parte debido a su naturaleza poco cristalina y desorganizada, que comparte similitudes con el carbón activado. La diferencia entre el M1gC<sub>3</sub>N<sub>4</sub> y M2gC<sub>3</sub>N<sub>4</sub> es que en el primero aún fue posible observar características morfológicas análogas a la fibra del bagazo de agave, ya que la condición de pirólisis no fue tan severa para destruir las estructuras del material precursor. En los materiales híbridos con g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> no fue posible identificar claramente señales atribuibles a este material, esto puede deberse a la baja cristalinidad del g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Reportes han demostrado que el g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> puede tener picos a 13 y 27 ° debido a la estructura de la tri-s-triazina y el espaciado interplanar del sistema aromático<sup>11</sup>. En estos materiales es posible que la partícula depositada sea demasiado pequeña para difractar de una manera significativa. El patrón de difracción de rayos X de los materiales con azufre indica la presencia de azufre octaédrico (JCPDS, Joint Committee on Powder Diffraction Standards, por sus siglas en inglés: 08-0247). Esto concuerda con lo esperado para la síntesis y las condiciones experimentales de este estudio.

Con respecto a los resultados de carga y descarga, la presencia del nitruro tuvo un efecto considerablemente positivo sobre la estabilidad y capacidad. Primero, la capacidad inicial de descarga fue de 319 mAhg<sup>-1</sup>, es decir, un 11 % más de capacidad, y para el ciclo 10 se tenía una capacidad de 268 mAhg<sup>-1</sup>, un 55 % de mejora y para el ciclo 20 se encontraba en 213 mAhg<sup>-1</sup> (88 % de incremento). A partir del ciclo 40 y hasta el ciclo 100, se tuvo una pérdida de 0.03 mAhg<sup>-1</sup> en cada ciclo. En el ciclo 100, se tiene un 70 % de más capacidad, atribuido a la presencia del g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Por otro lado, en el material sintetizado a 800 °C se observó el efecto contrario, la capacidad de

descarga inicial del M2 fue de 354 mAhg<sup>-1</sup>, esta disminuyó y posteriormente de forma rápida volvió a incrementar después del ciclo 5. Al ciclo 10 tiene una capacidad de 314 mAhg<sup>-1</sup> y al 20 de 318 mAhg<sup>-1</sup>.

En el ciclo 40 es de 286 mAhg<sup>-1</sup> y posteriormente una pérdida de 1.4 mAhg<sup>-1</sup> en cada ciclo. Cuando se estudió el material M2 con g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> se obtuvo una mayor capacidad inicial de descarga (411 mAhg<sup>-1</sup>); sin embargo, esta disminuyó rápidamente, para el ciclo 10 fue de 359 mAhg<sup>-1</sup> (un 14 % menor) y para el ciclo 20 de 256 mAhg<sup>-1</sup>, (un 19 % menor). De ahí se midió una capacidad menor que la del material sin nitruro y en promedio un 51 % menor que la del material sin nitruro. Estos resultados son similares a los reportados para nanoesferas de carbón con nitruro de carbón grafitico<sup>12</sup>.

## Conclusiones

Los resultados indican que el nitruro puede ser un agente mejorador de la capacidad de descarga de las baterías de Li-S, pero solamente cuando el material se ha sintetizado a una temperatura de 430 °C. La razón de esta diferencia, con respecto al material con mayor temperatura, probablemente esté ligada a la estructura porosa formada y a la conductividad de los carbones. El emplear mayores temperaturas normalmente resulta en un incremento en la cantidad de microporos y también incrementa la conductividad del material. Cuando se deposita el g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> este puede penetrar y bloquear poros del carbón, disminuyendo la capacidad de retención de polisulfuros y afectando la conductividad del material, por lo tanto, no resulta en la mejora de la capacidad. Sin embargo, cuando se tiene una porosidad menor, el nitruro deja espacio disponible para que se acumulen los polisulfuros y permite que se atraigan gracias a la abundancia de nitrógeno.



En este punto su presencia permite mejorar la capacidad específica de la batería. Las baterías obtenidas aquí tuvieron capacidades bajas, pero comparables a las de otros carbones naturales como el hueso de la aceituna<sup>13</sup>, jacinto de agua<sup>14,15</sup> y residuos de llanta<sup>16</sup>.

## Agradecimientos

El presente proyecto fue financiado por el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnología (CONAHCYT), a través de los proyectos de Ciencia de Frontera.

## Referencias

- EVARTS, E. C. Lithium batteries: To the limits of lithium. *Nature*. [En línea]. Vol. 526, S93-S95. 2015. [Fecha de consulta: 3 de mayo de 2024]. Disponible en <https://www.nature.com/articles/526S93a> ISSN: 1476-4687.
- Ji, Xiulei; Lee, Kyu Tea and Nazar, Lynda F. A highly ordered nanostructured carbon-sulphur cathode for lithium-sulphur batteries. *Nature Materials*. [En línea]. Vol. 8 (6): 500-506. 2009. [Fecha de consulta: 3 de mayo de 2024]. Disponible en <https://www.nature.com/articles/nmat2460> ISSN: 1476-1122.
- WANG, Da Wei; Zeng, Qingcong; Zhou, Guangmin; Yin, Lichang; et al. Carbon-sulfur composites for Li-S batteries: status and prospects. *Journal of Materials Chemistry A*. [En línea]. Vol. 1 (33): 9382-9394. 23 Apr, 2013. [Fecha de consulta: 3 de mayo de 2024]. Disponible en <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2013/ta/c3ta11045a> ISSN: 2050-7496.
- LI, Xia and Sun, Xueliang. Nitrogen-doped carbons in Li-S batteries: materials design and electrochemical Mechanism. *Frontiers in Energy Research*. [En línea]. Vol. 2, 2014. [Fecha de consulta: 3 de mayo de 2024]. Disponible en <https://www.frontiersin.org/journals/energy-research/articles/10.3389/fenrg.2014.00049/full> ISSN: 2296-598X.
- EL CONSEJO REGULADOR DEL TEQUILA. *Visualiza agroindustria tequilera para 2024 continuar con la planeación estratégica de esta cadena productiva*. [En línea]. 2024. [Fecha de consulta: 3 de mayo de 2024]. Disponible en <https://www.crt.org.mx/2024/03/07/visualiza-agroindustria-tequilera-para-2024-continuar-con-la-planeacion-estrategica-de-esta-cadena-productiva/>
- ARVIZU-RODRÍGUEZ, Liliana E., Olvera-Sosa, Miguel; Arcibar-Orozco, Javier Antonio; Chazaro-Ruiz, Luis Felipe; et al. Carbons Derived from Agave tequilana Fibers Efficient Sulfur Supports for High-Performance Lithium-Sulfur Batteries. *Energy Technology*. [En línea]. Vol. 12 (1): 2300743. 03 November, 2023. [Fecha de consulta: 3 de mayo de 2024]. Disponible en <https://doi.org/10.1002/ente.202300743> ISSN: 2194-4296.
- LIANG, Ji; YIN, Lichang; Tang, Xiaonan; Yang, Huicong; et al. Kinetically Enhanced Electrochemical Redox of Polysulfides on Polymeric Carbon Nitrides for Improved Lithium-Sulfur Batteries. *ACS Applied Materials & Interfaces*. Vol. 8 (38): 25193-25201. 2016. ISSN: 1944-8252.
- CHAUDHURI, Rajib Ghosh y Paria, Santanu. Synthesis of sulfur nanoparticles in aqueous surfactant solutions. *Journal of Colloid and Interface Science*. Vol. 343 (2): 439-446. 2010. ISSN: 0021-9797.
- TODICA, M., Stefan, Traian; Simon, Simion; Balasz, Istvan y Daraban, Liviu. UV-Vis and XRD investigation of graphite-doped poly (acrylic) acid membranes. *Turkish Journal of Physics*. [En línea]. Vol. 38 (2): 261-267. 2014. [Fecha de consulta: 3 de mayo de 2024]. Disponible en <https://journals.tubitak.gov.tr/cgi/viewcontent.cgi?article=1355&context=physics> ISSN: 1303-6122.
- AWWAD, Akl M., Salem, Nidá M. and Abdeen, Amany O. Novel approach for synthesis sulfur (S-NPs) nanoparticles using Albizia julibrissin fruits extract. *Advanced Materials Letters*. [En línea]. Vol. 6(5): 432-435. 2015. [Fecha de consulta: 3 de mayo de 2024]. Disponible en [https://www.researchgate.net/publication/275894435\\_Novel\\_Approach\\_For\\_Synthesis\\_Sulfur\\_S-NPs\\_Nanoparticles\\_Using\\_Albizia\\_Julibrissin\\_Fruits\\_Extract](https://www.researchgate.net/publication/275894435_Novel_Approach_For_Synthesis_Sulfur_S-NPs_Nanoparticles_Using_Albizia_Julibrissin_Fruits_Extract) ISSN: 0976-397X.



11. CAO, Jianliang; Qin, Cong; Wang, Yan; Zhang, Huoli; *et al.* Solid-State Method Synthesis of SnO<sub>2</sub>-Decorated g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Nanocomposites with Enhanced Gas-Sensing Property to Ethanol. *Materials*. [En línea]. Vol. 10 (6): 604. 2017. [Fecha de consulta: 3 de mayo de 2024]. Disponible en <https://www.mdpi.com/1996-1944/10/6/604> ISSN: 1996-1944.
12. ZHANG, Hang; Zhao, Zongbin; Hou, Yanan; Tang, Yongchao; *et al.* Nanopore-confined g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> nanodots in N, S co-doped hollow porous carbon with boosted capacity for lithium-sulfur batteries. *Journal of Materials Chemistry A*. Vol. 6 (16): 7133-7141. March 2018. ISSN: 2050-7488.
13. MORENO, Noelia; Caballero, Álvaro; Hernán, Lourdes y Morales, Julián. Lithium-sulfur batteries with activated carbons derived from olive stones. *Carbon*. Vol. 70, p. 241-248. 2014. ISSN: 0008-6223.
14. NURHILAL, Otong; Hidayat, Sahrul; Sumiarsa, Dadan y Risdiana, Risdiana. Natural Biomass-Derived Porous Carbon from Water Hyacinth Used as Composite Cathode for Lithium Sulfur Batteries. *Sustainability*. Vol. 15 (2):1039. 2023. ISSN: 2071-1050.
15. NURHILAL, Otong; Winarsih, Suci; Hidayat, Sahrul; Sumiarsa, Dadan y Risdiana, Risdiana. High Sulfur Content of Mesoporous Activated Carbon Composite Derived from Water Hyacinth. *Sustainability*. [En línea]. Vol.13 (22). November 2021. [Fecha de consulta: 3 de mayo de 2024]. Disponible en <https://doi.org/10.3390/su132212880> ISSN: 2071-1050.
16. KALI, Ravi; Padya, Balaji; Rao, T. N. and Jain, P.K. Solid waste-derived carbon as anode for high performance lithium-ion batteries. *Diamond and Related Materials*. Vol. 98, p. 107517. October 2019. ISSN: 0925-9635.

**Fecha de recepción**

30/01/2024

**Fecha de aceptación**

17/06/2024

**Fecha de publicación**

30/09/2024



# Validación experimental de las concentraciones de $PM_{10}$ de una estación de monitoreo atmosférico

*Experimental validation of  $PM_{10}$  concentrations from an atmospheric monitoring station*

**Amanda Enriqueta Violante Gavira y Felipe Trujillo-Romero /  
Universidad de Guanajuato**

## Resumen

En el presente trabajo se aplicó un método de medición experimental de partículas atmosféricas (M) usando el muestreador manual Tisch Hi Environmental Hi Vol, avalado por la NOM-035-SEMARNAT-1993, para validar concentraciones emitidas por el equipo automático BAM 1020 (A) con el que opera la estación de monitoreo atmosférico San Juanico en la ciudad de Celaya, Guanajuato, México. La justificación de la propuesta surgió del diagnóstico de los datos históricos reportados en la estación, con valores que reiteradamente rebasaron la NOM-025-SSA1-2014. Los hallazgos sugieren una correlación positiva alta entre los conjuntos de datos de mediciones de concentraciones y que de manera específica la estación obtiene registros que sobremiden el fenómeno ambiental en un 26 % aproximadamente.

**Palabras clave:** partículas atmosféricas, intercomparación de métodos automático y manual, estación de monitoreo atmosférico.

## Abstract

In the present work, an experimental measurement method of atmospheric particles (M) was applied using the manual sampler Tisch Hi Environmental Hi Vol, endorsed by NOM-035-SEMARNAT-1993 to validate concentrations emitted by the automatic equipment BAM 1020 (A). with which the San Juanico atmospheric monitoring station operates in the city of Celaya Gto., Mexico. The justification for the proposal arose from the diagnosis of the historical data reported at the station, with values that repeatedly exceeded NOM-025-SSA1-2014. The findings suggest a high positive correlation between the concentration measurement data sets and that, specifically, the station obtains records that overmeasure the environmental phenomenon by approximately 26 %.

**Keywords:** atmospheric particles, intercomparison of automatic and manual methods, atmospheric monitoring station.

## Introducción

En las últimas décadas ha cobrado relevancia la investigación sobre los contaminantes del aire, ya que su insalubridad ha detonado en uno de los más graves problemas de salud pública a escala mundial. Se estima que la contaminación atmosférica en la actualidad afecta a cerca de un 90 % de la población del planeta y es la causa de la muerte prematura de aproximadamente 7 millones de personas por año, motivo por el cual se ha denominado al aire contaminado como *un asesino silencioso*<sup>1</sup>.

Las partículas atmosféricas de diámetro menor a 10 micras ( $PM_{10}$ ), son parte de los contaminantes criterio y representan la sexta causa de mortalidad mundial<sup>2</sup>. Estas partículas tienen efectos nocivos a la salud, ya que atacan severamente el sistema inmunológico y el sistema pulmonar, provocan hospitalizaciones por enfermedades respiratorias agudas, crónicas, cáncer e incluso la muerte<sup>3</sup>. Las personas más vulnerables a dichos efectos son las que viven en zonas urbanas industrializadas de elevada densidad poblacional<sup>4</sup>. Las principales afectaciones se dan en función del tiempo de exposición, composición química de las  $PM_{10}$ , las condiciones meteorológicas del sitio, así como las condiciones geografía de dichas zonas<sup>5</sup>.

En este contexto, la gran mayoría de los países disponen de programas de mejoramiento de calidad del aire similares al programa de Proaire en México, además de poseer distintas herramientas para conocer su calidad en tiempo real. De esta manera, las estaciones de monitoreo atmosférico, desde hace décadas, miden y evalúan la calidad de manera continua en términos de concentraciones de los contaminantes atmosféricos denominados criterio: ozono ( $O_3$ ), dióxido de azufre ( $SO_2$ ), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ), las partículas en suspensión ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ) y el plomo (Pb), en ciudades altamente contaminadas por las industrias y el transporte<sup>6</sup> (SEMARNAT, SINAICA e INECC, 2018a).

La estandarización y la incertidumbre son elementos clave en los procesos de medición de contaminantes atmosféricos. Bajo este esquema, la Agencia Americana de Protección Ambiental (US-EPA) y la Unión Europea (UE), han propuesto metodologías de intercomparación entre mediciones realizadas con equipos automáticos y con equipos de control manual, basados en procedimientos gravimétricos con aplicación de modelos estadísticos y algunos softwares, que permiten adicionar variables relacionadas con la generación, permanencia o dispersión de partículas en el aire<sup>7</sup>.

Para ello utilizan diversas tecnologías, como equipos automáticos de atenuación beta, para los métodos equivalentes y, por otro lado, equipos muestreadores manuales y filtros de distintos materiales, que otorgan mayor precisión en las pruebas de gravimetría, que operan con métodos de referencia reconocidos en las normas oficiales particulares de cada país<sup>6</sup>.

Algunos estudios previos semejantes a este trabajo relacionados con la intercomparación de datos  $PM_{10}$  fueron realizados por la SEMARNAT y el INNEC<sup>8</sup>, en varias ciudades industriales de México; Walden et al.<sup>9</sup> en Kuopio, Finlandia; Barnaba y Morelli<sup>10</sup> en La Toscana, Italia; Sharratt y Pi<sup>11</sup> en Columbia, Estados Unidos; Miri, Ghassoun y Ebrahimnejad<sup>12</sup> en Sabzevar, Irán; Ilieva, et al.<sup>13</sup> en Bulgaria; Dèdelè y Miškinytė<sup>14</sup> en Lituania; y Belis, et al.<sup>15</sup> en Lens, Francia.

En todos los casos, las mediciones de  $PM_{10}$  que provienen de equipos automáticos corresponden a métodos equivalentes o candidatos y las mediciones obtenidas experimentalmente se realizan con métodos de referencia que son reconocidos en la normatividad ambiental. El enfoque de medición de partículas *in situ* con equipo muestreador manual es un método preciso que otorga mayor certidumbre al valor de la concentración en el punto de muestreo<sup>16</sup>.





## Objetivo

Analizar los datos de concentración de  $PM_{10}$  obtenidos por el equipo automático en la estación San Juanico y compararlos con los datos experimentales obtenidos, utilizando la técnica normativa para garantizar su validez y confiabilidad. Esta información se publica para dar a conocer la calidad del aire a las personas que viven en esta zona de alta contaminación atmosférica.

## Planteamiento del problema

La autoridad ambiental en el estado de Guanajuato, México, ha publicado reincidentemente valores de concentración de  $PM_{10}$  que sobrepasan los máximos permisibles por la norma NOM-025-SSA1-2014<sup>17</sup> ( $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$  promedio diario y  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Los equipos automáticos que miden las partículas en la estación de monitoreo atmosférico San Juanico, en el municipio de Celaya, Gto., usan métodos equivalentes. Están diseñados con distintas tecnologías y algoritmos que relacionan algunas propiedades fisicoquímicas con las concentraciones de  $PM_{10}$ . Estos equipos tienen una gran ventaja por su rapidez de respuesta y de permanencia en el proceso de medición. Esta ventaja permite a las autoridades ambientales mantener informada a la población sobre la calidad del aire que respiran los 365 días del año, cumpliendo con la legislación ambiental<sup>8</sup>.

Sin embargo, los métodos equivalentes no son considerados métodos de referencia tanto en Estados Unidos, como en la UE y México. Por lo que, en los casos en que el equipo automático genere elevados registros de partículas, se deben validar con datos experimentales. Para ello la NOM-035-SEMARNAT-1993<sup>18</sup> establece el procedimiento técnico-operativo mediante gravimetría, que permite asegurar la calidad de las mediciones que se deben realizar experimentalmente.

## Método de trabajo

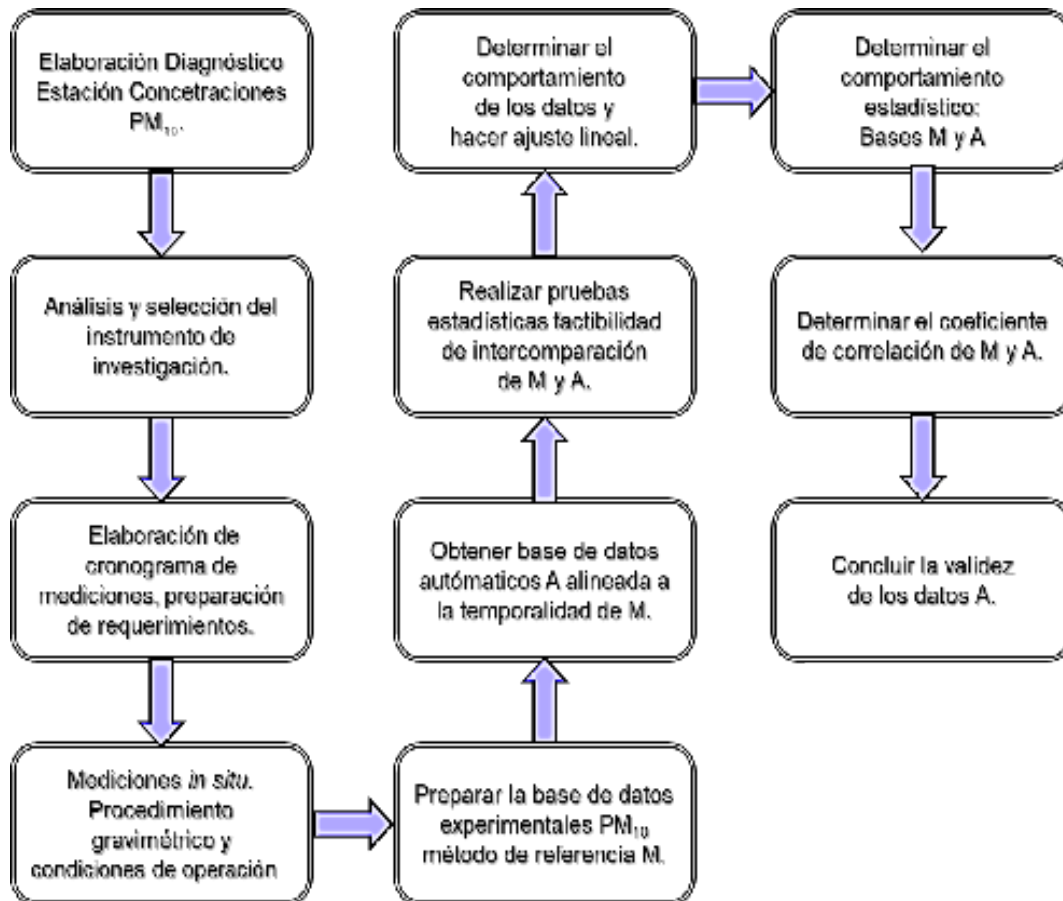
Se realizó el análisis de intercomparación cuantitativa de datos de las concentraciones de  $PM_{10}$ , obtenidas en la estación San Juanico en el año 2019. Las coordenadas del lugar en donde se encuentra la estación son: latitud  $20^{\circ}32'11''\text{N}$  y longitud  $100^{\circ}50'16''\text{W}$ <sup>19</sup>.

El protocolo que direcciona el análisis cuantitativo de la validez de los datos generados por equipos automáticos de la estación, parte de una campaña experimental de mediciones manuales y comprende las siguientes etapas descritas por la SEMARNAT y el INNEC<sup>8</sup>:

- Actualización de estudios internacionales de comparación.
- Análisis meteorológico (temporalidad y representatividad).
- Determinación de sitios de muestreo.
- Determinación de variables clave.
- Propuesta y definición del tipo de muestreo, calendario, y controles de calidad, así como el tamaño de la muestra.
- Determinación del manejo, limpieza y validación de las bases de datos de medición manual y automáticas.
- Determinación de la comparación matemática entre las metodologías de medición automática y manual.
- Análisis de resultados de la comparación matemática entre las metodologías de medición automática y manual.

Dicho protocolo ha sido validado y aplicado por la SEMARNAT en situaciones similares y cumple con preceptos y metodologías de instrumentos de validación de datos utilizados en la Unión Europea y en los Estados Unidos.

En el esquema que muestra la Figura 1 se muestran las etapas aplicadas, de acuerdo con la metodología de intercomparación de datos de  $PM_{10}$ .



**Figura 1.** Metodología para la intercomparación de datos de  $PM_{10}$ .

**Fuente:** elaboración propia

## Elaboración de diagnóstico con datos históricos

Se partió de la elaboración de un diagnóstico de las mediciones de concentración de  $PM_{10}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y de las condiciones meteorológicas (temperatura, humedad relativa, presión barométrica, velocidad y dirección del viento), en la estación de monitoreo atmosférico automático San Juanico de Celaya.

Para ello se usaron datos históricos de acceso libre del sitio oficial de la Secretaría de Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial (SMAOT) por un período comprendido entre 2016-2019, para identificar la trazabilidad de las mediciones de material particulado y verificar la

problemática planteada. La metodología para este trabajo se sintetiza en la Figura 1. Además, se definió el calendario del muestreo de  $PM_{10}$  iniciado en marzo y terminado en septiembre de 2019.

Pese a que el análisis de datos es de 2019, el fenómeno de medición de elevadas concentraciones de  $PM_{10}$  sigue siendo alto en la actualidad, de ahí la importancia de que se generen acciones por parte de las autoridades para disminuir la magnitud de este contaminante atmosférico. Al respecto, durante los últimos inviernos (cuando se emiten más partículas atmosféricas) en el año 2020, se



registraron valores máximos de concentración de  $499 \text{ mg/m}^3$  y para los años 2021, 2022 y 2023 se alcanzaron concentraciones máximas verdaderamente preocupantes: de  $462 \text{ mg/m}^3$ ,  $331 \text{ mg/m}^3$  y  $278 \text{ mg/m}^3$ , respectivamente, estos datos son de acuerdo con los registros de la estación de estudio publicada en el sitio oficial de la Secretaría de Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial de Guanajuato. Por lo tanto, se pretende atraer la atención a este grave problema de salud pública del fenómeno ambiental estudiado.

## Etapa de construcción de base de datos automáticos (A)

El instrumento empleado como referente indica construir una base de datos automáticos de  $\text{PM}_{10}$  ( $\mu\text{g/m}^3$ ) por el método equivalente por un período definido. Los datos fueron medidos por el equipo monitor de atenuación beta modelo BAM-1020, que opera en la estación de monitoreo San Juanico. La información sobre concentraciones de partículas generadas es validada y publicada en el sitio oficial de la SMAOT. Ver la Figura 2.



a)

**Figura 2.** a) Equipo automático BAM 1020,  
b) cinta impactada por la  $\text{PM}_{10}$ .  
**Fuente:** elaboración propia **b)**

## Etapa de construcción de base de datos manuales (M)

En la campaña de mediciones se usó el Tisch Environmental Hi Vol (Figura 3). El procedimiento para realizar las mediciones está definido por la SEMARNAT<sup>18</sup> en la NOM-035-SEMARNAT-1993, que establece los procesos de análisis, medición y calibración para hacer mediciones in situ de  $\text{PM}_{10}$  con equipo muestreador manual.



**Figura 3.** Equipo manual Tisch Environmental Hi Vol. En la parte superior derecha se muestra la instalación del filtro y en la parte inferior derecha el filtro impactado.

**Fuente:** elaboración propia

Con la información obtenida se construyó una segunda base de datos de concentraciones manuales ( $\mu\text{g}/\text{m}_3$ ) por el método de referencia. Fue importante realizar el muestreo en las mismas condiciones y sitio de donde provienen las muestras procesadas por el equipo automático. De igual manera, se alineó el cronograma de muestreo con el de registro de datos automáticos.

Se realizaron dos calibraciones del equipo (una al inicio y otra intermedia), se aplicaron técnicas especiales para la colocación y retiro de filtros, generando muestras impactadas con  $\text{PM}_{10}$  cada seis días. La esencia de la calibración es la facilidad que tiene el equipo para controlar el flujo de aire en un rango de 1.02 a 1.24  $\text{m}^3/\text{min}$ , esto asegura la separación de partículas finas de las  $\text{PM}_{10}$ .

El proceso se realiza conforme a procedimiento del fabricante y atendiendo la norma NOM-035-SEMARNAT-1993<sup>18</sup>, donde se indica que el coeficiente de variación de la precisión es menor al 3.7 %. El error proveniente de una velocidad de flujo variable depende directamente de la magnitud de los posibles cambios instantáneos (condiciones ambientales: temperatura, humedad y velocidad del viento), la concentración de las partículas, fallas en el suministro eléctrico o en el dispositivo medidor de tiempo.

La incertidumbre de las mediciones en la gravimetría se enfoca en el acondicionamiento del muestreo y en el pesaje de las muestras ( $\pm 0.0001$  g). En este último proceso se emplearon materiales de referencia, de acuerdo con la Norma ISO-17025<sup>22</sup>.

El flujo volumétrico del aire de la muestra se determinó con la Ecuación 1.

$$Q = Q_s \left( \frac{P_s}{T_s} \right) \left( \frac{T_N}{P_N} \right) \quad (1)$$

Donde:

$Q$ = Flujo de aire promedio corregido a condiciones de referencia ( $\text{m}^3/\text{min}$ )

$Q_s$ = Flujo de aire promedio medido a condiciones ambientales ( $\text{m}^3/\text{min}$ )

$P_s$ = Presión barométrica promedio durante el muestreo (kPa)

$T_s$ = Temperatura ambiente promedio durante el muestreo (K)

$P_N$ = Presión en condiciones normales (101,3 kPa)

$T_N$ = Temperatura en condiciones normales (298K)

Luego se determinó el volumen de aire muestreado en un día para cada prueba con las condiciones de muestreo en sitio y se corrigió a condiciones normales de temperatura y presión con la Ecuación 2.

$$V = Q \ t \quad (2)$$

Donde  $V$  es el volumen de aire muestreado ( $\text{m}^3$ ) corregido a TPN y  $t$  es el tiempo de toma de la muestra (min). Finalmente, con la información generada de la gravimetría de los filtros, se calcularon las concentraciones manuales por el método de referencia con la Ecuación 3.

$$M = \frac{(W_f - W_i)10^6}{V} \quad (3)$$



Donde  $M$  es la concentración de  $PM_{10}$  por el método de referencia ( $\mu g/m^3$ ),  $w_f$  es el peso final del filtro impactado con  $PM_{10}$  (g) y  $w_i$  es el peso inicial del filtro limpio (g).

## Análisis de datos

Se aplicó el modelo lineal descrito por la SEMARNAT y el INECC<sup>8</sup> para intercomparar los fenómenos estudiados a través de las variables de concentración de  $PM_{10}$  automáticos (A) y manuales (M) con la Ecuación 4.

$$A = mM + b \quad (4)$$

Cuando  $m = 1$  y  $b = 0$ , los valores de las concentraciones de partículas son iguales y en la medida que se alejan de dichos valores, también se aleja la correspondencia entre ambos tipos de mediciones.

De acuerdo con el instrumento aplicado, a la ecuación lineal se realizan las correcciones para  $b^* = 0$ . La Ecuación (5) representa la recta corregida a partir de los datos M y A.

$$A_c = m^*M + b^* \quad (5)$$

Con la Ecuación 6 se obtuvo la pendiente corregida aplicando el método de mínimos cuadrados.

$$m^* = \frac{\sum_{i=1}^n A_c M}{\sum_{i=1}^n M^2} \quad (6)$$

Se analizó el comportamiento estadístico de los conjuntos de datos M y A, para identificar si se trataba de datos paramétricos o no paramétricos, haciendo las pruebas de normalidad de ambos conjuntos, con las siguientes consideraciones<sup>21</sup>.

- Para un número de datos menor a 50, aplica cálculo de la significancia (p) de Shapiro-Wilk.
- Para un número de datos mayor a 50, aplica cálculo de la significancia (p) de Kolmogórov-Smirnov.

Además, se tomó en cuenta que:

- Si  $p > 0.05$ , los datos tienen comportamiento normal.
- Si  $p < 0.05$ , los datos tienen comportamiento no normal.

Finalmente, se estimó el tipo de coeficiente de linealidad:

- Si el comportamiento de cada grupo de datos es normal (datos paramétricos) se aplica la correlación con coeficiente de Pearson.
- Si el comportamiento es no normal (datos no paramétricos) corresponde usar la correlación del coeficiente de Rho de Spearman.

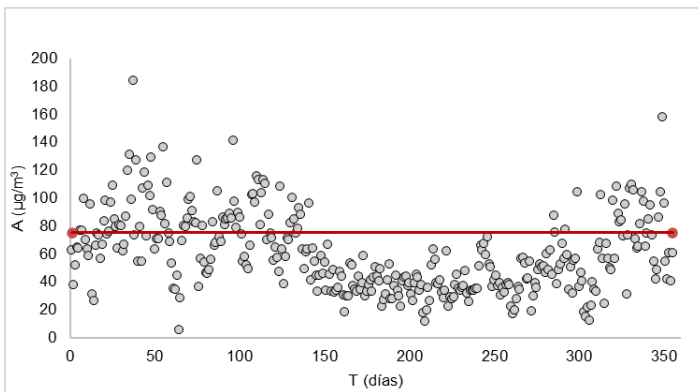
En ambos casos la correlación entre los conjuntos de datos resulta ser significativa para valores de coeficientes de linealidad mayores que 0.8<sup>8</sup>.

## Resultados

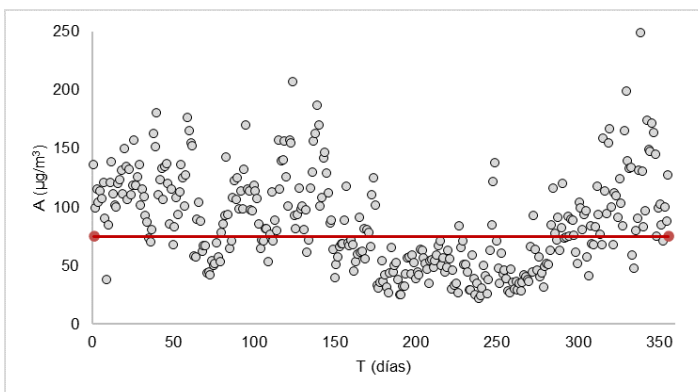
### Diagnóstico de las concentraciones históricas de $PM_{10}$

A continuación, se presentan los análisis de los promedios diarios obtenidos de las concentraciones de la partícula contaminante  $PM_{10}$  para el periodo comprendido de los años 2016, 2017 y 2018. Se comenzará este análisis con las concentraciones de  $PM_{10}$  obtenidas durante el año 2016, las cuales se presentan en la Figura 4.

De la Figura 4 se puede apreciar que a principios y finales de año 2016, temporada de invierno, es cuando se rebasan con mayor frecuencia los valores de la NOM-025-SSA1-2014<sup>17</sup>. Se resalta que este fenómeno es mucho más marcado en el año 2017 (Figura 5), es decir, se presenta un aumento de las mediciones que rebasan el valor de la norma, el cual es de  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

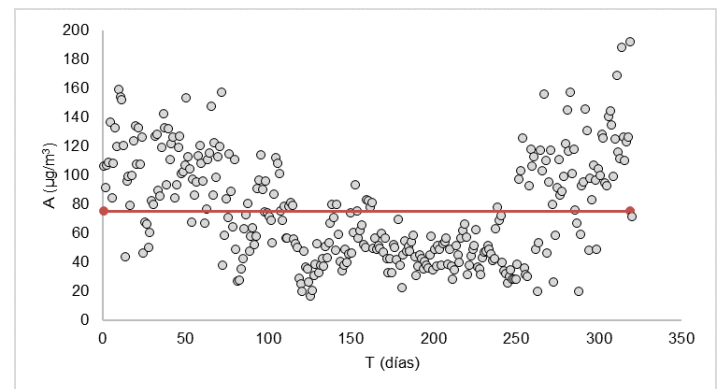


**Figura 4.** Concentraciones  $\text{PM}_{10}$  en el equipo automático durante el año 2016.  
**Fuente:** elaboración propia



**Figura 5.** Concentraciones  $\text{PM}_{10}$  en el equipo automático durante el año 2017.  
**Fuente:** elaboración propia

Con relación al comportamiento de las  $\text{PM}_{10}$  en 2018, se observa que durante el invierno también se sobrepasan los límites máximos permitidos por la norma, semejante a las concentraciones del contaminante observadas durante el año 2017 (Figura 6).



**Figura 6.** Concentraciones  $\text{PM}_{10}$  en el equipo automático durante el año 2018.  
**Fuente:** elaboración propia

## Diagnóstico de las condiciones ambientales históricas

En la Tabla 1 se indican los estadísticos de la temperatura ambiente y la presión barométrica para el período 2016-2018. Los valores se caracterizan por tener mínimas variaciones de un año a otro. Lo que indica que tienen una influencia semejante con la concentración de partículas atmosféricas en el aire ambiente del sitio de estudio.

**Tabla 1.** Presión y temperatura promedio anual en sitio.

Fuente: elaboración propia

	T(°C)			P(mmHg)		
	2016	2017	2018	2016	2017	2018
Promedio	20.4	20.9	20.5	619.5	618.8	619.2
Mediana	20.8	20.7	20.9	619.8	618.8	619.2
Máximo	27.8	27.9	28.5	623.3	623.3	622.8
Mínimo	8.0	11.9	10.0	570.8	615.0	616.1
Desviación estándar	3.0	2.8	3.1	2.9	1.4	1.3
Varianza	8.7	7.9	9.4	8.7	2.0	1.6
Rango	19.8	15.9	18.6	52.5	8.3	6.8

Por su parte, en la Tabla 2 se observa el mismo fenómeno de baja variabilidad en los valores promedio anuales con relación a la humedad relativa y la velocidad y dirección del viento.

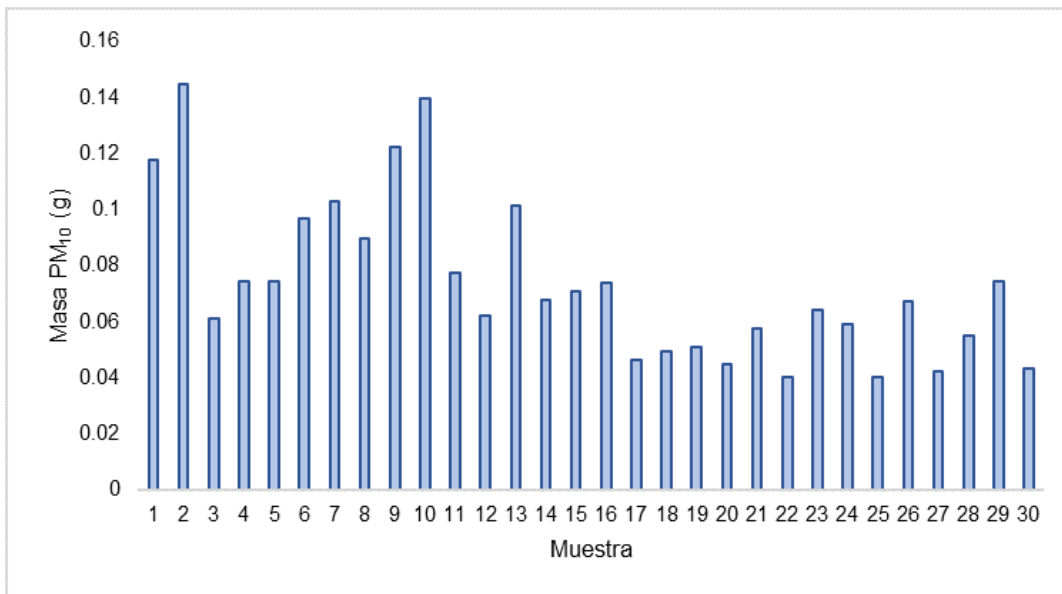
**Tabla 2.** Humedad relativa y velocidad y dirección del viento en sitio.

Fuente: elaboración propia

	HR			WS (m/s)			WD (°)		
	2016	2017	2018	2016	2017	2018	2016	2017	2018
Promedio	55.8	54.5	50.2	2.4	2.4	2.2	125	124	127
Mediana	57.8	51.6	49.9	2.3	2.3	2.0	115	120	123
Máximo	92.7	94.5	67.2	4.7	4.8	5.5	264	270	274
Mínimo	28.7	32.5	34.3	0.9	0.9	0.6	32	15	2.5
Desviación estándar	15.1	14.7	8.0	0.7	0.6	0.8	61	59	59.7
Varianza	227.5	215.7	64.4	0.5	0.5	0.6	3727	3505	3566
Rango	64.0	61.9	32.9	3.8	3.9	4.9	231	255	271

## Parte experimental: mediciones con el equipo Tisch Environmental Hi Vol

En la Figura 7 se muestran los resultados de la gravimetría (peso de  $PM_{10}$ ) medidos en los días del cronograma de trabajo experimental, los cuales representan la parte central del estudio.



**Figura 7.** Resultados de la gravimetría (peso de  $PM_{10}$ ).  
Fuente: elaboración propia

Posterior a los resultados de la gravimetría se presentan las concentraciones de los datos obtenidos experimentalmente (M). Se muestran también los resultados de las concentraciones del equipo automático (A).

**Tabla 3.** Bases de datos de concentraciones de  $PM_{10}$  (automática y manual ( $\mu g/m^3$ )).  
Fuente: elaboración propia

m	A	M	m	A	M	m	A	M
1	79.3	86.6	11	140.6	58.4	21	33.4	42.8
2	93.3	108.2	12	61.6	46.9	22	36.3	29.7
3	47.1	45.1	13	81.3	76.6	23	52.5	29.9
4	92.5	55.2	14	61.4	50.8	24	45.8	44.2
5	81.2	55.3	15	63.7	53.2	25	24.6	30
6	98.3	72.2	16	70.2	55.4	26	75.1	50.5
7	131.9	76.8	17	56.2	34.4	27	34.3	31.1
8	108.1	66.9	18	28.5	36.5	28	53.6	41
9	133	91.4	19	53.8	38.1	29	48.8	55.4
10	139.9	105.1	20	41.6	33.8	30	27.7	32.2





De manera general se observa que el conjunto de datos (A) presenta registros mayores a los respectivos valores de concentraciones que se obtuvieron en el trabajo de campo (M) (Tabla 3).

Luego de estructurar las bases de datos M y A, se calcularon las desviaciones estándar por encima y por debajo de estos valores para determinar si los conjuntos de datos son estadísticamente comparables (Tablas 4 y 5).

**Tabla 4.** Desviaciones estándar de los datos automáticos (A).

**Fuente:** elaboración propia.

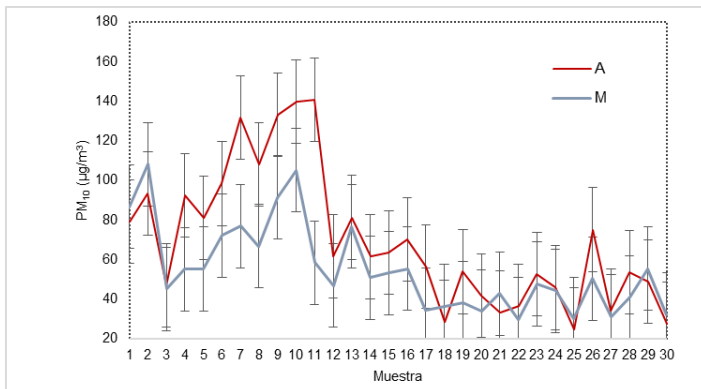
m	A	$\sigma+$	$\sigma-$	M	A	$\sigma+$	$\sigma-$	m	A	$\sigma+$	$\sigma-$
1	79.3	113.7	44.9	11	66.9	175.0	106.2	21	42.8	67.8	-1.0
2	93.3	127.7	58.9	12	91.4	96.0	27.2	22	29.7	70.7	1.9
3	47.1	81.5	12.7	13	105.1	115.7	46.9	23	29.9	86.9	18.1
4	92.5	126.9	58.1	14	58.4	95.8	27.0	24	44.2	80.2	11.4
5	81.2	115.6	46.8	15	46.9	98.1	29.3	25	30	59.0	-9.8
6	98.3	132.7	63.9	16	76.6	104.6	35.8	26	50.5	109.5	40.7
7	131.9	166.3	97.5	17	50.8	90.6	21.8	27	31.1	68.7	-0.1
8	108.1	142.5	73.7	18	53.2	62.9	-5.9	28	41	88.0	19.2
9	133	167.4	98.6	19	55.4	88.2	19.4	29	55.4	83.2	14.4
10	139.9	174.3	105.5	20	34.4	76.0	7.2	30	32.2	62.1	-6.7

**Tabla 5.** Desviaciones estándar de los datos manuales (M).

**Fuente:** elaboración propia.

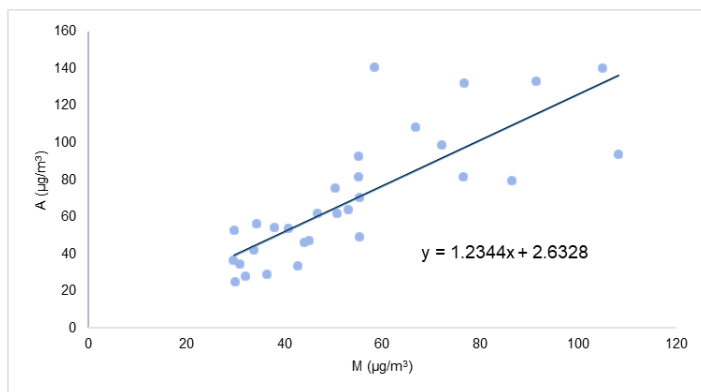
m	M	$\sigma+$	$\sigma-$	M	M	$\sigma+$	$\sigma-$	m	M	$\sigma+$	$\sigma-$
1	86.6	121.0	52.2	11	58.4	92.8	24.0	21	42.8	77.2	8.4
2	108.2	142.6	73.8	12	46.9	81.3	12.5	22	29.7	64.1	-4.7
3	45.1	79.5	10.7	13	76.6	111.0	42.2	23	29.9	64.3	-4.5
4	55.2	89.6	20.8	14	50.8	85.2	16.4	24	44.2	78.6	9.8
5	55.3	89.7	20.9	15	53.2	87.6	18.8	25	30	64.4	-4.4
6	72.2	106.6	37.8	16	55.4	89.8	21.0	26	50.5	84.9	16.1
7	76.8	111.2	42.4	17	34.4	68.8	0.0	27	31.1	65.5	-3.3
8	66.9	101.3	32.5	18	36.5	70.9	2.1	28	41	75.4	6.6
9	91.4	125.8	57.0	19	38.1	72.5	3.7	29	55.4	89.8	21.0
10	105.1	139.5	70.7	20	33.8	68.2	-0.6	30	32.2	66.6	-2.2

La Figura 8 muestra la desviación estándar por encima y por debajo de los valores de las concentraciones de partículas. Se observa que solo dos de los 30 conjuntos (muestras 7 y 11) de los datos M y A no se superponen. Esto significa que estadísticamente se puede aplicar el método de intercomparación.



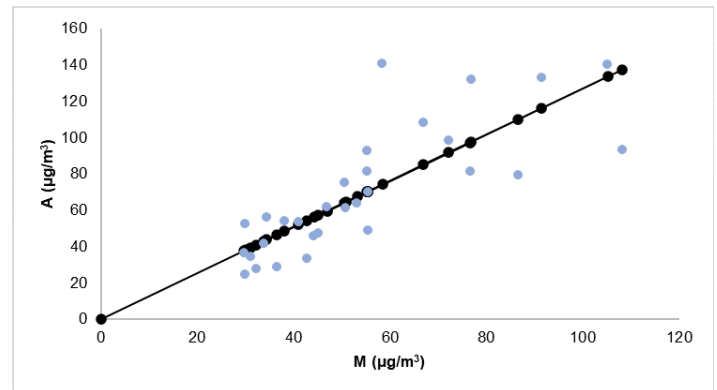
**Figura 8.** Comparativa estadística de datos M y A.  
Fuente: elaboración propia

Por su parte, la Figura 9 representa la regresión lineal de los conjuntos de datos obtenidos tanto de forma manual como de manera automática. Nótese que la pendiente y la ordenada al origen tienen valores cercanos a los ideales: 1 y 0, respectivamente, lo que indica la cercanía entre los dos tipos de mediciones de  $PM_{10}$ .



**Figura 9.** Regresión lineal entre datos M y A.  
Fuente: elaboración propia

La ecuación de la recta:  $y = 1.2344x + 2.6328$  indica la presencia de un sesgo de  $0.3372 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (ordenada al origen) para una pendiente de 1.2344. De acuerdo con el instrumento de investigación aplicado, el ajuste ideal se daría siempre y cuando:  $m=1$  y  $b = 0$ .



**Figura 10.** Ajuste de la regresión lineal entre datos M y A.  
Fuente: elaboración propia

Haciendo el ajuste lineal para  $b = 0$ , representado por:  $y = 1.26x$  sugerido en el protocolo de referencia de la SEMARNAT e INECC<sup>8</sup>, en la Figura 10 se muestra que los valores presentan una sobremedición del equipo automático BAM 1020 aproximada a 26 % con relación a los datos empíricos.

Siguiendo con el análisis del comportamiento de las bases de datos, se encontró que la media del conjunto M fue 55.02 y la desviación estándar fue 21.67. Mientras que para el conjunto de datos A, la media fue 69.86 y la desviación estándar fue 34.36. Por lo que se tiene un comportamiento no normal en ambos conjuntos de datos.

Esto es coincidente con los valores estimados para la significancia, ya que el  $p$  valor es menor que 0.05 (comportamiento no normal). En este caso, se seleccionó considerar el coeficiente de Shapiro-Wilk<sup>a</sup> porque la cantidad de datos era menor que 50 (Tabla 6).

**Tabla 6.** Pruebas de normalidad de M y A.

Fuente: elaboración propia

Base de datos	Kolmogórov-Smirnov			Shapiro-Wilk		
	Estadístico	gl	Significancia	Estadístico	gl	Significancia
A	0.1378	30	0.151	0.9152	30	0.020
M	0.1934	30	0.006	0.8960	30	0.006

Con este esquema de comportamiento estadístico no normal (datos no paramétricos) en ambos tipos de mediciones de  $PM_{10}$ , se aplicó el coeficiente de correlación Rho de Spearman (Tabla 7).

**Tabla 7.** Coeficientes de Spearman para las bases de datos M y A.

Fuente: elaboración propia

		A	M	
Rho de Spearman	A	Coefficiente de correlación	1	<b>0.8780</b>
		Significancia (bilateral)		0
	N	30	30	
	M	Coefficiente de correlación	<b>0.8780</b>	1
		Significancia (bilateral)	0	
		N	30	30

Los resultados del cálculo de la Rho Spearman en ambos casos muestran un valor mayor de 0.8. Esto se traduce en una correlación positiva alta entre los conjuntos de datos de mediciones de concentraciones de  $PM_{10}$  por los métodos M y A<sup>8</sup>.

## Discusión

En la actualidad, en muchos países del mundo los métodos equivalentes con los que operan los equipos automáticos que miden las partículas de material contaminante presentes en el aire, trabajan con distintas tecnologías y algoritmos

que permiten relacionar algunas propiedades fisicoquímicas. Desafortunadamente este tipo de mediciones para obtener las concentraciones de  $PM_{10}$  no son considerados métodos de referencia. Por esa razón y partiendo de dicha premisa se aplicó la metodología definida por la SEMARNAT y el INNEC<sup>8</sup>.

La campaña de mediciones para determinar las concentraciones de  $PM_{10}$  que permitieron validar las altas concentraciones de este contaminante medido por la estación San Juanico es un método de referencia establecido en la NOM-035-SEMARNAT-1993<sup>18</sup>. Los métodos de referencia enfocados en mediciones in situ dan certidumbre a los valores que generan, porque se basan en procedimientos gravimétricos, situación coincidente con Xiong *et al.*<sup>16</sup>.

Coincidimos con Walden *et al.*<sup>9</sup>, Iliava *et al.*<sup>13</sup> y Pateraki *et al.*<sup>5</sup> en que existe una estrecha correlación entre los métodos equivalentes o automáticos y los de referencia o manuales. Lo anterior pese a que se usan distintas tecnologías. También coincidimos en la necesidad de establecer en cada caso factores de corrección entre ambos métodos como hicimos en este estudio.

## Conclusiones

Las concentraciones de  $PM_{10}$  máximas establecidas por la normativa mexicana ( $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) se sobrepasan de manera frecuente en países como Estados Unidos, Canadá, Europa y en Asia Sudoriental y con mayor intensidad en Latinoamérica y el Caribe. Por ello cobra relevancia que las autoridades realicen mejoras en sus estrategias de gestión de la calidad del aire.

La literatura reporta poca información sobre la validez de las mediciones de partículas atmosféricas obtenidas en las estaciones de monitoreo del equipo automático. Si bien es cierto que estos equipos realizan estimaciones en tiempo real, mediante métodos equivalentes, para simular algorítmicamente las concentraciones de partículas  $PM_{10}$ , con base en propiedades fisicoquímicas del aire muestreado, el método de operación del equipo no es reconocido por la normatividad vigente en México y en otros países como Estados Unidos, Canadá y la UE.

Por este motivo se propuso este estudio para mediciones de  $PM_{10}$  por método de referencia basado en procedimientos gravimétricos. Con base en lo anterior se concluye que la estación San Juanico realiza mediciones por encima de los respectivos valores con relación al método de referencia (basado en la normativa) empleado en este estudio.

Por ello resulta importante establecer factores de corrección que permitan operar a las estaciones de monitoreo y aprovechar la rapidez con la que generan información, pero complementando el proceso de validación de sus registros a partir de factores de corrección propios, con base en las tecnologías empleadas en ambos métodos de medición.

## Referencias

1. Organización Mundial de la Salud. 2022. *Calidad del aire ambiente (exterior) y salud*. [Sitio web]. [Fecha de consulta: 30 de octubre 2023]. Disponible en [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health).
2. STAFOGGIA, M., Schwartz, J., Badaloni, C., Bellander, T., Alessandrini, E., Cattani, G., De' Donato, F., Gaeta, A., Leone, G., Lyapustin, A., Sorek-Hamer, M., De Hoogh, K., Di, Q., Forastiere, F. y Kloog, I. Estimation of daily  $PM_{10}$  concentrations in Italy (2006–2012) using finely resolved satellite data, land use variables and meteorology. *Environment International*. [En línea]. Vol. 99. 2017. Disponible en: DOI 10.1016/j.envint.2016.11.024. ISSN 0160-4120.
3. ÁLVAREZ, I. A., Martínez, J. M., Rodríguez, B.M.B., Fuentes, B. B., Blanco, L. M. E. y Monzón, R. Z. Influencia de los contaminantes atmosféricos sobre la salud. *Revista Médica Electrónica*. [En línea]. Vol. 39 (5), 2017. Disponible en: <https://revmedicaelectronica.sld.cu/index.php/rme/article/view/2470> ISSN 1684-1824.
4. SON, Y., Osornio-Vargas, Á. R., O'Neill, M.S., Hystad, P., Texcalac-Sangrador, J. L., Ohman-Strickland, P., Meng, Q. y Schwander, S. Land use regression models to assess air pollution exposure in Mexico City using finer spatial and temporal input parameters. *Science of The Total Environment*. [En línea]. Vol. 639. 2018. Disponible en: DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.05.144. ISSN 0048-9697.
5. PATERAKI, St., Manousakas, M., Bairachtari, K., Kantarelou, V., Eleftheriadis, K., Vasilakos, Ch., Assimakopoulos, V. D. y Maggos, Th. The traffic signature on the vertical PM profile: Environmental and health risks within an urban roadside environment. *Science of The Total Environment*. [En línea]. Vol. 646. 2019. Disponible en: DOI 10.1016/j.scitotenv.2018.07.289. ISSN 0048-9697.
6. SEMARNAT, SINAICA e INECC, 2018. *Manual 1. Principios de medición de la calidad del aire*. Instituto Nacional de Ecología [Fecha de consulta: 20 de octubre de 2023]. Disponible en <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/1-%20Principios%20de%20Medici%C3%B3n%20de%20la%20Calidad%20del%20Aire.pdf>
7. SEMARNAT, SINAICA e INECC. 2018. *Manuales de la calidad del aire. Manual 2. Sistemas de medición de la calidad del aire*. [Fecha de consulta: 20 de octubre de 2023]. Disponible en <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/2-%20Sistemas%20de%20Medici%C3%B3n%20de%20la%20Calidad%20del%20Aire.pdf>
8. SEMARNAT e INNEC. 2017. *Correspondencia entre metodologías manuales y automáticas para la medición de partículas en suspensión. Ciudad de México: SEMARNAT-INECC*. [Sitio web]. [Fecha de consulta: 20 de octubre 2023], Disponible en [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/240056/Inf\\_Final\\_Proj\\_Comp\\_Part\\_culas\\_SB\\_AC.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/240056/Inf_Final_Proj_Comp_Part_culas_SB_AC.pdf)
9. WALDEN, J., Walden, T., Laurila, S. y Hakola, H. 2017, Demonstration of the equivalence of  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  measurement. Helsinki: Finnish Meteorological Institute. [Sitio web]. [Fecha de consulta: 25 de octubre de 2023]. Disponible en <https://helda.helsinki.fi/items/39825f4c-7f61->



- [42f7-b299-1740855a2993](#).
10. BARNABA, F., Bolignano, A., Di Liberto, L., Morelli, M., Lucarelli, F., Nava, S., Perrino, C., Caneparl, S., Basart, S., Costabile, F., Dionisi, D., Ciampichetti, S., Sozzi, R. y Gobbi, G. P. Desert dust contribution to PM10 loads in Italy: Methods and recommendations addressing the relevant European Commission Guidelines in support to the Air Quality Directive 2008/50. *Atmospheric Environment*. [En línea]. Vol. 161. 2017 Disponible en: DOI 10.1016/j.atmosenv.2017.04.038. ISSN 1352-2310.
  11. SHARRATT, B. y Pi, H. Field and laboratory comparison of PM10 instruments in high winds. *Aeolian Research*. [En línea]. Vol. 32. 2018 Disponible en: DOI 10.1016/j.aeolia.2018.01.006. ISSN 1875-9637.
  12. MIRI, M., Ghassoun, Y., Dovlatbadi, A., Ebrahimnejad, A. y Löwner, M. O. Estimate annual and seasonal PM1, PM2.5 and PM10 concentrations using land use regression model. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. [En línea]. Vol. 174. 2019. Disponible en: DOI 10.1016/j.ecoenv.2019.02.070. ISSN 0147-6513.
  13. ILIEVA, N., Nikolova, Y., Predyov, I. y Kozarev, N. Sensors applicability for pm2.5 and pm10 air concentration measurements. *Journal of Chemical Technology. and Metallurgy*. Vol. 53 (3): 496-503. 2018.
  14. DÉDELÉ, A. y Miškinytė, A. Seasonal and site-specific variation in particulate matter pollution in Lithuania. *Atmospheric Pollution Research*. [En línea]. Vol. 10 (3). 2019. Disponible en: DOI 10.1016/j.apr.2018.12.004. ISSN 1309-1042.
  15. BELIS, C. A., Pernigotti, D., Pirovano, G., Favez, O., Jaffrezo, J. Evaluation of receptor and chemical transport models for PM10 source apportionment. *Atmospheric Environment*. [En línea]. Vol. X (5), 2020. ISSN 2590-1621. Disponible en: DOI 10.1016/j.aeaoa.2019.100053.
  16. XIONG, J., Yao, R., Wang, W., Yu, W. y Li, B. A spatial-and-temporal-based method for rapid particle concentration estimations in an urban environment. *Journal of Cleaner Production*. [En línea]. Vol. 256. 2020. Disponible en DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.120331. ISSN 0959-6526.
  17. Diario Oficial de la Federación [DOF]. 2014. *Norma Oficial Mexicana NOM 025 SSA1-2014. Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM15 en el aire, ambiente y criterios para su evaluación*. [Sitio web]. [Fecha de consulta: 30 de octubre 2023]. Disponible en [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5357042&fecha=20/08/2014#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5357042&fecha=20/08/2014#gsc.tab=0).
  18. PROFEPA. 2022. *Norma Oficial Mexicana: NOM-035-SEMARNAT-1993*, Profepa, México. [Sitio web]. [Fecha de consulta: 25 octubre 2023], Disponible en <https://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1215/1/nom-035-semarnat-1993.pdf>
  19. GEODATOS. Coordenadas geográficas de Celaya, Gto, México. [sin fecha]. [Sitio web]. [Fecha de consulta: 31 de octubre 2023]. Disponible en <https://www.geodatos.net/coordenadas/mexico/celaya>.
  20. WANG, C.-Y. y Hsu, C.-C. How critical is geometrical confinement? Analysis of spatially and temporally resolved particulate matter removal with an electrostatic precipitator. *RSC Advances*. [En línea]. Vol. 8, no. 54. 2018. Disponible en: DOI 10.1039/C8RA04734K. ISSN 2046-2069.
  21. FLORES-RUIZ, E., Miranda-Novales, M. G. y Villasís-Keever, M. Á. El protocolo de investigación VI: cómo elegir la prueba estadística adecuada. Estadística inferencial. *Revista Alergia México*. [En línea]. Vol. 64, no. 3. 2017. Disponible en: DOI 10.29262/ram.v64i3.304. ISSN 2448-9190, 0002-5151.
  22. ALVARADO, E. Presentación de la Norma ISO-17025. Grupo Empresarial ACCE. *Simposio de Metrología 2018*. [Fecha de consulta: 30 de octubre de 2023]. Disponible en <https://www.cenam.mx/memorias/descarga/Memorias%20Simposio/documentos/ta-or052.pdf>

Fecha de recepción

6/11/2023

Fecha de aceptación

9/5/2024

Fecha de publicación

30/09/2024



# Evaluación de eficiencia en proceso de calzado por medio de simulación y análisis de métodos

*Evaluation of efficiency in footwear process through simulation and analysis of methods*

**Armando Mares Castro, Julio Guevara Horta, Marco Antonio Verdín Muñoz y Carlos Alfredo Malacara Cruz / Tecnológico Nacional de México / ITS de Purísima del Rincón / Universidad Tecnológica de León**

## Resumen

Esta investigación aborda el análisis de un proceso de fabricación de calzado en una empresa ubicada en San Francisco del Rincón, Guanajuato. La optimización del flujo de producción es un desafío crucial para la ingeniería industrial en el contexto de la manufactura de calzado, ya que la presencia constante de desperdicios impacta negativamente en la productividad. En este estudio se propone una metodología que combina la simulación de eventos discretos y el análisis de métodos, con un enfoque Lean, para implementar estrategias dirigidas a mejorar la productividad y el flujo del proceso. Mediante el análisis, se evidencia que la reducción de los tiempos de traslado y el equilibrado de líneas pueden potenciar el flujo del proceso, lo que resulta en un aumento del 8.2 % en la producción promedio diaria según el modelo de simulación, mostrando aplicabilidad y factibilidad en el entorno real de la empresa.

**Palabras clave:** simulación, Industria del calzado, proceso de fabricación, análisis de métodos

## Abstract

This research addresses the analysis of a footwear manufacturing process in a company located in San Francisco del Rincón, Guanajuato. The optimization of production flow is a crucial challenge for industrial engineering in the context of footwear manufacturing, since the constant presence of waste negatively impacts productivity. In this study, a methodology combining discrete event simulation and method analysis, with a Lean approach, is proposed to implement strategies aimed at improving productivity and process flow. Through the analysis, it is evidenced that the reduction of transfer times and line balancing can enhance the process flow, resulting in an 8.2% increase in the average daily production according to the simulation model, showing applicability and feasibility in the real environment of the company.

**Keywords:** Simulation, Footwear Industry, Manufacturing Process, Method Analysis



## Introducción

La industria del calzado en San Francisco del Rincón, Guanajuato, México, se enfrenta a constantes desafíos para mantener su competitividad en un mercado globalizado y en constante evolución<sup>1,2</sup>. Uno de los principales desafíos radica en la optimización de los procesos de fabricación para mejorar la eficiencia del producto final. En este contexto, la aplicación de enfoques innovadores, como la estrategia Lean y el uso de técnicas de análisis de métodos y simulación, emerge como una solución prometedora para abordar los problemas de flujo de producción y reducir los desperdicios en el proceso<sup>3</sup>.

En este artículo se explora la aplicación de estas estrategias en el contexto específico de una empresa de fabricación de calzado en San Francisco del Rincón, Guanajuato. Se comienza por identificar los problemas de flujo de producción detectados en el proceso de fabricación, incluyendo largos tiempos de espera, desequilibrios en la carga de trabajo y alta variabilidad en los tiempos de ciclo. Posteriormente, se presenta una estrategia 'lean' como marco conceptual para la reducción de desperdicios, seguida por el uso de técnicas de análisis de métodos y simulación en ProModel<sup>4</sup>, para el diseño e implementación de mejoras específicas en el proceso, cuya eficiencia ha sido abordada en el estado del arte actual disponible en la literatura.

### Objetivo:

Aplicar la simulación de eventos discretos y el análisis de métodos para la identificación y mejoramiento de la eficiencia en el proceso de fabricación de calzado en una empresa de San Francisco del Rincón, Guanajuato, México.

## Objetivos específicos

- Identificar los pasos clave del proceso de fabricación de calzado en una empresa de San Francisco del Rincón, Guanajuato.
- Realizar un análisis del flujo del proceso para la identificación de desperdicios, tales como traslados innecesarios.
- Construir un modelo de simulación de eventos discretos del proceso de fabricación de calzado utilizando software especializado integrando datos históricos y observaciones del proceso real.
- Proponer recomendaciones específicas para la optimización del proceso de fabricación de calzado y mejoramiento en la eficiencia y productividad con un enfoque 'lean'.
- Comparar los resultados obtenidos después de la implementación de las recomendaciones con la situación inicial, para la medición del impacto de las mejoras realizadas.

## Planteamiento del problema

En el proceso de fabricación de calzado en una empresa ubicada en San Francisco del Rincón, Guanajuato, se han identificado varios problemas de flujo de producción que afectan la eficiencia y la rentabilidad del negocio. Entre los problemas detectados se incluyen largos tiempos de espera entre etapas de producción, desequilibrios en la carga de trabajo entre estaciones y una alta variabilidad en los tiempos de ciclo. Estos problemas conducen a la generación de desperdicios, como inventario excesivo, tiempos muertos y retrabajos, lo que impacta negativamente en la calidad del producto y en los costos operativos.

Para abordar esta problemática y mejorar el flujo de producción, se propone la implementación de una estrategia 'lean'. La filosofía 'lean' se centra en la eliminación sistemática de desperdicios a lo largo de toda la cadena de



## Fundamento teórico

valor, para lograr un flujo de trabajo continuo y eficiente. Esto implica la identificación y eliminación actividades que no agregan valor al producto final, como movimientos innecesarios, esperas, sobreproducción y defectos<sup>5</sup>.

Para implementar la estrategia 'lean' de manera efectiva, se utilizarán técnicas de análisis de métodos y simulación. El análisis de métodos permite examinar detalladamente cada etapa del proceso de fabricación, para la identificación de oportunidades de mejora y el diseño de métodos de trabajo más eficientes y ergonómicos. Por otro lado, la simulación ayudará a visualizar el flujo de producción y a probar diferentes escenarios, para evaluar el impacto de los cambios propuestos antes de su implementación. Esto permitirá tomar decisiones informadas y minimizar el riesgo de introducir nuevas fuentes de desperdicio o ineficiencia en el proceso.

Algunas de las estrategias de mejora que se consideran incluyen la reorganización de las estaciones de trabajo para reducir distancias de recorrido y tiempos de espera, la evaluación de sistemas de producción justo a tiempo (*Just In Time*) para reducir inventarios y la estandarización de los procesos para minimizar la variabilidad en los tiempos de ciclo. Además, se busca involucrar activamente a los empleados en la identificación y solución de problemas, promoviendo una cultura de mejora continua en toda la organización.

El *Lean Manufacturing* se ha percibido ampliamente como una solución industrial para la reducción del desperdicio y el tiempo de respuesta a la demanda del cliente. Existe una necesidad apremiante de estandarizar la definición del *Lean Manufacturing* y sintetizar sus objetivos en un formato más conciso<sup>6</sup>. El *Lean Manufacturing* es una metodología que busca la minimización del consumo de recursos y los desperdicios en las actividades empresariales<sup>7</sup>. La estandarización del trabajo es un requisito inicial para la implementación de proyectos 'lean', para la reducción de la variabilidad entre los operarios, la definición adecuada de los procesos y la preparación para su modelado<sup>8</sup>.

Socconini<sup>9</sup> define la manufactura esbelta como el sistema justo a tiempo (*Just in time*) en occidente, también se denomina "manufactura de clase mundial" y "sistema de producción Toyota"; es un proceso continuo y sistemático de identificación y eliminación de desperdicio o excesos. Dentro de las aplicaciones 'lean' en la literatura, Pascu *et al.*<sup>10</sup> presentan los pasos para la mejora en calidad mediante la implementación del Mantenimiento Productivo Total (TPM) en un proceso automotriz, mejorando la eficiencia general de los equipos (OEE) al 94%.

Otras aplicaciones exitosas del método 'lean' reportadas en la literatura se han dado en procesos de fabricación de cable<sup>11</sup>, los procesos de calzado y la marroquinería han reportado mejoras importantes en la productividad<sup>12, 13</sup>. La integración de herramientas 'lean' como el Justo a tiempo (JIT por su acrónimo en inglés),





'kanban' y el trabajo estandarizado han reportado mejoras en procesos textiles<sup>14</sup>, la integración del 'lean' y 'simulación' en la producción de suela para calzado<sup>15</sup> y la aplicación exitosa de herramientas de la manufactura celular integrada con el enfoque 'lean' y la simulación en procesos industriales clásicos<sup>16</sup>.

La combinación de técnicas de simulación y *Lean Manufacturing* y su eficiencia han sido analizadas en la literatura<sup>17,18</sup>. Mares y Guevara<sup>19</sup> presentaron una metodología basada en simulación y técnicas 'lean' en la mejora de proceso del calzado tenis. Yazici<sup>20</sup> aborda la simulación aplicada en modelos de distribución de planta y *layout* (disposición física de los equipos, maquinaria, estaciones de trabajo, áreas de almacenamiento y otros elementos dentro de una instalación de producción o planta industrial) para operaciones de manufactura. Existen diferentes tipos de simulación aplicable a procesos de manufactura, como la dinámica de sistemas, simulación de eventos discretos y la simulación basada en agentes, las cuales puede aplicarse en situaciones específicas con fines de mejora<sup>21</sup>. Un enfoque adicional para la aplicación de simulación es la optimización de procesos en manufactura, con lo cual se define la mejor combinación de parámetros del proceso y la optimización de los recursos<sup>22, 23, 24</sup>.

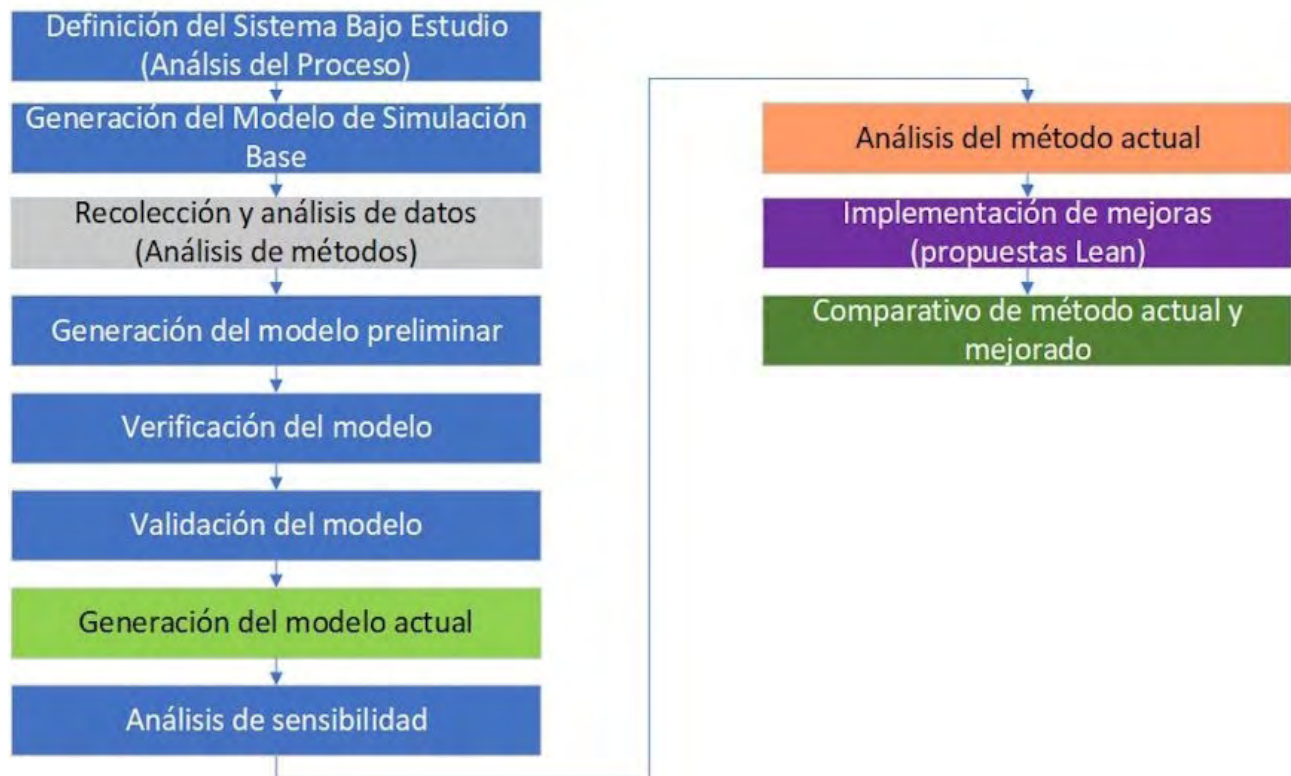
El uso del simulador ProModel para el modelado de procesos industriales se ha documentado en las aplicaciones a la ingeniería industrial: Phanden *et al.*<sup>25</sup> reportan un modelado en ProModel de una compañía de cerveza en la India, en la cual se analizaron escenarios con

cambios en la configuración del proceso, que presentaron beneficios importantes sobre todo en los costos. ProModel también ha presentado buena eficiencia en el modelado de líneas de espera en cajeros, con lo cual se mejoran los tiempos de servicio a los clientes y se reducen los lapsos de espera<sup>26</sup>.

La revisión documental del estado del arte en la simulación y análisis de métodos aplicada en la mejora de procesos productivos establece la pertinencia y viabilidad para la mejora de procesos de calzado, a continuación, se presenta la metodología de análisis propuesta.

## Método de trabajo

La metodología de la investigación se basa en las fases para la elaboración de un proyecto de simulación, la cual es una metodología genérica para el desarrollo de cualquier proyecto basado en el uso de simulación de eventos discretos. En este caso, se reporta el análisis del método original y el método mejorado para verificar la mejora de productividad. En la Figura 1 se muestra la metodología propuesta.



**Figura 1.** Metodología propuesta (elaboración propia)

**Definición del sistema bajo estudio:** el caso de análisis se desarrolla en una empresa fabricante de calzado infantil tipo tenis, en la que se realizan los procesos de almacén de materia prima, corte, preliminar, pespunte, deshebrado, ojillado, conformado, preparado de suela, montado, adorno, almacén de producto terminado.

**Generación del modelo de simulación base:** para la construcción del modelo de simulación se utilizó el software ProModel, a partir de un diseño conceptual del proceso de calzado; esta fase es importante debido a que se identifican los elementos del proceso clasificando en las locaciones, entidades, recursos, llegadas, variables y atributos.



**Recolección y análisis de datos:** en esta fase se aplican herramientas del análisis de métodos para la medición del trabajo, como el estudio de tiempos, análisis de distancias, distribución de la planta, entre otros. El estudio de tiempos inicial se muestra en las Figuras 2a y 2b. Los estudios de tiempos, calculando el tiempo estándar no presentan mucha eficiencia en lo modelos de simulación de eventos discretos, ya que no permiten modelar la aleatoriedad en el proceso.

Muestra	Corte 1	Corte 2	Preliminar			Pespunte																								
			Rayado	Planchado	Embarado para	Embarado	Empalme	Embarado para	Pegado de esponja	Revolteado	Cerrado zigzag	laterales agujetas	Costura de resorte	Brillos	Costura de seg IT Bor	China	Encarta la lengua y aplicación	Encarta cuello	Lateral bordado	Cierre y union de paloma	Pegado de forro	Armado de forro	Forro de lengua	Cerrado de lengua	Pegado de etiqueta	Costura de	Pegado de lengua			
1	6	4.00	8.00	28.00	1.138	3	3.14	6.14	9.59	3.18	4.56	3.55	23.74	7.05	19.79	10.50	18.73	12.76	13.68	21.91	9.80	11.97	4.68	4.49	4.88	8.30	8.30	8.30	4.88	8.30
2	6	8.00	6.00	9.00	1.223	2.7	4.25	4.71	11.43	4.83	6.52	2.56	22.58	8.74	24.52	11.49	20.84	12.40	11.77	22.09	9.22	8.23	4.44	8.55	5.31	6.78	6.78	6.78	5.31	6.78
3	2	6.00	6.00	25.00	1.718	7.2	3.06	7.62	12.98	3.44	4.58	2.96	28.61	8.29	20.69	11.50	14.11	12.61	13.13	21.39	9.64	9.94	5.50	8.86	5.07	6.79	6.79	6.79	5.07	6.79
4	10	3.00	6.00	26.00	1.41	2.6	4.11	4.68	9.39	4.19	4.35	3.35	24.60	8.53	32.31	11.78	14.70	15.04	17.82	26.44	6.03	8.45	7.60	7.93	6.52	6.67	6.67	6.52	6.67	
5	8	5.00	8.00	18.00	1.455	2.6	4.36	6.14	11.19	7.63	5.32	2.93	40.69	8.45	22.08	11.07	8.65	12.91	15.76	22.72	9.71	9.70	5.29	8.21	6.28	6.48	6.48	6.28	6.48	
6	7	7.00	8.00	12.00	1.53	8.9	3.16	5.56	9.53	5.72	4.28	2.35	24.51	8.53	19.25	19.24	9.50	13.18	12.62	24.31	7.50	9.65	5.60	7.95	3.50	6.93	6.93	3.50	6.93	
7	6	8.00	20.00	14.00	1.158	1.7	3.41	5.72	10.29	4.77	3.15	2.54	28.99	9.67	21.34	11.41	25.99	12.15	11.71	23.95	6.77	9.44	5.23	7.34	3.71	6.27	6.27	3.71	6.27	
8	10	6.00	15.00	17.00	1.083	3.6	4.59	5.60	12.96	4.89	4.22	5.09	23.30	7.89	54.15	12.21	45.31	14.83	25.01	21.97	7.31	9.14	4.79	6.37	6.02	6.65	6.65	6.02	6.65	
9	6	5.00	10.00	10.00	1.04	1.4	4.13	6.62	10.87	5.56	3.36	2.57	24.96	8.40	20.75	10.63	17.67	13.62	11.77	23.26	7.62	8.63	5.30	6.15	4.07	7.60	7.60	4.07	7.60	
10	8	7.00	21.00	20.00	1.143	4.9	3.24	5.92	10.96	5.14	5.96	3.84	32.74	8.45	20.39	10.79	21.67	13.73	11.72	21.36	6.54	9.33	5.03	8.02	4.12	5.47	5.47	4.12	5.47	
T. P	6.90	5.90	10.80	17.90	1.29	3.85	3.75	5.87	10.92	4.94	4.63	3.17	27.47	8.40	25.53	12.06	19.72	13.32	14.50	22.94	8.01	9.45	5.35	7.39	4.95	6.79	6.79	4.95	6.79	
Calificación	90	80	80	90	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
T. N	6.21	4.72	8.64	16.11	1.03	3.08	3.00	4.70	8.74	3.95	3.70	2.54	21.98	6.72	20.42	9.65	15.77	10.66	11.60	18.35	6.41	7.56	4.28	5.91	3.96	5.44	5.44	3.96	5.44	
Suplementos	9%	9%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%
T. E	6.77	5.14	9.59	17.88	1.15	3.42	3.33	5.21	9.70	4.30	4.04	2.77	23.96	7.32	22.26	10.52	17.19	11.62	12.64	20.00	6.99	8.24	4.66	6.44	4.31	5.92	5.92	4.31	5.92	
T.E *AREA		5.14		27.47					22.80																					

Figura 2a. Estudio de tiempos (elaboración propia)

Ojillado	Desebrado	Conformado	Preparado de suela		Montado															
			Lavado	Embarrado	Embarrado de planta	Embarrado de corte	Montado de Punta	Montado de Talones	Rayado de zapato	Embarrado de zapato	Ensuelado	Sacado de Horma	Lavado	Plantilla	Desebrado	Enstado	Enstado 2	Empapelado	Lavado de suela	E Inspeccion
14.90	4.23	15.25	5.72	12.63	7.26	5.41	13.35	19.75	13.31	15.05	36.45	9.12	24.2	12.86	12.58	30.9	48.68	13.25	21.72	20.72
15.02	8.48	16.38	7.63	11.84	10.18	21.02	13.67	14.36	15.83	16.65	39.16	15.38	20.9	6.72	27.54	40.4	54.41	8.56	24.59	9.33
17.04	15.15	14.89	5.48	12.20	21.35	9.32	20.22	14.00	14.24	16.69	38.34	12.31	25.4	6.69	23.47	22.8	45.13	11.36	30.56	12.78
15.66	9.25	16.57	9.18	12.13	6.43	6.75	18.10	17.31	13.38	16.30	39.16	11.31	23.1	16.14	20.97	54.2	36.92	12.45	19.45	15.32
17.29	6.48	14.98	4.83	12.40	9.29	15.45	11.31	10.36	8.74	35.22	41.23	15.54	31.8	5.27	19.98	38.3	44.58	10.55	16.83	12.90
16.25	8.08	15.63	7.39	11.07	21.23	31.94	14.70	22.47	21.30	16.91	36.85	10.39	26.9	6.82	21.07	28.8	49.58	11.26	21.40	9.52
19.46	11.81	16.84	6.94	12.66	14.31	13.25	13.29	23.91	13.52	13.34	35.74	14.59	23.7	5.21	15.87	24.0	49.89	9.89	16.79	11.03
18.81	13.18	16.52	8.61	11.04	19.04	8.50	16.20	33.11	16.39	17.23	39.56	13.07	16.6	16.79	28.78	31.9	32.38	10.27	23.21	14.20
16.05	12.97	16.33	7.34	14.87	9.12	10.35	16.55	30.03	16.12	30.55	39.48	16.85	38.6	7.89	39.85	23.4	31.84	10.36	12.81	10.04
15.26	11.30	15.77	6.35	14.67	13.45	9.64	14.96	16.48	11.54	15.20	37.96	16.85	31.0	4.77	20.55	34.6	47.50	10.19	18.00	10.14
16.57	10.09	15.92	6.95	12.55	13.17	13.16	15.24	20.18	14.44	19.31	38.39	13.54	26.22	8.92	23.07	32.93	44.09	10.81	20.54	12.60
80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
13.26	8.07	12.73	5.56	10.04	10.53	10.53	12.19	16.14	11.55	15.45	30.71	10.83	20.98	7.13	18.45	26.34	35.27	8.65	16.43	10.08
11%	11%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	9%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%
14.72	8.96	13.88	6.06	10.94	11.48	11.48	13.28	17.60	12.59	16.84	33.48	11.81	23.29	7.92	20.48	29.24	39.15	9.60	18.24	11.19
14.72	8.96	13.88	17.00					128.56									159.10			

**Figura 2b.** Estudio de tiempos (elaboración propia)

Para complementar el estudio de tiempos mostrado en la Figura 2 se ajustaron los datos de tiempos y así se obtuvieron los parámetros de las distribuciones correspondientes (L = log-normal, E = exponencial, U = uniforme), mediante pruebas de bondad de ajuste como se muestra en la Tabla 1. Los parámetros que se presentan en la Tabla 1 se utilizarán en la creación del modelo de simulación. Puesto que en cada corrida se utilizan variables aleatorias, los resultados tenderán a presentar variación entre las réplicas, por lo cual es importante realizar un análisis estadístico para estimar adecuadamente las variables de respuesta de la simulación. Lo anterior se realiza para simular la variabilidad que existe en los procesos reales, ya que, si se utilizan los tiempos estándar para la simulación, siempre se obtendrán los mismos resultados, reduciendo la eficiencia del análisis.



**Tabla 1.** Tiempos estándar y parámetros de las distribuciones de probabilidad (elaboración propia)

Proceso	Tiempo estándar (segundos)	Distribución de probabilidad
Corte sintético	6.77	L (4,1.66)
Corte esponja	4.72	L (5,1.66)
Rayado	9.59	E (6,4.8)
Planchado	17.88	U (9,28)
Empalme	4.57	L (1.93,0.874)
Accesorios	8.54	U (8.72,10.8)
Pespunte 1	136.62	L (139,2019)
Revolteado	9.70	L (8.8,0.553)
Pespunte 2	32.25	U (4.08,20.1)
Deshebrado	8.96	U (4.23,15.2)
Ojillado	14.72	L (14.7,0.2)
Costura de seguridad	4.31	L (0.965,1.35)
Conformado	13.88	U (14.9,16.8)
Lavado de suela	6.06	U (4.83, 9.18)
Embarrado de suela	10.94	E (11,1.51)
Hormado	11.81	U (9.12,16.9)
Embarrado de planta	11.48	L (4.51,1.93)
Embarrado de corte	11.48	L (14.7,1.86)
Montado de punta	13.28	L (5.15,2.20)
Montado de talón	17.60	L (2.56,2.79)
Rayado de suela	12.59	U (8.74,21.3)
Embarrado de zapato	16.84	L (12.8,1.4)
Ensuelado	33.48	U (35.7,41.2)
Lavado	23.29	U (16.6,38.3)
Emplantillado	7.92	L (4.63,0.751)
Deshebrado	20.48	L (2.55,2.96)
Encintado	39.15	E (22.8, 10.1)
Empapelado	9.60	L (0.681,2.31)
Inspección	18.24	U (12.8,30.6)
Encajillado	11.19	E (9.33,3.27)



**Generación del modelo preliminar:** una vez obtenida la información de ingeniería, se integró al modelo de simulación, especificando las entradas, procesamiento y las salidas del sistema. Se partió del supuesto de que la materia prima se suministra al inicio del turno de trabajo, además, se consideró que el tamaño de los lotes es de 60 pares, de acuerdo con la programación. Adicionalmente, se consideró el factor de las cajas, las cuales se agrupan en seis y se someten a un proceso de flejado, esta configuración se denomina “medias” dentro del proceso de fabricación.

**Verificación del modelo:** una vez implantados los supuestos del modelo, se realizó una verificación. Es importante realizar pruebas de corridas y verificar si existen errores de programación, también es importante comprobar que las entidades, recursos y locaciones tengan orden lógico con base en el planteamiento original y lo observado en el proceso real.

**Validación del modelo:** la verificación de los resultados preliminares en las corridas se comparó con los datos de producción reales en la empresa. La producción diaria del modelo seleccionado se da entre los 600 a 900 pares; es importante verificar los supuestos del modelo contra la información real del sistema para establecer si el modelo explica bien su funcionamiento.

**Generación del modelo inicial:** una vez validado el modelo, se integraron las locaciones, entidades y recursos al *layout* de ProModel, se cargaron los parámetros obtenidos en la fase de recolección y análisis de datos, el *layout* es similar al del proceso real y se consideraron las distancias y tiempos de traslado reales. Se integró un tablero indicador con tres variables de interés en el proceso: pares completos, medias y defectos. En la Figura 3 se muestra la configuración del modelo inicial en el *layout* de ProModel.

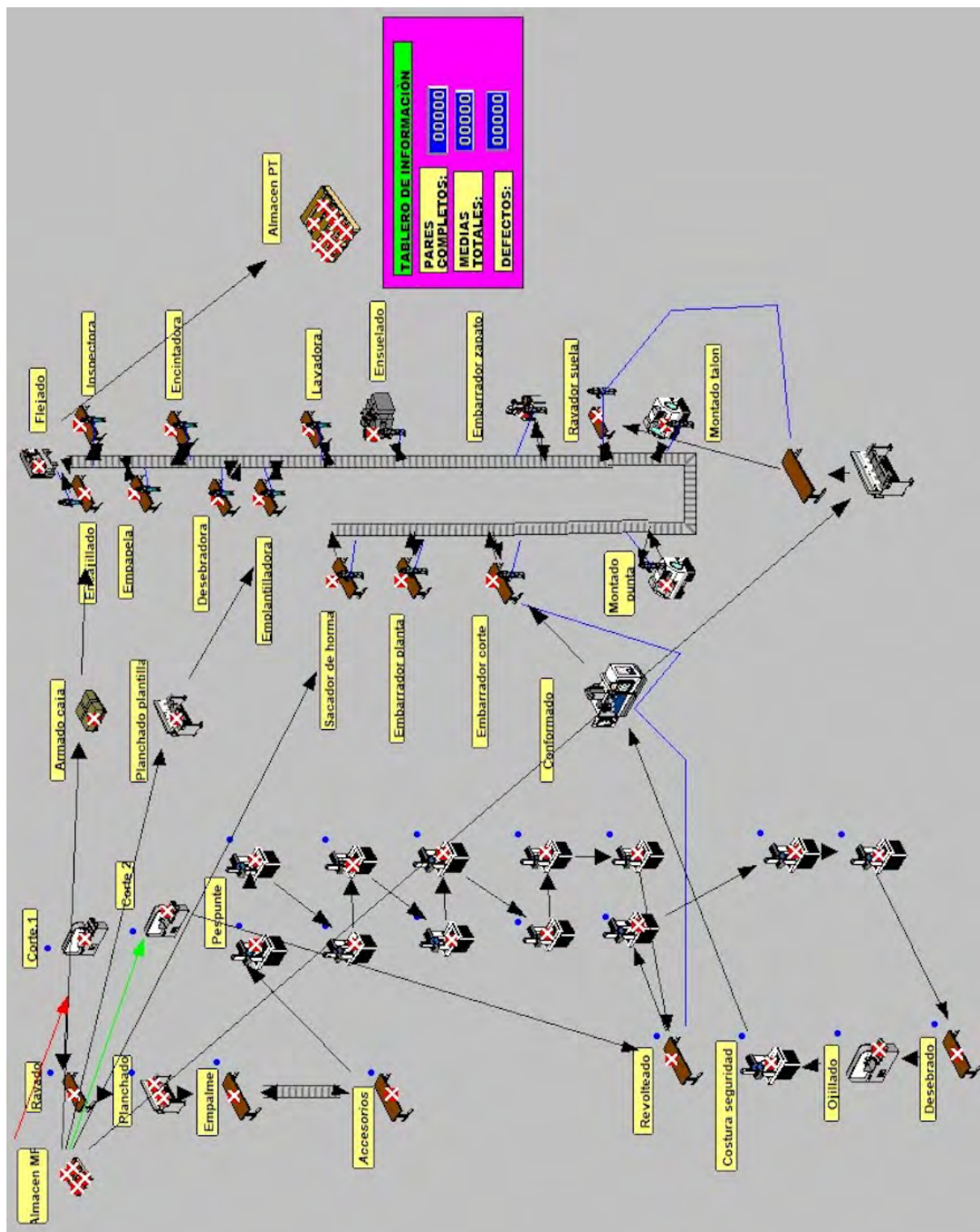


Figura 3. Layout del modelo inicial en ProModel (elaboración propia)

**Análisis de sensibilidad:** para el cálculo de la longitud de las réplicas se aplica el teorema de Tchebycheff en la ecuación 1, dado que se desconoce la distribución de la principal variable de respuesta en el modelo (pares terminados); para su estimación se realizó una corrida inicial de tamaño  $n = 10$ , con la cual se calculó la desviación estándar muestral de seis pares dentro de un rango de error de  $\pm 3$ , con un nivel de confianza de 90 % ( $\alpha = 1 - 0.9 = 0.1$ )

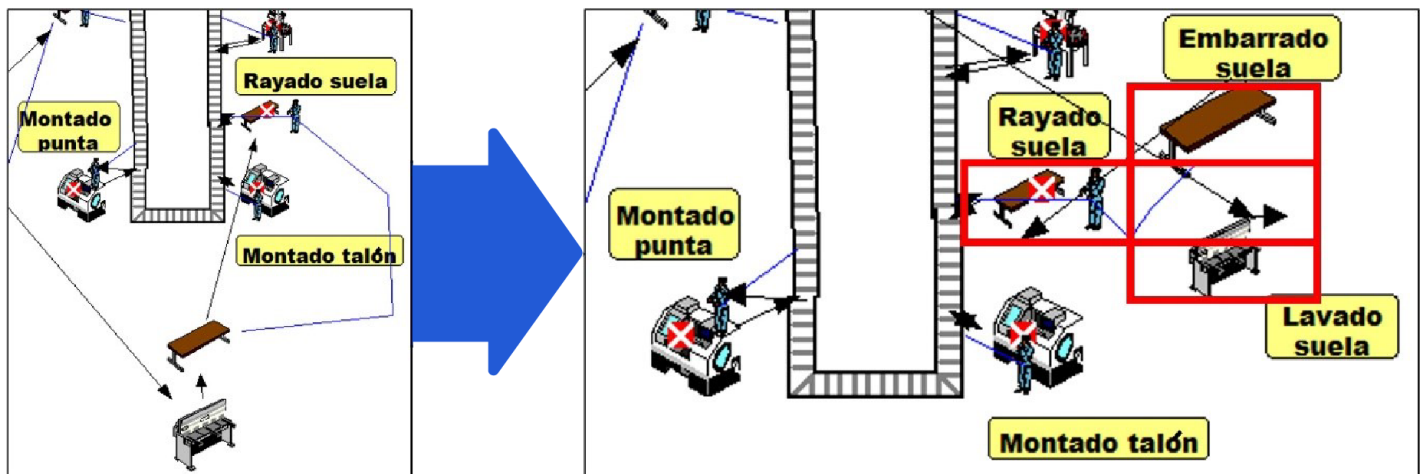
$$n = \left(\frac{1}{\alpha}\right) \left(\frac{S}{E}\right)^2$$

Sustituyendo los datos:

$$n = \left(\frac{1}{0.1}\right) \left(\frac{6}{3}\right)^2 = 40$$

Lo cual indica que se requiere realizar un total de 40 réplicas, para que la variable de respuesta encuentre su estado estable en las corridas de simulación, de acuerdo con el teorema de Tchebycheff.

**Análisis del método inicial e implementación de mejoras:** con base en los resultados iniciales en las corridas de simulación se procedió a realizar un análisis de desperdicios desde un enfoque 'lean' para detectar áreas de oportunidad en el proceso. Se propuso realizar una mejora en la distribución de planta con base en un diagrama de recorridos, con lo cual se identificaron traslados muy largos por parte del recurso humano. Se propuso la creación de una célula de manufactura tipo "T" (Figura 4) en el área de preparado de suela, con la finalidad de integrar en la misma estación las áreas de lavado, embarrado y rayado de suela, las cuales se encuentran en lugares diferentes y generan ineficiencias en el flujo del proceso. Al hacer este cambio se reducen los traslados y existe una mayor retroalimentación dentro del sistema.



**Figura 4.** Célula de manufactura tipo T en procesos de suela (elaboración propia)





Adicionalmente se realizó un balanceo de la línea de pespunte, ya que, basándose en los datos de la simulación, se detectó que es el área con mayor porcentaje de bloqueo, debido a la falta de equilibrio entre los tiempos de cada operación. En la Figura 5 se muestra el layout mejorado con los cambios en la distribución del proceso.

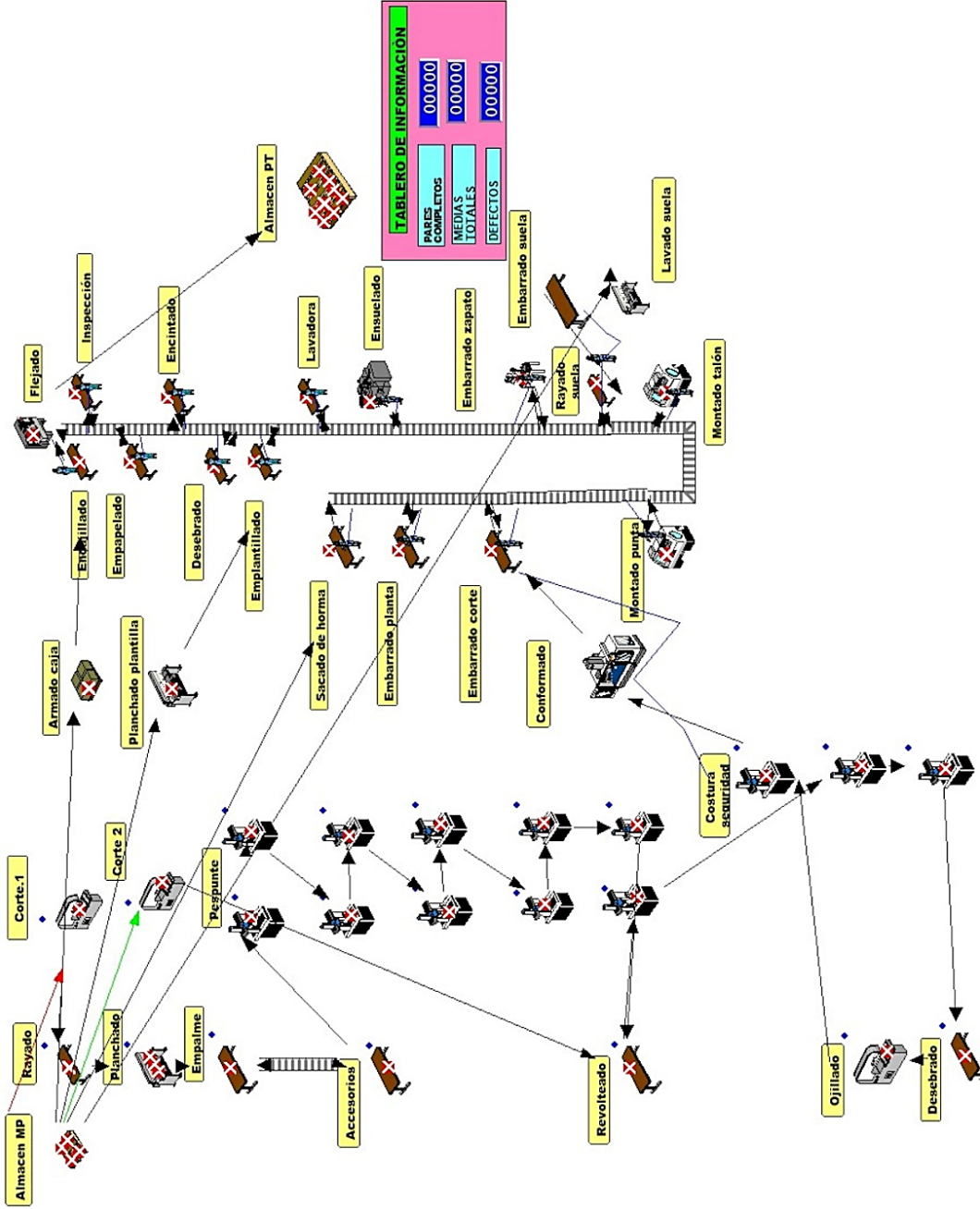


Figura 5. Layout del modelo mejorado en ProModel (elaboración propia)

## Resultados y análisis de datos

Los resultados de la simulación con las 40 réplicas (Tabla 2), arrojaron las estadísticas para los pares completos, las medias y los defectos, dado que se integró la inspección con el porcentaje conocido de defectos. Se observó que la producción fluctúa entre los 600 a 900 pares por día, que es lo que genera en la producción real. A partir de esta información se deduce que el modelo inicial replica de forma adecuada el comportamiento del sistema real.

Debido a que se utilizan tiempos generados por variables aleatorias, se sabe que las variables de respuesta en la simulación presentarán variación, por lo que es importante calcular estadísticos descriptivos para el promedio, valor mínimo, valor máximo y la desviación estándar para las réplicas de las variables de respuesta (pares completos, medias y defectos), como se muestran en la Tabla 2. A partir de estos valores se puede establecer si existe mejora al aplicar el análisis de métodos.

**Tabla 2.** Resultados de las réplicas de simulación para las variables de salida (elaboración propia)

Réplica	Nombre	Valor Inicial
Promedio P	ares completos	649.40
Mínimo P	ares completos	598.00
Máximo	Pares completos	713.00
Desv. Est.	Pares completos	30.79
Promedio M	edias	107.75
Mínimo M	edias	99.00
Máximo M	edias	118.00
Desv. Est.	Medias 5	.16
Promedio D	efectos	13.58
Mínimo D	efectos	8.00
Máximo D	efectos	23.00
Desv. Est.	Defectos 3	.52

Una vez aplicadas las propuestas de mejora con la redistribución de los procesos a al inicio de la banda, con nuevo modelo de simulación, se logró aumentar la producción promedio de 649 pares por día a 702 pares, resultando en un incremento en la producción del 8.2 %. Es

importante señalar que los indicadores de los operadores individuales que participan en el proceso también pueden incrementarse con el uso de estrategias de mejora 'lean', como se puede verificar en la Tabla 3.



**Tabla 3.** Comparación de resultados individuales con el método inicial y método mejorado (elaboración propia)

Procesos	INICIAL			MEJORADO			Resultados
	% Tiempo de uso o de valor agregado en las locaciones	% Tiempo de traslado de las entidades en el sistema	% Tiempo inactivo (tiempo muerto) en las locaciones	% Tiempo de uso o de valor agregado en las locaciones	% Tiempo de traslado de las entidades en el sistema	% Tiempo inactivo (tiempo muerto) en las locaciones	
Conformado	56.20	1.31	42.39	50.07	0.13	49.70	Disminuyen los recorridos.
Rayado	92.24	1.28	6.45	93.41	0.04	6.54	Disminuyen los recorridos, aumenta la productividad.
Hormado	98.33	0.00	1.67	98.82	0.00	1.18	Aumenta la productividad.
Embarrado de planta	86.25	0.00	13.75	85.88	0.00	14.12	Reduce la productividad.
Embarrado de. corte	85.14	0.00	14.86	84.84	0.00	15.16	Reduce la productividad.
Montado de planta	36.78	0.00	63.22	40.75	0.00	59.26	Aumenta la productividad.
Montado de punta	36.82	0.00	63.18	39.12	0.00	60.88	Aumenta la productividad.
Embarrado de zapato	67.50	0.00	32.50	69.14	0.00	30.86	Aumenta la productividad.
Ensuelado	76.29	0.00	23.30	76.23	0.00	23.77	Se mantiene la productividad
Lavado	40.85	0.00	59.15	40.54	0.00	59.46	Se mantiene la productividad.
Emplantillado	13.47	0.00	86.53	13.51	0.00	86.49	Aumenta la productividad.
Deshebrado	8.70	0.00	91.30	9.30	0.00	90.70	Aumenta la productividad.
Encintado	45.82	0.00	54.18	45.79	0.00	54.61	Se mantiene la productividad.
Empapelado	5.17	0.00	94.83	5.16	0.00	94.84	Se mantiene la productividad.
Inspección	28.39	0.00	71.61	28.37	0.00	71.71	Se mantiene la productividad.
Encajillado	20.33	0.00	79.67	20.42	0.00	79.58	Aumenta la productividad.



## Discusión

Para una mejor interpretación, cabe señalar que dentro de la reducción de desperdicios con enfoque 'lean' se busca la disminución de las actividades que no generan valor, lo cual también ocurre al reducir los tiempos de traslado, ya que disminuye el tiempo muerto en las locaciones.

Se observa que la simulación permite un enfoque sistémico que permite detectar cómo afectan los cambios en los indicadores individuales y de manera global en el sistema, lo cual es difícil de detectar con modelos matemáticos clásicos. Para el caso de análisis, las estrategias de redistribución y balanceo de líneas dieron resultados muy positivos en la productividad, sin la necesidad de considerar inversión adicional.

Sin embargo, se observa que, en ciertas estaciones de trabajo como el embarrado de planta y corte, la productividad disminuyó ligeramente. Esto se debe, probablemente, a la naturaleza de estas operaciones, que implican más variabilidad en los tiempos de procesamiento, haciendo más difícil reducir los tiempos muertos sin afectar la calidad del producto final. A pesar de estas ligeras disminuciones en algunas estaciones, su impacto en el desempeño global fue bajo debido a que las mejoras en las demás estaciones compensaron las pérdidas. Además, en estaciones donde la productividad se mantuvo, como ensuelado y lavado, los resultados sugieren que ya se estaba alcanzando un nivel óptimo de eficiencia con el método inicial, limitando el margen de mejora. En términos generales, los cambios positivos en otras estaciones permitieron un incremento significativo de la productividad global, minimizando cualquier impacto negativo generado en procesos individuales.

Los resultados muestran que, después de la aplicación de la redistribución de planta y el balanceo de líneas, el modelo final logró aumentar la producción en un 8.2 % en comparación con el modelo inicial. Esta mejora significativa no solo aumenta la capacidad de producción de la empresa, sino que también reduce los tiempos muertos y los cuellos de botella, lo que lleva a una mayor eficiencia operativa y una mejor utilización de los recursos disponibles.

Algunas ideas sobre trabajos futuros relacionados con esta propuesta se dan en la implementación de mejoras 'lean', con el uso de técnicas adicionales como el 'kanban' o células de trabajo, el desarrollo de herramientas de simulación específicamente diseñadas, así como la evaluación del impacto económico en las mejoras, integrando el análisis del retorno de la inversión, para la determinación de las mejoras en términos de beneficio financiero para la empresa.

El desarrollo de un sistema de gestión de mejora continua es necesario para consolidar las mejoras implementadas y garantizar que sean sostenibles a largo plazo, con prácticas como programas de capacitación para el personal y sistemas de seguimiento y medición del desempeño. Finalmente, la extensión del estudio a otras áreas de la empresa, con la identificación de oportunidades de mejora adicionales, tales como el manejo de materiales, control de inventarios o la logística de distribución.



## Conclusiones

La aplicación exitosa de la redistribución de planta y el balanceo de líneas ha demostrado ser una estrategia efectiva para mejorar el flujo de producción y reducir los desperdicios en el proceso de fabricación de calzado. La redistribución de planta permitió una disposición más eficiente de las estaciones de trabajo, minimizando las distancias de recorrido y optimizando el flujo de materiales y productos. Por otro lado, el balanceo de líneas aseguró una distribución equilibrada de la carga de trabajo entre las estaciones, evitando la acumulación de inventario y la sobrecarga de recursos.

Es importante destacar que la mejora del 8.2 % en la producción no solo representa un aumento en la capacidad de la empresa, sino también una reducción en los costos asociados con la fabricación de calzado. Al reducir los desperdicios y optimizar el proceso, la empresa puede operar de manera más eficiente, lo que se traduce en un mayor rendimiento financiero y una mayor competitividad en el mercado.

La implementación de principios de la manufactura esbelta, como la redistribución de planta y el balanceo de líneas, ha demostrado ser una estrategia efectiva para mejorar el flujo de producción y reducir los desperdicios en los procesos de fabricación de calzado. Estos principios se alinean con la filosofía 'lean', que busca eliminar actividades que no agregan valor al producto final y maximizar la eficiencia operativa. ProModel permite simular diferentes escenarios y optimizar el diseño del proceso de fabricación, lo que facilita la toma de decisiones informadas.

## Referencias

1. INEGI (INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA).. *Estadísticas a propósito de la Industria del calzado*. 2014.
2. INEGI (INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA). *Estadísticas a propósito de la industria de la moda del vestido, el calzado y la joyería*. 2018. Disponible en <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825095666>.
3. RAJADELL CARRERAS, Manuel y Sánchez, José Luis. *Lean Manufacturing*. La evidencia de una necesidad. [En línea]. España. Ediciones Díaz de Santos, S.A. 2010. [Fecha de consulta: 10 de diciembre de 2023]. Disponible en <https://books.google.com.mx/books?id=IR2xgsdmdUoC>. ISBN: 9788479789671.
4. GARCÍA DUNNA, Eduardo; Cárdenas, Leopoldo Eduardo y García, Heriberto. *Simulación y análisis de sistemas con ProModel*. 2ª. edición. Pearson Educación. 2013. 346 pp. ISBN: 9786073215114.
5. IMAI, Masaaki. *Kaizen: The Key to Japan's Competitive Success*. Irwin Professional Pub. 1986. 260 pp. ISBN: 007554332X.
6. BHAMU, Jaiprakash y Sangwan, Kuldip Singh. *Lean manufacturing: Literature review and research issues*. *International Journal of Operations and Production Management*. [En línea]. Vol. 34 (7), pp. 876–940. 1 de julio de 2014. [Fecha de consulta: 8 de diciembre de 2023]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1108/IJOPM-08-2012-0315>. ISSN: 0144-3577.
7. QUESADO PINTO, José Luís; Matias, Joao Carlos; Pimentel, Carina; Garrido, Susana y Govindan, Kannan. *Lean Manufacturing Tools*. Management for Professionals. [En línea]. Springer, Cham. 27 de junio de 2018. [Fecha de consulta: 5 de diciembre de 2023]. En: *Just in Time Factory*. Management for Professionals. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-77016-1\\_4](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-77016-1_4). ISBN: 978-3-319-77016-1.
8. CABRI, Giacomo y Fioretti, Guido. *Flexibility out of standardization*. *International Journal of Organization Theory and Behavior*. [En línea]. Vol. 25 (1/2), pp. 22–38. 6 de junio de 2022. [Fecha de consulta: 10 de diciembre de 2023]. Disponible en <https://doi.org/10.1108/IJOTB-11-2020-0197>. ISSN: 1093-4537.



9. SOCCONINI, Luis. Lean Manufacturing. Paso a Paso. [En línea]. ICG Marge, SL. Gestiona. Biblioteca de logística. 2019. [Fecha de consulta: 5 de diciembre de 2023]. Disponible en <https://books.google.com.mx/books?id=rjyeDwAAQBAJ>. ISBN: 9788417903046
10. PASCU, Cristina Ileana; Dumitru, Ilie; Gheorghe, Stefan y Nisipas, Mihai.. Implementation of Total Productive Maintenance Principles for Quality Improvement in an Automotive Company. *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 880, pp.171–176. 2018. [Fecha de consulta: 3 de diciembre de 2023]. Disponible en <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.880.171>. ISSN: 1662-7482.
11. SEPTIANI, W., Divia, G. A. and Adisuwiryo, S. Warehouse Layout Designing of Cable Manufacturing Company using Dedicated Storage and Simulation ProModel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. [En línea]. Vol. 847 (1). 2020. [Fecha de consulta: 3 de diciembre de 2023]. Disponible en <https://doi.org/10.1088/1757-899X/847/1/012054>.
12. SANCLEMENTE, Alberto; Escobar, Carlos; Sarría, Mónica; Aragón, Alexander; Castillo, Alejandro y Correa, Maritza. *Lean Six Sigma: Aplicación en mipymes de calzado y marroquinería*. [En línea]. Programa Editorial Universidad Autónoma de Occidente y Fundación Universitaria Católica Lumen Gentium. 2022. [Fecha de consulta: 9 de diciembre de 2023]. Disponible en <https://books.google.com.mx/books?id=9P1vEAAAQBAJ>. ISBN: 9789586190893.
13. PAUCAR, V., Munive, S., Nuñez, V. Marcelo, G. E., Alvarez, J. C. and Nayusami, S. Development of a lean manufacturing and SLP-based system for a footwear company. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*. [En línea]. Singapur. 2020, pp. 1112–1116. [Fecha de consulta: 4 de diciembre de 2023]. Disponible en <https://doi.org/10.1109/IEEM45057.2020.9309667>.
14. CANALES-JERI, Luis; Rondinel-Oviedo, Víctor; Flores-Pérez, Alberto y Collao-Díaz, Martín. *Lean model applying JIT, Kanban, and Standardized work to increase the productivity and management in a textile SME*. ACM: The 3rd. International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management. [En línea]. Barcelona, España. 31 de mayo de 2022. pp. 79–84. [Fecha de consulta: 4 de diciembre de 2023]. Disponible en <https://doi.org/10.1145/3524338.3524351>.
15. CORREA, Angie Paola; Castro, Julián Andrés; Garcés, Carolina y Ceballos, Yoni Fernando. Simulación y evaluación de un proceso productivo de suelas termoplásticas en Colombia. *Entre Ciencia e Ingeniería*. [En línea]. Vol.14 (28), pp.10–15. 2020. [Fecha de consulta: 10 de diciembre de 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.31908/19098367.1850> ISSN: 1909-8367.
16. BOCANEGRA-HERRERA, Claudia C. y Orejuela-Cabrera, Juan Pablo. Cellular Manufacturing System Selection with Multi-lean Criteria, Optimization and Simulation. *Ingeniería y Universidad*. [En línea]. Vol. 21 (1), pp. 7–26. 2017. [Fecha de consulta: 15 de diciembre de 2023]. Disponible en <https://www.redalyc.org/journal/477/47749034003/html/> ISSN: 0123-2126.
17. SCHROER, Bernard J. Simulation as a Tool in Understanding the Concepts of Lean Manufacturing. *Simulation*. [En línea]. Marzo 2024. [Fecha de consulta: 20 de diciembre de 2023]. <https://doi.org/10.1177/0037549704045049>. ISSN: 0037-5497.
18. SOLOMON, Hermela; Jilcha, Kassu y Berhan, Eshetie. Lead time prediction using simulation in leather shoe manufacturing. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. [En línea]. Vol. 334, pp. 283–292. 2015. [Fecha de consulta: 10 de diciembre de 2023]. Disponible en: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-13572-4\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-319-13572-4_23).
19. MARES CASTRO, Armando y Guevara Horta, Julio. Simulación, evaluación y mejora en proceso de fabricación de calzado tipo tenis. *Advances in Engineering and Innovation*. [En línea]. Vol. 8 (18), pp. 1–12. 7 de julio de 2023. [Fecha de consulta: 20 de diciembre de 2023]. Disponible en <https://www.progreso.tecnm.mx/revistaAEI/index.php/aei/article/view/158>. ISSN: 2448-685X.



20. YAZICI, Hulya Julie, Simulation modeling of a facility layout in operations management classes. *Simulation and Gaming*. [En línea]. Vol. 37 (1), pp. 73-87 Marzo de 2006. [Fecha de consulta: 18 de diciembre de 2023]. Disponible en <https://doi.org/10.1177/1046878105282159>. ISSN: 1552-826X.
21. SARMIENTO-VÁSQUEZ, Alfonso y López-Sandoval, Eduardo. Una comparación cualitativa de la dinámica de sistemas, la simulación de eventos discretos y la simulación basada en agentes. *Ingeniería Industrial*. [En línea]. Núm. 035), pp. 27-52. 21 de diciembre de 2017. [Fecha de consulta: 16 de diciembre de 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.26439/ing.ind2017.n035.1789>. ISSN: 2523-6326.
22. LÓPEZ-SÁNCHEZ, Alicia Yesenia, González-Lara, Aida Lucina y Alcaraz-Corona, Sergio. Simulación para la optimización de la producción de ejes en la línea de ensamblaje de una empresa de manufactura. *Ingeniería, investigación y tecnología*. [En línea]. Vol. XX (1). Enero- marzo 2019. [Fecha de consulta: 10 de diciembre de 2023]. Disponible en <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40465050005> ISSN: 2594-0732.
23. OROZCO-CRESPO, Erik; Sablón-Cossio, Neyfe; Saraguro-Piar, Ramiro; Hermoso, Dalila y Rodríguez-Sánchez, Yadamys. Optimización de Recursos mediante la Simulación de Eventos Discretos. *Revista Tecnología en Marcha*. [En línea]. Vol. 32 (2), pp. 146-164. Abril-junio 2019. [Fecha de consulta: 5 de diciembre de 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.18845/tm.v32i2.4356>.
24. AYALA LANDEROS, J. Gabriel; Román, Sonia E., Navarrete, A. Custodio y González, A. Optimización de un proceso industrial de fosfatado mediante simulación de eventos discretos y tiempos determinísticos. *Computación y Sistemas*. [En línea]. Vol. 25 (1), pp. 237-247. 2021. [Fecha de consulta: 3 de diciembre de 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.13053/CYS-25-1-3892>. ISSN: 2007-9737.
25. PHANDEN, Rakesh Kumar; Chhabra, Chaudhary, Tushar y Kaliramna, Akash. Improvements in Production Line Using ProModel© Simulation Software: A Case Study of Beer Beverage Company in India. [En línea]. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. pp. 9-21. 18 de febrero de 2021. [Fecha de consulta: 13 de diciembre de 2023]. [https://doi.org/10.1007/978-981-33-4320-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-33-4320-7_2). ISSN: 2195-4364.
26. INDRAJAYA, Drajat y Cornellia, Riri. Analisis Model Antrian Loker Transaksi pada PT. POS Indonesia (persero) Kantor Cabang Sawangan dengan Menggunakan Software ProModel. *STRING (Satuan Tulisan Riset dan Inovasi Teknologi)*. [En línea]. Vol. 3 (2), pp. 170-175. 2018. [Fecha de consulta: 17 de diciembre de 2023]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.30998/string.v3i2.2828>. ISSN: 2549-2837

Fecha de recepción

30/09/2024

Fecha de aceptación

25/04/2024

Fecha de publicación

30/09/2024

La Revista Reacción actúa como mero difusor, por lo que el contenido y opiniones del artículo son responsabilidad exclusiva de los autores y autoras, y no representan la opinión oficial de la Revista Reacción, ni de la Universidad Tecnológica de León.

La revista adquiere los derechos patrimoniales de los artículos solo para difusión sin ningún fin de lucro. Las personas que utilicen la información contenida en la revista para su difusión están obligadas a referenciar la revista como fuente de información.



# REA>XION

Ciencia y tecnología universitaria

latindex

Google Académico

 **Actualidad Iberoamericana**  
Indice Internacional de Revistas

  
**PERIÓDICA**  
Indice de Revistas Latinoamericanas en Ciencias

  
**UTL**