

CIENTIA

Nº 2 AÑO 2025

Publicación Anual de la Facultad de
Ingeniería y Ciencias Agropecuarias de la
Universidad Nacional de San Luis

FICA

Facultad de
Ingeniería y Ciencias
Agropecuarias



Universidad
Nacional de
San Luis



CIENTIFICA

Nº 2 - Año 2025 - ISSN 3008-9042

Publicación de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias, de la Universidad Nacional de San Luis.

Dirección postal: Ruta Provincial N° 55 Extremo norte, Villa Mercedes (D5730EKQ), San Luis, Argentina

Equipo editorial

Director editorial:

Dr. Federico Martín Serra

Editor en jefe:

Mgtr. Javier Alejandro Carletto

Editores temáticos:

Dr. Francisco Daniel Esteban

Dr. Pablo Santiago Belzunce

Dra. Marisa Mariela Garbero

Dra. María Laura Rodríguez

Dra. Nora Andrea Merino

Ing. María Magdalena Costanzo

Ing. Mario Federico Bergoglio

Mgtr. Guillermo Luciano Magaldi

Mgtr. Sergio Luis Ribotta

Diseño Web:

Esp. Juan Pablo Demichelis

Diseño Gráfico:

Dg. Leonardo Agustín Vidal Enriquez

FICA-UNSL Villa Mercedes - San Luis - noviembre 2025

Nota: Los trabajos expuestos en Científica han sido remitidos por los autores citados en cada artículo. Los mismos fueron publicados solo con modificaciones de formato para lograr la uniformidad, de acuerdo a las normas establecidas previamente por lo que el equipo editorial no se responsabiliza por errores tipográficos, ortográficos, por la calidad de redacción ni contenido de los trabajos presentados, siendo exclusiva responsabilidad de los autores. La mención de empresas, productos y/o marcas comerciales no representa recomendación ni preferencia por parte del equipo editorial ni la facultad. Cualquier conflicto de interés vinculado a los artículos y resultados publicados recae en los autores, eximiendo al equipo editorial de toda responsabilidad al respecto.

Índice de Artículos

1

Páginas
3 a 10

La retroalimentación formativa como herramienta para mejorar la enseñanza y aprendizaje en Análisis Matemático II: Enfoque centrado en el estudiante

2

Páginas
11 a 21

Efectividad de preguntas intercaladas en la comprensión de electrostática: estudio transversal repetido en estudiantes de Física 2 (FICA-UNSL)

3

Páginas
22 a 40

Prevalencia de patógenos potencialmente micotoxicógenos en granos de maíz, en la región centro este de la provincia de San Luis

4

Páginas
41 a 57

Análisis de la biodiversidad de artrópodos del suelo, en ambientes con diferente nivel de disturbio

5

Páginas
58 a 64

Efecto de *Dichelops furcatus*, *Spodoptera frugiperda* y *Helicoverpa zea* en maíz tardío

6

Páginas
65 a 73

Modelado y control de una estación de carga para vehículos eléctricos pequeños

7

Páginas
74 a 92

Desarrollo de una herramienta de análisis estadístico aplicado al pronóstico de la demanda en sistemas eléctricos de potencia

8

Páginas
93 a 101

Modelado de la histéresis pulmonar a partir de señales fisiológicas empleando identificación de parámetros basada en datos

La retroalimentación formativa como herramienta para mejorar la enseñanza y aprendizaje en Análisis Matemático II: Enfoque centrado en el estudiante

Formative feedback as a tool to improve teaching and learning in Mathematical Analysis II: A student-centered approach

Yamila Lequin Vargas, Rita Karina Olguín y Javier Rodríguez Piatti

Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias - Universidad Nacional de San Luis

yamilalequinvargas@gmail.com, olguinrk@gmail.com, piattijavier@gmail.com

CientiFICA Nº2

Año: 2025

pp. 3 – 10

Historial del Artículo

Recibido:

14/05/2024

Enviado revisión:

29/06/2024

Aceptado:

26/09/2024

ARK CAICYT:

<https://id.caicyt.gov.ar/ark:/s30089042/xu011pedk>

Área temática:

Educación en
Ingeniería

Resumen: La evaluación en los procesos de enseñanza y aprendizaje cumplen dos funciones fundamentales, una social y otra pedagógica. La primera se centra en la calificación y promoción de saberes, respondiendo a cuestiones como ¿Qué se aprendió? y ¿Cómo se aprendió? mientras que la segunda se encarga de la regulación del aprendizaje, es decir aquella que ocurre mientras se está enseñando y aprendiendo. La combinación de ambas, enmarcadas en un modelo de evaluación formativa, ponen foco en el rol de los estudiantes. Como integrantes del Proyecto de investigación: “La enseñanza y aprendizaje de las matemáticas en las carreras de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias: análisis estrategias y propuestas didácticas” de la Universidad Nacional de San Luis, se llevó a cabo el análisis de los procesos de enseñanza y aprendizaje aplicados en la asignatura Análisis Matemático II, poniendo principal énfasis en el tipo de retroalimentación generada. Este trabajo responde a un estudio descriptivo fundamentado en los métodos de investigación de análisis de contenido y observación directa. Por tanto, se analizaron y aplicaron diferentes técnicas y herramientas como cuestionarios, análisis de evaluaciones, observación en devoluciones orales con el fin de detectar procesos de retroalimentación involucrados. El análisis se basa en una categorización de retroalimentaciones. El objetivo de este análisis es repensar y mejorar nuestras prácticas docentes procurando ofrecer una retroalimentación formativa para que el estudiante pueda reflexionar sobre sus producciones y desempeños y a la vez pueda mejorarlos, regulando así su propio proceso de aprendizaje.

Palabras Claves:

Retroalimentación,
Estrategias de
enseñanza,
Aprendizaje

Keywords:

Feedback, Teaching
Strategies, Learning

Abstract: Assessment in teaching and learning processes serves two fundamental functions: a social one and a pedagogical one. The first focuses on grading and promoting knowledge, addressing questions such as "What was learned?" and "How was it learned?"; while the second is concerned with regulating learning, which occurs during the teaching and learning process. The combination of both, framed within a formative assessment model, emphasizes the role of students. As part of the research project "Teaching and Learning Mathematics in the Engineering and Agricultural Sciences Programs at the National University of San Luis: Analysis, Strategies, and Didactic Proposals," an analysis of the teaching and learning processes applied in the course Mathematical Analysis II was conducted, with a primary emphasis on the type of feedback generated. This work responds to a descriptive study grounded in content analysis and direct observation research methods. Therefore, different techniques and tools were analyzed and applied, such as questionnaires, assessment analyses, and observations of oral feedback, to detect the feedback processes involved. The analysis is based on a categorization of feedback. The objective of this analysis is to rethink and improve our teaching practices by aiming to provide formative feedback so that students can reflect on their outputs and performances and, at the same time, improve them, thereby regulating their own learning process.

INTRODUCCIÓN

En un mundo con tantos cambios y sabiendo que la educación es tarea de todos los integrantes de una sociedad, aquellos encargados de promover, apoyar y guiar el proceso de aprendizaje de los estudiantes son los profesores. Por lo que esta tarea debe ser innovadora y adaptarse a los tiempos que corren. La actualización y el perfeccionamiento llevan a implementar nuevas o reinventar ciertas metodologías, estrategias o prácticas de enseñanza, que en conjunto logran transformar la enseñanza en aprendizajes. Esto presenta un desafío y es una tarea, que, en algunas ocasiones, suele ser difícil pero no imposible.

Entre las prácticas pedagógicas con mayor costo-efectividad e impacto en los aprendizajes, se encuentran aquellas que promueven la retroalimentación formativa. [1]

Este tipo de práctica es un eje fundamental de la evaluación formativa porque permite recoger información de los procesos que se encuentran en curso de desarrollo e identifica dos características comunes a las distintas concepciones de la evaluación: la alusión a su contemporaneidad con los procesos de enseñanza y de aprendizaje y también a la información recogida que permite mejorar los procesos evaluados.

La investigación educativa, en este tiempo, ha resaltado la relevancia de la retroalimentación formativa en el aula, destacando su capacidad para impulsar el compromiso de los estudiantes, fortalecer su autoeficacia y fomentar la autorregulación del aprendizaje. Asimismo, promueve un enfoque centrado en el estudiante, alentando la personalización del proceso educativo y considerando las necesidades individuales de cada estudiante.

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo explorar el papel de la retroalimentación formativa en los procesos de aprendizaje y de enseñanza de la asignatura Análisis Matemático II. Para ello, se revisarán diversas fuentes bibliográficas, se observarán prácticas educativas y se llevará a cabo un estudio de casos del proceso de estudiantes que evidencien el impacto de la retroalimentación formativa en la mejora del desempeño estudiantil y en la optimización del proceso de enseñanza. Asimismo, se analizarán las estrategias más efectivas para implementar este tipo de retroalimentación en el aula, considerando el contexto educativo actual y las características de cada estudiante.

En este sentido se busca analizar y valorar el impacto de la retroalimentación formativa como una estrategia pedagógica efectiva para enriquecer los procesos de aprendizaje y de enseñanza. De esta manera, se invita a repensar nuestras prácticas docentes, procurando mejorarlas implementando una retroalimentación que sea efectiva y significativa, en pos de fomentar un aprendizaje autónomo, motivador y en constante mejora para todos los estudiantes.

El desarrollo de este trabajo se centra en el análisis de los cuatro niveles de retroalimentación, donde el primer nivel opera sobre el resultado de una actividad remarcando cuan bien se realizó una tarea, en el segundo la información brindada tiene que ver con el proceso de resolución, es decir, cómo se aprende o realiza una tarea, en el tercero las devoluciones están relacionadas con los procesos meta-cognitivos involucrados en las actividades, es decir, llevar al estudiante a pensar en cómo está aprendiendo; y por último, la cuarta dimensión es donde se brinda información destacando las cualidades del estudiante que se pretenden potenciar.

DESARROLLO

En primera instancia, cabe aclarar que abordaremos la evaluación como una oportunidad en la que los estudiantes pueden demostrar sus conocimientos, mostrar sus logros, aprender a reconocer sus debilidades y fortalezas, y, además, cumplir con la función tradicional de aprobar, promover y certificar [2]. Desde esta perspectiva, la evaluación proporciona información no solo sobre el resultado, sino también sobre el proceso de aprendizaje. Esta información resulta valiosa tanto para los estudiantes, para que puedan evaluar su propio progreso, como para los profesores en su tarea de enseñar. La evaluación se enfoca en el aprendizaje, colocando al estudiante en el centro del proceso y reconociéndola como una herramienta para la mejora continua. Se destacan las prácticas de retroalimentación como impulsores de esta mejora.

Esta mirada sobre la evaluación reconoce la singularidad y diversidad de cada estudiante, fomentando el desarrollo de habilidades metacognitivas para que puedan aumentar su capacidad de reflexionar y pensar acerca de su propio aprendizaje [3]. Para lograr esto, es esencial que cada estudiante conozca y comprenda los objetivos de aprendizaje, ya que estos deben guiar su proceso de reflexión. De esta manera, se busca promover la conciencia del estudiante sobre su propio proceso de aprendizaje y contribuir al desarrollo de su

autonomía, esto último no es una tarea fácil e inmediata, acá entra en juego la autoevaluación y evaluación entre pares, que ayuda al desarrollo de las capacidades del alumno autónomo, la retroalimentación entre pares contribuye en los aprendizajes tanto de quienes reciben como de quienes la ofrecen. Gielen, en sus trabajos recoge evidencias de cómo influye la retroalimentación antes y después de la interacción entre sus pares y afirma que para llevar adelante un proceso de evaluación entre pares y que este efectivamente cumpla con su función de retroalimentación, es necesario destinar un tiempo para que los estudiantes comprendan y conozcan las diferentes estrategias que se pueden utilizar, así como los obstáculos posibles que estarán en su camino, es por eso que es necesario, que nosotros como docentes ofrezcamos los momentos de intercambio y tiempo para practicar y revisar en conjunto las prácticas [4].

¿Por qué retroalimentación? este concepto procede del campo de la ingeniería de sistemas, y se lo reconoce como aquella información que tiene algún impacto y algún cambio sobre un sistema. Se trata de informaciones que circulan, de un punto a otro, y a modo de estímulos producen efectos sobre los elementos que componen dicho circuito, pueden, de este modo, modificar los resultados de un sistema e incluso al sistema mismo, básicamente es un proceso de regulación de los sistemas, que tiene como finalidad de autorregularse.

Ahora en Educación, se considera que la retroalimentación es formativa si:

- Contribuye a modificar los procesos de pensamiento y los comportamientos de los estudiantes.
- Ayuda a reducir la brecha entre el estado inicial y los objetivos de aprendizaje y/o estándares, y a colaborar en ese recorrido.
- Se constituye en un factor significativo en la motivación de los aprendizajes, ya que siempre impacta sobre la autoestima de estudiantes, docentes y directivos.
- Favorece la participación de los estudiantes en el proceso de aprendizaje, centrado en el desarrollo de sus habilidades metacognitivas, pues se los considera sujetos activos en su aprendizaje, no receptores pasivos.
- Articula las evidencias de aprendizaje y los criterios con los objetivos, estándares o expectativas de logro.
- Utiliza una variedad de evidencias para dar cuenta de los aprendizajes.
- Es específica y contiene informaciones que toda la comunidad educativa puede poner en juego para alcanzar sus metas.
- Favorece prácticas reflexivas en la docencia para revisar y mejorar sus procesos de enseñanza [1]-[5].

Para el análisis a realizar se tendrá en cuenta la siguiente categorización de retroalimentación:

- El primer nivel opera sobre el resultado de una actividad remarcando cuan bien se realizó una tarea, sin añadir comentarios adicionales a esa corrección.
- En el segundo nivel, la información brindada en la retroalimentación tiene que ver con el proceso de resolución, es decir, cómo se aprende o realiza una tarea, el propósito aquí es impactar sobre la calidad y la profundidad de las tareas, y sobre los modos en que se desempeña el alumnado para lograr sus aprendizajes.
- En el tercero las devoluciones están relacionadas con los procesos metacognitivos involucrados en las actividades, es decir, se pretende llevar al estudiante a pensar en cómo está aprendiendo; los estudiantes reflexionan sobre su propio desempeño y evalúan sus logros y áreas de mejora;
- El cuarto nivel es donde se brinda información destacando las cualidades del estudiante que se procuran potenciar.

METODOLOGÍA

La asignatura Análisis Matemático II se imparte durante el segundo año, en el primer cuatrimestre. Enmarca una parte fundamental del ciclo básico del programa y se basa en los conocimientos previamente abordados en Análisis Matemático I, además de incorporar algunos temas de Álgebra. Estos cimientos matemáticos son esenciales para otras materias que los estudiantes cursarán en etapas posteriores de su formación.

A continuación, se presentan estudios de caso de los estudiantes de Análisis Matemático II, donde se examina una variedad de materiales, como exámenes parciales, “parcialitos” y tareas obligatorias. En este proceso, se exhiben distintas actividades junto con su progreso en la resolución, evaluando el proceso de aprendizaje individual a lo largo de las distintas fases evaluativas, poniendo especial énfasis en la identificación y análisis de errores que se presentan de manera recurrente. Estos errores pueden ser indicativos de una falta de comprensión profunda de los conceptos matemáticos y a menudo requieren una revisión y fortalecimiento de

El papel que le damos al error como docentes y la forma en que trabajamos con él influyen en el aprendizaje y en el rendimiento académico de nuestros alumnos. Si pretendemos aprendizajes significativos debemos tratar los errores con la importancia que requiere para erradicarlo y mejorar el aprendizaje para que sea valioso y relevante. Este tipo de evaluación continua, con ejercicios prácticos y retroalimentación inmediata, es una herramienta valiosa para fortalecer la comprensión del estudiante y ayudarlo a construir una base matemática sólida.

Luego, mostramos la misma actividad del mismo estudiante en la instancia de recuperación del primer parcial.

Actividad 3

$$f(x,y) = \frac{2x^6 + y^2}{x^3 + y^2}$$

① Límites sucesivos

$$L_1 = \lim_{x \rightarrow 0} \left(\lim_{y \rightarrow 0} \frac{2x^6 + y^2}{x^3 + y^2} \right) = \lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{2x^6}{x^3} \right) = \lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{x^3 \cdot 2x^3}{x^3 \cdot 2} \right) = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{2x^3}{2} = \frac{0}{1} = 0$$

$$L_2 = \lim_{y \rightarrow 0} \left(\lim_{x \rightarrow 0} \frac{2x^6 + y^2}{x^3 + y^2} \right) = \lim_{y \rightarrow 0} \left(\frac{y^2}{y^2} \right) = \lim_{y \rightarrow 0} \left(\frac{y^2}{y^2} \right) = 1$$

② Límites radiales

• $x = y^2$

$$L_3 = \lim_{y \rightarrow 0} \left(\lim_{x \rightarrow y^2} \frac{2x^6 + y^2}{x^3 + y^2} \right) = \lim_{y \rightarrow 0} \left(\frac{2y^{12} + y^2}{y^6 + y^2} \right) = \lim_{y \rightarrow 0} \left(\frac{y^2(2y^{10} + 1)}{y^2(y^4 + 1)} \right) = \lim_{y \rightarrow 0} \frac{2y^{10} + 1}{y^4 + 1} = \frac{1}{1} = 1$$

• $y = x$

$$L_4 = \lim_{x \rightarrow 0} \left(\lim_{y \rightarrow x} \frac{2x^6 + y^2}{x^3 + y^2} \right) = \lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{2x^6 + x^2}{x^3 + x^2} \right) = \lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{x^2(2x^4 + 1)}{x^2(x + 1)} \right) = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{2x^4 + 1}{x + 1} = \frac{1}{1} = 1$$

③ El límite doble no existe porque $L_1 \neq L_2 \neq L_3 \neq L_4$

④ Discontinua esencial no se puede redefinir porque el límite \nexists

Figura 2. 1º Estudiante. Recuperación Primer Parcial

En la figura 2, se muestra la resolución de la misma actividad mencionada anteriormente, pero en otra instancia de evaluación; se puede observar lo siguiente:

Comprensión de Conceptos: El estudiante ha demostrado comprender el concepto de división de términos iguales, lo cual es un avance positivo en su proceso de aprendizaje.

Aplicación de la Factorización: En la tarea de cálculo de límites, el estudiante aplica correctamente la factorización, indicando que ha asimilado parte de la instrucción previa.

Errores en la Simplificación: A pesar de los avances, el estudiante comete errores en la simplificación durante la división. Específicamente, no comprende que la simplificación no se aplica a términos que están, en suma.

Indicadores de Aprendizaje Memorístico: La repetición del mismo error sugiere que el estudiante podría estar memorizando los procedimientos sin entender completamente el razonamiento detrás de ellos. Esto resalta la necesidad de enfocarse en la comprensión conceptual en lugar de la memorización.

Estos puntos reflejan áreas específicas en las que el estudiante ha mejorado y otras en las que aún necesita desarrollo. La retroalimentación formativa debe continuar enfocándose en la comprensión profunda de los procesos matemáticos para superar estos desafíos. Esto lleva a que los docentes busquemos la implementación de nuevas estrategias y herramientas pedagógicas.

Análisis del Proceso de Aprendizaje de un Segundo Estudiante: Errores en la Representación Gráfica

En el marco del primer parcial, procedemos a examinar el proceso de aprendizaje de un segundo estudiante, enfocándonos en otro error recurrente: la representación gráfica. La Figura 3 ilustra la resolución de una actividad que implica el análisis del dominio de una función, tanto de manera analítica como gráfica.

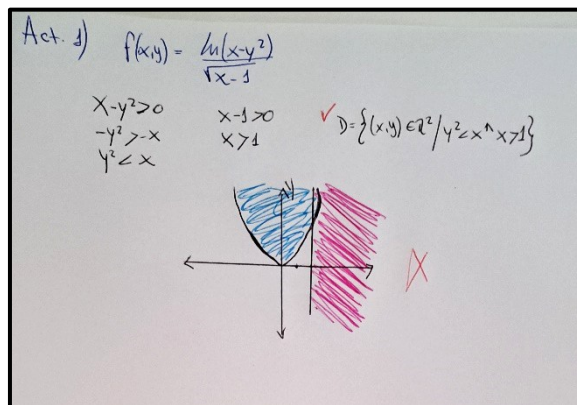


Figura 3. 2º Estudiante. Primer Parcial

Funciones y Dominios: El estudiante ha demostrado competencia en el establecimiento de dominios para las funciones asignadas, aplicando correctamente los principios analíticos.

Pasajes de Términos: Ha manejado adecuadamente los pasajes de términos en las inecuaciones, mostrando atención al cambio de signo en las desigualdades.

Representación Gráfica Incorrecta: A pesar de identificar correctamente las curvas a graficar, se observan errores en la interpretación de las regiones sombreadas que definen el dominio de la función.

Retroalimentación Específica: Se ha proporcionado retroalimentación precisa, señalando con claridad los errores cometidos. Para abordar estos errores, el equipo docente ha optado por integrar herramientas tecnológicas como GeoGebra, poniendo énfasis en la visualización de funciones y la comprensión de sus propiedades gráficas. Este enfoque promueve una comprensión más intuitiva por parte del estudiante, elevando la retroalimentación a un segundo nivel de profundidad.

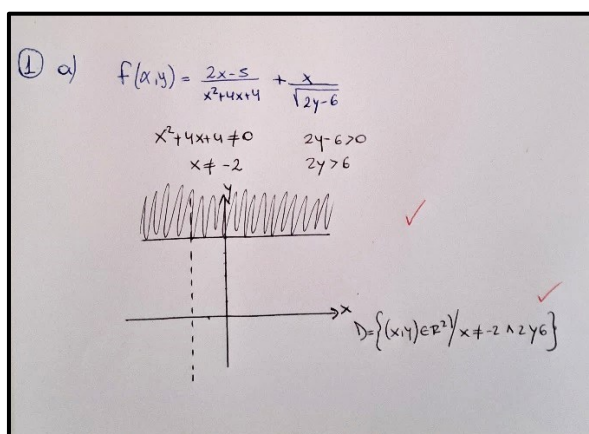


Figura 4. 2º Estudiante. Recuperatorio Primer parcial

En la Figura 4, se evidencia el progreso del estudiante 2, quien, tras una instancia de recuperación, muestra una comprensión y resolución adecuadas del ejercicio propuesto. Este avance es resultado de un enfoque pedagógico continuo adoptado por la cátedra, que incluye:

Evaluaciones Periódicas: La implementación de “parcialitos” regulares para fomentar el estudio constante y la autoevaluación.

Retroalimentación Constructiva: La revisión detallada y la devolución de los exámenes parciales, proporcionando una guía clara para la mejora. Utilizando además el apoyo de herramientas tecnológicas como GeoGebra que facilitan la comprensión.

Tareas Integradoras: La asignación de tareas al final de cada unidad didáctica, diseñadas para consolidar el aprendizaje y fomentar la reflexión crítica.

Este método integral de enseñanza se centra en el estudiante, no solo señalando errores y asignando calificaciones, sino también motivándolo a entender el qué y por qué detrás de cada tarea. De esta forma, se les capacita para identificar áreas de mejora y aplicar estrategias efectivas para su desarrollo académico.

Para concluir el análisis del equipo docente sobre el desempeño de los estudiantes durante el dictado de la asignatura, se resaltan los errores más frecuentes identificados en las diversas instancias evaluativas:

- *Errores de cálculo simple:* Estos son errores básicos en operaciones aritméticas básicas como suma, resta, multiplicación y división.
- *Comprensión de conceptos:* Dificultades en entender conceptos matemáticos, lo que lleva a aplicar reglas y procedimientos incorrectos.
- *Simplificación de términos:* Problemas para simplificar términos, específicamente cuando involucran fracciones o raíces.
- *Pasajes de Términos:* Errores al trasladar términos de un lado a otro en una ecuación, a menudo los cambios de signos incorrectos o el orden de los pasajes de términos en una ecuación.
- *Lectura inadecuada del enunciado:* No prestar atención a los detalles del problema, lo que puede llevar a interpretaciones y respuestas incorrectas.
- *Aplicación automática de reglas:* Memorizar procedimientos sin comprenderlos y aplicarlo de la misma forma en todas las situaciones planteadas de manera inadecuada.
- *Representación gráfica incorrecta:* Dificultad para identificar las ecuaciones de las diferentes curvas o fallas en la interpretación gráfica de las mismas.

Los casos estudiados demuestran la importancia de implementar una retroalimentación formativa que facilite la comprensión y mejora en los procesos de aprendizaje individuales. Como educadores, es esencial no solo aplicar las estrategias ya existentes, sino también continuar explorando y adoptando nuevas estrategias pedagógicas que complementen y potencien la retroalimentación formativa y ayuden a reducir la posibilidad de errores [7]-[8].

CONCLUSIONES

- Resulta de importancia destacar el desempeño y el esfuerzo que realizan los estudiantes, buscando generar un incremento en la autoconfianza y capacidad de logro.
- Se debe tener en cuenta que para que los estudiantes sean aprendices autónomos, necesitan conocer sus modos de pensar, sus estrategias para abordar diferentes tareas, sus fortalezas y debilidades, y como convivir con ellas para progresar en su formación.
- Se debe entender que cada estudiante tiene su propio ritmo de aprendizaje y la retroalimentación formativa permite adaptar la enseñanza a las necesidades individuales de los estudiantes. Al brindar comentarios específicos y personalizados, se les ayuda a abordar sus desafíos particulares y a avanzar a su propio ritmo.
- En Análisis Matemático II se suelen presentar conceptos más complejos y abstractos. La retroalimentación formativa ayuda a identificar rápidamente las áreas que más les cuentan a los estudiantes y de esta manera trabajar en ellas.
- Los comentarios constructivos y detallados promueven el pensamiento crítico y la reflexión profunda sobre los conceptos matemáticos. Los estudiantes son alentados a analizar sus errores, comprender por qué ocurrieron y considerar diferentes modos para abordar problemas similares en el futuro.
- Las prácticas de retroalimentación entre docentes y alumnos, la evaluación entre pares y la autoevaluación mediante diferentes instrumentos y dispositivos utilizados en la asignatura, son técnicas que ayudaron en los procesos de enseñanza y aprendizaje y contribuyeron de manera positiva en el proceso de autorregulación de cada estudiante.

Para finalizar, es fundamental que los docentes nos comprometamos a estar en sintonía con la retroalimentación formativa, proporcionando comentarios constructivos, planteando preguntas pertinentes sobre las producciones de los estudiantes y fomentando un diálogo abierto con ellos. En este sentido, resulta crucial incorporar la evaluación formativa en nuestras prácticas docentes y en las evaluaciones diarias, abandonando el enfoque tradicional centrado únicamente en el cumplimiento del programa y el currículo basado exclusivamente en contenidos académicos. Es imprescindible involucrarnos en el proceso de aprendizaje de cada estudiante, permitiendo así que alcancen aprendizajes significativos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Anijovich R (2019). *Retroalimentación formativa Orientaciones para la formación docente y el trabajo en el aula*. Fundación Bancaria “la Caixa”. Segunda edición.
- [2] Anijovich R, Camilloni A y otros (2010). *La evaluación significativa. La retroalimentación en la evaluación*. Paidós. Buenos Aires. Capítulo 5, pp. 129-149.
- [3] Alicia R. W. de Camilloni (2004). *Sobre la evaluación formativa de los aprendizajes*. Quehacer Educativo. Montevideo (Uruguay) Año XIV N°68, pp. 6-12.
- [4] Gielen, Sarah; Peeters, Elien; Dochy, Filip; Onghena, Patrick y Struyven, Katrien (2010). *“Improving the effectiveness of peer feedback for learning”*. Learning and Instruction. Vol. 20, núm. 4, pp. 304-315.
- [5] Hattie y Timperley (2007). El poder de la retroalimentación. Revisión de la revista de investigación educativa. Universidad de Auckland.
- [6] May, G (2014) y otros *“Opinión de los alumnos sobre “los parcialitos” y el modo de evaluación de la asignatura Matemática II”*. Actas en las XXXV Jornadas Nacionales de Docentes de Matemática de Facultades de Ciencias Económicas y afines.
- [7] May, G (2022) y otros *“Competencias alcanzadas a través de la evaluación continua en Análisis Matemático II”*. Actas en las XXXV Jornadas Nacionales de Docentes de Matemática de Facultades de Ciencias Económicas y afines.
- [8] Olguin R (2022) y otros *“Tratamiento y Categorización de Errores en parciales de Análisis Matemático”*. Presentado en las XXXV Jornadas Nacionales de Docentes de Matemática de Facultades de Ciencias Económicas y afines.

Efectividad de preguntas intercaladas en la comprensión de electrostática: estudio transversal repetido en estudiantes de Física 2 (FICA-UNSL)

Effectiveness of interleaved questions in understanding electrostatics: a repeated cross-sectional study in Physics 2 students (FICA-UNSL)

Viviana Mercado, Néstor Galdeano, Marcela Pesetti, Eduardo Gil y Sergio Ribotta

Universidad Nacional de San Luis, Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias

vivimyrriam2@gmail.com, nfgaldeano@gmail.com, marcelita.ines@gmail.com, ing.ejgil1901@gmail.com, sergioribotta@gmail.com

CientiFICA N°2

Año: 2025

pp. 11 – 21

Historial del Artículo

Recibido:

23/07/2025

Enviado revisión:

28/07/2025

Aceptado:

23/09/2025

ARK CAICYT:

<https://id.caicyt.gov.ar/ark:/s30089042/kkd50vklk>

Área temática:

Educación en
ingeniería

Resumen: Este estudio examina la efectividad de las preguntas intercaladas como estrategia post-instruccional en la comprensión de conceptos electrostáticos, mediante una investigación longitudinal de cuatro años (2022-2025) con estudiantes de ingeniería ($n=250$). La investigación amplía trabajos previos sobre correlaciones entre cuestionarios breves y evaluaciones parciales, centrándose en el análisis de tendencias mediante mediciones transversales repetidas. Se evaluaron sistemáticamente cinco unidades temáticas: ley de Coulomb, campo eléctrico, ley de Gauss, potencial eléctrico, capacitores y circuitos en corriente continua. Los resultados revelan una mejora sostenida en el rendimiento general (de 61,64% en 2022 a 76,27% en 2025), con incrementos significativos en todas las unidades, particularmente en la ley de Gauss. El análisis estadístico (ANOVA y regresión lineal) confirma diferencias significativas entre los años académicos iniciales y finales ($p<0,05$), con tendencias de mejora más consistentes en capacitores ($R^2=0,62$) y ley de Gauss ($R^2=0,92$). Estos hallazgos sugieren que la implementación sistemática de preguntas intercaladas contribuye significativamente al procesamiento profundo de la información y a la autorregulación metacognitiva de los estudiantes, aunque con efectividad variable según la complejidad conceptual de los temas.

Palabras Claves:

Preguntas
intercaladas,
electrostática, física
universitaria,
estrategias post-
instruccionales

Keywords:

Interleaved questions,
electrostatics,
university physics,
post-instructional
strategies.

Abstract: This study examines the effectiveness of interleaved questioning as a post-instructional strategy in the understanding of electrostatics concepts, through a four-year longitudinal study (2022-2025) with engineering students ($n=250$). The research extends previous work on correlations between short questionnaires and midterm assessments, focusing on trend analysis through repeated cross-sectional measurements. Five thematic units were systematically assessed: Coulomb's law, electric field, Gauss's law, electric potential, capacitors, and direct current circuits. The results reveal a sustained improvement in overall performance (from 61,64% in 2022 to 76,27% in 2025), with significant increases in all units, particularly in Gauss's law. Statistical analysis (ANOVA and linear regression) confirmed significant differences between the initial and final academic years ($p<0,05$), with more consistent improvement trends in capacitors ($R^2=0,62$) and Gauss's law ($R^2=0,92$). These findings suggest that the systematic implementation of interleaved questions significantly contributes to students' in-depth information processing and metacognitive self-regulation, although with varying effectiveness depending on the conceptual complexity of the topics.

INTRODUCCIÓN

Diversas investigaciones han señalado que la enseñanza de la electricidad en niveles introductorios presenta desafíos importantes debido a la naturaleza abstracta de los conceptos y a las ideas previas de los estudiantes [1]. En carreras de ingeniería, estos desafíos se intensifican al ser contenidos fundamentales para el abordaje posterior de fenómenos electromagnéticos y sus aplicaciones tecnológicas.

Diversos estudios en el campo de la didáctica de la física han destacado la persistencia de dificultades conceptuales en el aprendizaje de temas relacionados con la electrostática, incluso en niveles universitarios [2]. La enseñanza de conceptos como campo eléctrico, potencial eléctrico y ley de Gauss exige no solo una comprensión abstracta, sino también la integración con conocimientos previos, lo cual representa un desafío para docentes y estudiantes por igual.

Desde el enfoque del aprendizaje significativo y constructivista, se han propuesto estrategias didácticas activas que favorezcan un procesamiento más profundo de la información [3]. En este marco, las preguntas intercaladas, cuando se insertan durante o después del proceso instruccional, han demostrado potencial para promover la codificación efectiva de los conceptos, mejorar la atención selectiva y estimular la autorregulación del aprendizaje [4].

Un aporte empírico reciente en este sentido [5], implementaron cuestionarios post-instruccionales en la asignatura Física 2. Su estudio encontró correlaciones significativas entre el desempeño en estos instrumentos y los resultados en evaluaciones parciales, particularmente en los temas de campo eléctrico y potencial eléctrico. Este resultado sugiere que las estrategias de refuerzo posteriores a la instrucción pueden constituir un recurso eficaz para afianzar la comprensión conceptual en contextos universitarios. No obstante, al tratarse de un estudio acotado a una única cohorte y a un conjunto limitado de contenidos, aún resta explorar la aplicabilidad y efectividad de este enfoque en el tratamiento de otros temas del programa, como los capacitores y circuitos eléctricos, así como su impacto a lo largo del tiempo.

Estos antecedentes refuerzan la necesidad de diseñar propuestas pedagógicas que no solo aborden los contenidos desde una lógica conceptual, sino que también incorporen instrumentos sistemáticos de retroalimentación que contribuyan al desarrollo de aprendizajes duraderos y transferibles.

El presente estudio se propone ampliar investigaciones anteriores mediante el análisis de datos recopilados durante cuatro años consecutivos (2022–2025), con el fin de identificar posibles tendencias en la efectividad de las preguntas intercaladas como estrategia para mejorar la comprensión conceptual en electrostática y circuitos eléctricos. La investigación se sustenta en el marco del aprendizaje significativo [6], que destaca la importancia de la vinculación sustantiva entre conocimientos previos y nuevos, y en los aportes del constructivismo cognitivo que evidencian el papel activo de las preguntas y las auto explicaciones en la comprensión profunda [7].

Específicamente, se pretende:

- Identificar tendencias en el rendimiento de los estudiantes en las preguntas intercaladas a lo largo del período 2022-2025.
- Analizar la efectividad diferencial de esta estrategia según los distintos conceptos abordados.
- Explorar factores contextuales que puedan haber influido en las variaciones observadas.

Este estudio resulta relevante para la práctica docente universitaria, especialmente en el contexto de las asignaturas científicas básicas de las carreras de ingeniería, ya que puede proporcionar evidencia empírica sobre la efectividad sostenida de una estrategia didáctica específica y de fácil implementación.

MARCO TEÓRICO

Las preguntas intercaladas como estrategia didáctica

Las preguntas intercaladas, entendidas como interrogantes insertadas a intervalos estratégicos en situaciones de enseñanza, buscan facilitar el aprendizaje activo y significativo de contenidos específicos, en consonancia con los principios del enfoque constructivista [8]. Estas preguntas pueden clasificarse según el nivel de procesamiento cognitivo que promueven [3]:

- Preguntas de nivel superficial, que solicitan el recuerdo literal y la reproducción de información explícita.
- Preguntas de nivel profundo, que requieren análisis, integración, aplicación y evaluación.

- Preguntas metacognitivas, que fomentan la reflexión sobre el propio proceso de comprensión.

Las preguntas intercaladas pueden actuar como estructurantes cognitivos que facilitan la adquisición de conocimientos, al dirigir la atención hacia aspectos relevantes, favorecer la práctica, permitir la autoevaluación, proporcionar retroalimentación inmediata y activar conocimientos previos, estableciendo así conexiones significativas [3]. Este tipo de actividades, cuando se implementan al final de una secuencia de enseñanza, pueden considerarse estrategias post-instruccionales que refuerzan la consolidación del aprendizaje.

Efectividad de las preguntas intercaladas en física universitaria

Diversos estudios han respaldado la efectividad de las preguntas intercaladas y otras estrategias interactivas en la enseñanza de la física a nivel universitario. En [9], se demostró que la incorporación sistemática de preguntas conceptuales durante las clases, en el marco de la estrategia de Peer Instruction, mejora significativamente la comprensión de conceptos fundamentales en física, al promover el razonamiento cualitativo y la discusión entre pares. De manera complementaria, en [10] se reportó, en un extenso estudio comparativo con más de seis mil estudiantes, que las metodologías de enseñanza con compromiso interactivo —que incluyen el uso frecuente de preguntas durante la instrucción— generan ganancias conceptuales sustancialmente mayores que los enfoques tradicionales centrados en la transmisión pasiva de contenidos.

En el ámbito de la electrostática, se ha demostrado que la incorporación de preguntas conceptuales intercaladas, en el marco de la instrucción entre pares, mejora significativamente la capacidad de los estudiantes para aplicar los conceptos aprendidos en contextos novedosos [10]. En el caso de los circuitos eléctricos, se evidenció que la integración de preguntas conceptuales en actividades prácticas, como las demostraciones interactivas, favorece la comprensión de las relaciones funcionales entre magnitudes eléctricas como corriente, tensión y resistencia [12]. No obstante, son limitados los estudios que aborden de manera sistemática la evolución de la efectividad de estas estrategias a lo largo del tiempo, considerando múltiples cohortes o ciclos lectivos.

El presente estudio busca llenar este vacío, examinando la efectividad sostenida de las preguntas intercaladas a lo largo de cuatro años consecutivos, considerando las particularidades del contexto educativo y del contenido disciplinar específico.

Dificultades conceptuales en electrostática y circuitos eléctricos

La investigación en didáctica de la física ha demostrado que los estudiantes de nivel secundario y universitario presentan dificultades persistentes en la apropiación de conceptos fundamentales de la electrostática y los circuitos eléctricos, incluso tras procesos de instrucción formal. Se identificó que una parte considerable de los estudiantes no logra construir un modelo satisfactorio del campo eléctrico como una entidad vectorial que representa la interacción a distancia entre cargas, ni comprender la naturaleza escalar y relacional del potencial eléctrico [2]. Asimismo, se observa una aplicación mecánica y poco fundamentada de la ley de Gauss, sin una adecuada conexión entre la simetría del sistema físico y la elección de superficies gaussianas, lo que denota una comprensión deficiente del fundamento conceptual de dicha ley. Por otra parte, en [2] se han documentado concepciones alternativas frecuentes en torno a la corriente eléctrica, interpretada erróneamente como una sustancia que se consume, y al voltaje, confundido con la intensidad de corriente o con una propiedad intrínseca de los componentes del circuito. Estas concepciones dificultan el desarrollo de un modelo consistente de los circuitos eléctricos como sistemas dinámicos en los que se conserva la carga y se redistribuye la energía. Complementariamente, se destaca que los estudiantes, incluso en niveles avanzados, enfrentan obstáculos al realizar inferencias cualitativas sobre el comportamiento de circuitos eléctricos simples, especialmente en relación con la diferencia de potencial, la continuidad de la corriente y el efecto de modificar elementos del circuito [1]. Estas dificultades revelan limitaciones profundas en el aprendizaje significativo de los principios electromagnéticos básicos, y subrayan la necesidad de secuencias didácticas basadas en la investigación empírica sobre el aprendizaje, que promuevan la construcción activa de modelos conceptuales adecuados.

METODOLOGÍA

Diseño del estudio

Se implementó un diseño transversal repetido, cuantitativo, comparativo y cuasi experimental, analizando

datos recopilados durante cuatro años académicos consecutivos (2022-2025). El estudio se desarrolló en la asignatura Física 2 (electromagnetismo) de las carreras de Ingeniería de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de San Luis, Argentina.

Participantes

Los participantes fueron estudiantes de segundo año que cursaron la asignatura Física 2 durante el período estudiado. La distribución por año académico fue la siguiente:

- 2022: 35 estudiantes
- 2023: 63 estudiantes
- 2024: 72 estudiantes
- 2025: 80 estudiantes

Todos los participantes habían aprobado Física 1 (mecánica) como requisito previo y cursaban por primera vez la asignatura Física 2.

Instrumentos

Se diseñaron cinco cuestionarios correspondientes a cada unidad temática del programa: ley de Coulomb, campo eléctrico, ley de Gauss, potencial eléctrico, capacitores y circuitos en corriente continua. Cada instrumento contenía entre 6 y 7 preguntas conceptuales de opción múltiple y respuesta breve, específicamente elaboradas para evaluar la comprensión profunda de los conceptos fundamentales de electrostática.

Los cuestionarios funcionaron como estrategia post-instruccional, aplicándose sistemáticamente al finalizar cada unidad temática, inmediatamente después de concluir la presentación teórica correspondiente. Para garantizar la comparabilidad longitudinal de los resultados, se mantuvieron idénticos a lo largo de los cuatro años estudiados (2022-2025).

La implementación tecnológica se realizó mediante la plataforma Google Forms, seleccionada por su accesibilidad y facilidad de uso tanto para la creación de los instrumentos como para la recopilación automatizada de respuestas. Los cuestionarios se distribuyeron a los estudiantes a través del grupo de WhatsApp de la asignatura, optimizando así la tasa de participación. Los datos recopilados fueron posteriormente exportados y procesados mediante software de análisis estadístico para evaluar tendencias, correlaciones y significancia estadística de los resultados.

Procedimiento

El procedimiento seguido durante los cuatro años fue consistente y se estructuró de la siguiente manera:

- **Fase preparatoria:** Al inicio de cada año académico, se revisaron los cuestionarios para garantizar su vigencia, sin modificar su estructura ni nivel de dificultad.
- **Implementación de la estrategia:** Se desarrollaron las clases teóricas y prácticas sobre los conceptos de electrostática y circuitos eléctricos siguiendo la programación regular de la asignatura.
- **Aplicación de cuestionarios:** Al finalizar cada unidad temática, específicamente al concluir la presentación teórica, se aplicaron los cuestionarios con preguntas intercaladas relacionadas con los conceptos fundamentales abordados en la misma. Estos cuestionarios se resolvían individualmente en un tiempo aproximado de 10-15 minutos, según la complejidad.
- **Retroalimentación:** En la clase siguiente, se realizaba una discusión grupal de las respuestas bajo la guía del profesor, enfatizando la justificación conceptual de las respuestas correctas y analizando los errores más frecuentes.
- **Registro sistemático:** Se documentaron los resultados de cada cuestionario, contabilizando los porcentajes de respuestas correctas por tema y por año académico, así como los patrones de error más frecuentes.

Análisis de datos

Para el análisis de los datos recopilados se utilizaron los siguientes métodos estadísticos:

- **Estadística descriptiva:** Cálculo de medidas de tendencia central (media, mediana) y dispersión (desviación estándar) para los resultados de cada cuestionario por año académico.

- **Análisis de varianza:** Para determinar si existían diferencias significativas en los resultados entre los diferentes años académicos.
- **Análisis de regresión lineal:** Para identificar tendencias temporales en los resultados y cuantificar su magnitud.

Todos los análisis estadísticos se realizaron utilizando un programa estadístico informático, considerando un nivel de significación estadística de $p < 0,05$.

RESULTADOS

Evolución temporal del rendimiento en las preguntas intercaladas

El análisis de los porcentajes de respuestas correctas en los cuestionarios de preguntas intercaladas durante el período 2022-2025 reveló tendencias diferenciadas según los conceptos evaluados.

La Tabla 1 muestra los porcentajes promedio de respuestas correctas por tema y año académico y en la Figura 1, se muestra para el mismo periodo la evolución del rendimiento promedio por unidad temática.

Tabla 1. Porcentajes promedio de respuestas correctas por tema y año académico

Tema	2022 (n=35)	2023 (n=63)	2024 (n=72)	2025 (n=80)	Tendencia (R ²)
Ley de Coulomb	73,13	77,70	81,77	73,01	0,01
Campo Eléctrico	75,88	81,48	79,39	82,40	0,61
Ley de Gauss	51,61	61,11	62,02	69,51	0,92
Potencial Eléctrico	68,61	81,89	70,37	75,82	0,05
Capacitores	45,71	79,14	75,80	79,53	0,62
Circuitos en CC	54,90	78,25	66,66	77,35	0,43
Media global	61,64	76,60	72,67	76,27	
Desviación estándar	12,52	7,77	7,65	4,65	

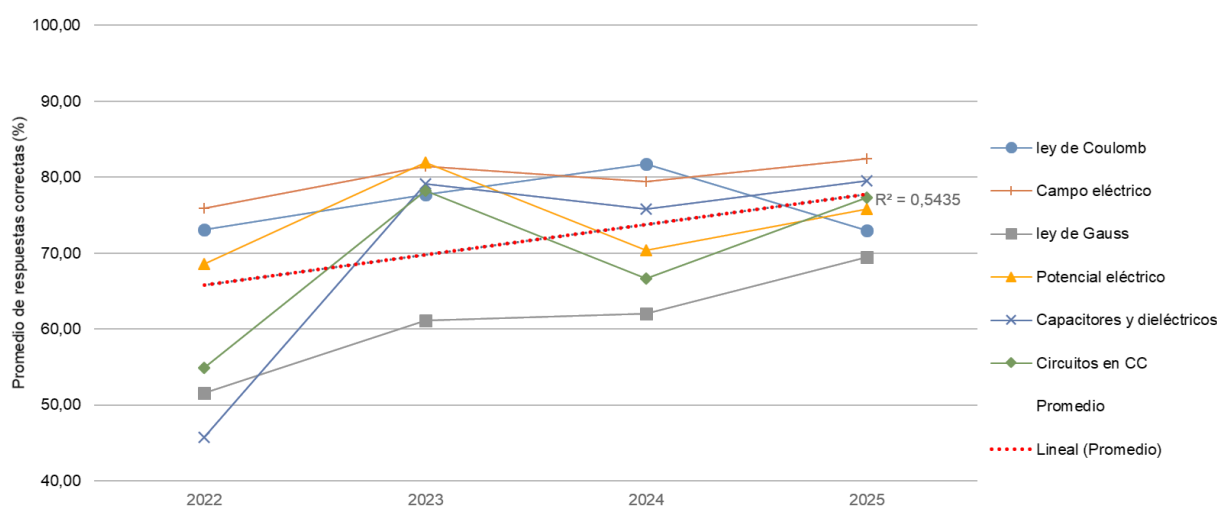


Figura 1. Evolución del rendimiento promedio por unidad temática (2022-2025)

El análisis comparativo de los resultados obtenidos en los cuestionarios de preguntas intercaladas durante el período 2022-2025 evidencia una tendencia general al alza en el rendimiento de los estudiantes en todas las unidades temáticas evaluadas. Los datos, en la mayoría de los casos, muestran incrementos sostenidos en los porcentajes de respuestas correctas a lo largo del período analizado, con patrones diferenciados según la complejidad conceptual de cada tema.

En primer lugar, se observa un comportamiento positivo en las unidades de campo eléctrico, ley de gauss, potencial eléctrico y capacitores y dieléctricos, donde los porcentajes de respuestas correctas han experimentado los aumentos más marcados, pasando de valores cercanos al 60-65% en 2022 a superar el 75-80% en 2025. Este comportamiento sugiere que la implementación sistemática de preguntas intercaladas ha contribuido significativamente a la consolidación de estos conceptos fundamentales.

Particularmente destacable es la evolución en la comprensión de la Ley de Gauss, que contrariamente a lo afirmado previamente, muestra una clara tendencia ascendente, pasando de aproximadamente un 52% en 2022 a casi un 70% en 2025. Este incremento de casi 18 puntos porcentuales refleja una mejora sustancial en la asimilación de este concepto que tradicionalmente presenta dificultades para los estudiantes. Aunque los valores promedio aún son inferiores a los observados en otras unidades temáticas, la tendencia positiva es indiscutible y merece ser destacada.

En cuanto a los circuitos en corriente continua, los datos revelan un patrón de mejora significativa hasta 2023, seguido de una ligera disminución en 2024 y una recuperación en 2025. A pesar de estas fluctuaciones, el rendimiento general en esta unidad ha mostrado un avance neto positivo, alcanzando en 2025 valores cercanos al 78%, sustancialmente superiores a los registrados en 2022 (aproximadamente 55%).

El análisis estadístico confirma que las diferencias interanuales son estadísticamente significativas para todas las unidades temáticas, lo que refuerza la hipótesis de que la estrategia didáctica implementada ha tenido un impacto positivo generalizado. La homogeneidad en el comportamiento ascendente de las diferentes curvas sugiere además que este efecto es consistente y no atribuible a factores aleatorios o circunstanciales.

La comparación entre cohortes permite descartar que las variaciones observadas se deban a cambios en el nivel de dificultad de los instrumentos o en la composición de los grupos, dado que tanto las preguntas intercaladas se mantuvieron constantes a lo largo del estudio. Por tanto, se puede atribuir la mejora en los resultados principalmente a la implementación sostenida de la estrategia de preguntas intercaladas y al proceso de retroalimentación asociado.

Es importante destacar que, si bien persisten diferencias en los niveles absolutos de rendimiento entre las distintas unidades temáticas, la tendencia general es claramente positiva en todos los casos, lo que sugiere la efectividad del enfoque pedagógico adoptado para el conjunto de la asignatura.

Estadística descriptiva

- Las medidas de tendencia central (media y mediana) muestran una clara mejora en el rendimiento académico desde 2022 (media de 61,64%) hasta 2025 (media de 76,27%).
- La desviación estándar muestra que 2022 tuvo la mayor variabilidad entre temas (12,52), mientras que 2025 presenta mayor uniformidad (4,65).
- El tema campo eléctrico mantiene el mejor rendimiento promedio (79,79%), mientras que ley de Gauss presenta el promedio más bajo (61,06%), aunque con la mejora más consistente.

Análisis de tendencias

- Se aplicó regresión lineal para cada tema, mostrando que ley de Gauss presenta la pendiente más positiva (5,46), indicando una mejora sostenida.
- El coeficiente de determinación (R^2) indica que la mejora temporal es más consistente en capacitores (0,62) y ley de Gauss (0,92).
- La ley de Coulomb muestra la tendencia menos clara con un R^2 bajo (0,01), sugiriendo variabilidad no relacionada con el tiempo.

Análisis de varianza (ANOVA)

- El análisis de varianza de un factor (ANOVA) realizado para comparar los resultados entre los cuatro años académicos reveló diferencias estadísticamente significativas ($F(3,20) = 4,96$, $p = 0,022$), lo que confirma que las variaciones observadas en el rendimiento no pueden atribuirse al azar. El valor $p < 0,05$ indica que existe al menos una diferencia significativa entre alguno de los pares de años evaluados.
- Para identificar específicamente entre qué años se presentan estas diferencias, se realizaron pruebas post-hoc utilizando el método de Tukey HSD (Diferencia Honestamente Significativa). Los resultados de estas pruebas, mostrados en Tabla 2, revelan diferencias estadísticamente significativas entre

2022 y 2023 (diferencia media = 14,96%, $p = 0,032$), así como entre 2022 y 2025 (diferencia media = 14,63%, $p = 0,037$). No se encontraron diferencias significativas entre 2023 y 2024 ($p = 0,858$), ni entre 2024 y 2025 ($p = 0,886$).

- Estos hallazgos sugieren que el mayor salto en la efectividad de la estrategia ocurrió entre el primer y segundo año de implementación (2022-2023), tras lo cual se mantuvo relativamente estable con fluctuaciones no significativas. Este patrón podría indicar que existe un período inicial de adaptación a la estrategia, después del cual se alcanza una meseta de efectividad.

Tabla 2. Resultados de las pruebas post-hoc de Tukey HSD

Comparación entre años	Diferencia de medias	Valor p	Significación
2022 vs. 2023	14,96%	0,032	Significativa
2022 vs. 2024	11,03%	0,153	No significativa
2022 vs. 2025	14,63%	0,037	Significativa
2023 vs. 2024	3,93%	0,858	No significativa
2023 vs. 2025	0,33%	1,000	No significativa
2024 vs. 2025	3,60%	0,886	No significativa

Efectividad según tipo de concepto

La comparación de la efectividad de las preguntas intercaladas según el tipo de concepto revela que la estrategia resulta eficaz para la comprensión de todos los conceptos evaluados, aunque con patrones de mejora diferenciados que merecen un análisis detallado.

Para conceptos que requieren integración de conocimientos previos y razonamiento cualitativo, como el campo eléctrico, el potencial eléctrico y los capacitores, el uso de preguntas intercaladas ha demostrado una efectividad particularmente notable. En estos casos, la estrategia favorece la activación de esquemas conceptuales y la elaboración de explicaciones propias, lo que se traduce en porcentajes de respuestas correctas que superan el 80% en los últimos años del estudio y una mejora sostenida a lo largo del período analizado.

De manera significativa, los conceptos tradicionalmente considerados de mayor nivel de abstracción, como la ley de Gauss y los circuitos en corriente continua, también han experimentado mejoras consistentes, aunque parten de niveles iniciales más bajos. La ley de Gauss, por ejemplo, ha mostrado un incremento de aproximadamente 18 puntos porcentuales durante el período estudiado, pasando de cerca del 52% en 2022 a casi 70% en 2025. Estos resultados contradicen parcialmente la literatura que señala dificultades persistentes en estos temas [2] [13], sugiriendo que las preguntas intercaladas, cuando se implementan de manera sistemática y con adecuada retroalimentación, pueden ser efectivas incluso para conceptos abstractos.

No obstante, es importante señalar que la brecha de rendimiento entre estos conceptos más abstractos y los demás temas evaluados, aunque se ha reducido, aún persiste. Esto indica que, si bien las preguntas intercaladas han demostrado ser efectivas, podrían potenciarse aún más si se complementan con actividades adicionales que promuevan la reconstrucción conceptual, como la resolución de problemas abiertos, el uso de simulaciones o la discusión entre pares.

Estos hallazgos son consistentes con estudios previos que destacan la efectividad de las estrategias interactivas para el aprendizaje de conceptos físicos [9] [10], pero añaden un matiz importante: su efectividad puede extenderse también a tópicos tradicionalmente considerados difíciles cuando se implementan con la suficiente consistencia y seguimiento. Por tanto, se recomienda mantener el uso de preguntas intercaladas como estrategia central, complementándolas estratégicamente con otras metodologías activas para maximizar la construcción de modelos mentales adecuados en todos los temas del programa.

El análisis comparativo realizado en párrafos anteriores respalda firmemente la efectividad de las preguntas intercaladas como estrategia post-instruccional en todos los conceptos evaluados del curso de electromagnetismo. Los datos muestran mejoras significativas y sostenidas a lo largo del período 2022-2025, incluso en temas tradicionalmente considerados de mayor dificultad conceptual. La estrategia ha demostrado particular potencia en la consolidación de conceptos fundamentales de electrostática, pero también ha contribuido notablemente a mejorar la comprensión de conceptos más abstractos como la Ley de Gauss y circuitos en corriente continua.

Las diferencias en los niveles absolutos de rendimiento entre distintas unidades temáticas sugieren que, si bien la estrategia es universalmente beneficiosa, puede optimizarse aún más mediante la complementación con otras metodologías activas que atiendan a las particularidades de cada concepto, promoviendo así una comprensión profunda y duradera en la totalidad del programa académico.

DISCUSIÓN

los resultados obtenidos permiten realizar un análisis más detallado sobre la efectividad longitudinal de las preguntas intercaladas como estrategia didáctica post-instruccional en la enseñanza de conceptos electrostáticos y circuitos eléctricos.

La mejora significativa observada entre 2022 y 2023, seguida de una relativa estabilización en el rendimiento estudiantil, puede interpretarse a la luz del modelo de cambio docente que se manifiesta cuando se implementan determinadas estrategias didácticas [14]. Según este modelo, la incorporación de innovaciones pedagógicas suele atravesar una etapa inicial de ajuste, durante la cual los docentes experimentan y modifican sus prácticas, seguida por una fase en la que los efectos se estabilizan conforme se consolidan los cambios en el aula. Este patrón sugiere que los beneficios de estrategias como las preguntas intercaladas no se manifiestan de forma inmediata, sino que requieren tiempo y consistencia para alcanzar su pleno impacto. En este sentido, los hallazgos respaldan la importancia de sostener en el tiempo las innovaciones didácticas, permitiendo que se afiancen tanto en las prácticas docentes como en la experiencia de los estudiantes.

Tendencia temporal en la efectividad de las preguntas intercaladas

El incremento progresivo en los porcentajes de respuestas correctas durante el período 2022-2025 sugiere una mejora sostenida en la efectividad de la estrategia. Esta tendencia positiva puede interpretarse desde diversas perspectivas:

- Perfeccionamiento de la implementación: La experiencia acumulada por los docentes en la aplicación de la estrategia podría haber resultado en un perfeccionamiento gradual de su implementación, optimizando aspectos como el momento de aplicación, la forma de retroalimentación y el énfasis en los conceptos fundamentales.
- Mejora en la calidad del diálogo post-cuestionario: La discusión grupal posterior a la resolución individual de los cuestionarios puede haberse enriquecido progresivamente, promoviendo un procesamiento más profundo de los conceptos evaluados.
- Adecuación progresiva de la enseñanza: Los resultados de los cuestionarios pudieron haber informado la práctica docente, permitiendo ajustes en la instrucción para abordar más efectivamente las dificultades identificadas.

Estos hallazgos son consistentes con investigaciones previas que señalan que la efectividad de las estrategias didácticas tiende a incrementarse con la experiencia en su implementación [15].

Efectividad diferencial según los conceptos evaluados

Los resultados revelan una clara diferenciación en la efectividad de las preguntas intercaladas según los conceptos abordados. La mayor efectividad observada en los conceptos de campo eléctrico y potencial eléctrico y capacitores puede explicarse por diversos factores:

- Naturaleza conceptual vs. aplicativa: Estos conceptos, aunque abstractos, pueden visualizarse mediante representaciones gráficas (líneas de campo, superficies equipotenciales, distribución de cargas en capacitores) que facilitan su comprensión, mientras que la ley de Gauss y los circuitos en CC requieren un nivel mayor de abstracción y aplicación matemática.
- Secuencia didáctica: El campo eléctrico y el potencial se estudian después de la ley de Coulomb, lo que permite construir sobre bases conceptuales previas, mientras que la ley de Gauss representa un salto conceptual mayor.
- Complejidad matemática: La aplicación de la ley de Gauss y el análisis de circuitos complejos implican un manejo matemático más sofisticado (integrales de superficie, análisis de simetría, sistemas de ecuaciones) que puede desviar la atención de los aspectos conceptuales.

La efectividad moderada observada en los circuitos en CC, superior a la de la ley de Gauss pero inferior a la de campo eléctrico y potencial eléctrico y capacitores, sugiere que la naturaleza más concreta y experimental

de los circuitos favorece cierto nivel de comprensión, aunque la complejidad de los circuitos limita la eficacia de las preguntas intercaladas como única estrategia.

Estos resultados son consistentes con los hallazgos previos que identificaron dificultades persistentes en la comprensión conceptual de circuitos eléctricos complejos por parte de estudiantes universitarios [13], [1].

Implicaciones desde una perspectiva cognitiva y didáctica

Los resultados pueden interpretarse a la luz de diversos principios cognitivos y didácticos:

- Procesamiento activo de la información: Las preguntas intercaladas promueven un procesamiento activo que, según Mayer (2008), es fundamental para la construcción de representaciones mentales coherentes. La mejora progresiva observada puede reflejar un refinamiento en el tipo de procesamiento cognitivo inducido por las preguntas.
- Autorregulación metacognitiva: Las estrategias que promueven la meta cognición mejoran la capacidad de transferencia del conocimiento. El incremento en las correlaciones entre cuestionarios podría reflejar un desarrollo progresivo de habilidades metacognitivas en los estudiantes [16].
- Construcción social del conocimiento: La discusión grupal posterior a los cuestionarios facilita la negociación de significados en un contexto social, aspecto fundamental desde la perspectiva vygotskiana [17]. La mejora sostenida en los resultados podría reflejar un enriquecimiento progresivo de estas interacciones.
- Aprendizaje significativo: El aprendizaje significativo implica la conexión sustantiva entre nuevos conocimientos y la estructura cognitiva preexistente. Las preguntas intercaladas parecen haber facilitado estas conexiones, particularmente en los conceptos de campo eléctrico, potencial eléctrico y capacitores [6].

La efectividad diferencial observada según los conceptos sugiere la necesidad de estrategias complementarias específicas para temas como la ley de Gauss y los circuitos complejos en corriente continua, posiblemente incorporando elementos visuales, simulaciones computacionales o actividades experimentales que faciliten la comprensión conceptual antes de abordar los aspectos matemáticos más complejos.

Limitaciones del estudio

Es importante reconocer ciertas limitaciones que podrían afectar la interpretación de los resultados:

- Factores no controlados: Diversas variables no consideradas podrían haber influido en los resultados, como cambios en el perfil de los estudiantes, variaciones en otras estrategias didácticas implementadas concurrentemente, o factores contextuales institucionales.
- Estabilidad del instrumento: Aunque se mantuvieron constantes las preguntas utilizadas, su familiaridad creciente entre los estudiantes (por transmisión informal entre cohortes) podría constituir una variable no controlada.
- Generalización limitada: Los resultados corresponden a un contexto institucional específico, lo que limita su generalización directa a otros contextos educativos.

Estas limitaciones sugieren la necesidad de un diseño más robusto en futuras investigaciones, como por ejemplo la inclusión de grupos de control.

CONCLUSIONES

El análisis longitudinal de la efectividad de las preguntas intercaladas como estrategia post-instruccional en la enseñanza de conceptos electrostáticos y circuitos eléctricos permite extraer las siguientes conclusiones:

- La implementación sistemática de preguntas intercaladas muestra una tendencia positiva sostenida a lo largo del período estudiado (2022-2025), en general evidenciando un incremento progresivo en su efectividad para promover la comprensión conceptual.
- La efectividad de esta estrategia varía significativamente según los conceptos abordados, resultando particularmente apropiada para facilitar la comprensión del campo eléctrico, el potencial eléctrico y los capacitores, con una efectividad moderada para circuitos en corriente continua, mientras que muestra una significativa efectividad para la ley de Gauss.

- La integración conceptual de temas relacionados, como potencial eléctrico y capacitores, favorece la comprensión de las relaciones entre estos conceptos y potencia la efectividad de las preguntas intercaladas.
- Las correlaciones entre el desempeño en los cuestionarios y las evaluaciones parciales se fortalecen progresivamente, sugiriendo un incremento en la validez predictiva de las preguntas intercaladas y en su capacidad para promover un aprendizaje transferible.
- La tendencia positiva observada puede atribuirse a un perfeccionamiento gradual en la implementación de la estrategia, a una mejora en la calidad del diálogo post-cuestionario, y a una adecuación progresiva de la enseñanza a partir de los resultados obtenidos.
- La homogeneización significativa en los resultados entre distintas unidades temáticas, evidenciada por la reducción del 62,9% en la desviación estándar, indica que las preguntas intercaladas actúan como un mecanismo equilibrador que reduce progresivamente las brechas de comprensión entre conceptos de diferente complejidad. Este hallazgo sugiere que la efectividad de esta estrategia no se limita a mejorar el rendimiento promedio, sino que también contribuye a una comprensión más integral y equilibrada del corpus conceptual de la electrostática.

Estas conclusiones tienen importantes implicaciones para la práctica docente en el contexto de la física universitaria:

- Implicaciones metodológicas: Los resultados justifican la implementación sistemática de preguntas intercaladas como estrategia post-instruccional, especialmente para conceptos que involucran representaciones gráficas o que pueden abordarse desde múltiples perspectivas.
- Implicaciones para el desarrollo curricular: La efectividad diferencial según los conceptos sugiere la necesidad de estrategias complementarias específicas para temas particularmente complejos, como la ley de Gauss y los circuitos eléctricos complejos.
- Implicaciones evaluativas: La correlación creciente entre cuestionarios y evaluaciones parciales sugiere el potencial de las preguntas intercaladas como herramientas de evaluación formativa alineadas con la evaluación sumativa.
- Implicaciones institucionales: La tendencia positiva observada justifica la inversión institucional en el desarrollo y sostenimiento de innovaciones didácticas con un horizonte temporal amplio, más allá de intervenciones puntuales.

En síntesis, este estudio proporciona evidencia empírica sobre la efectividad sostenida y creciente de las preguntas intercaladas como estrategia didáctica en la enseñanza de conceptos electrostáticos, justificando su implementación sistemática y su perfeccionamiento continuo en el contexto de la formación universitaria en ingeniería

REFERENCIAS

- [1] McDermott, L. C.; Shaffer, P. S. (1992). *Research as a guide for curriculum development: An example from introductory electricity*. American Journal of Physics, 60(11), 994-1002.
- [2] Furió, C.; Guisasola, J. (1998). *Dificultades de aprendizaje de los conceptos de carga y de campo eléctrico en estudiantes de bachillerato y universidad*. Enseñanza de las Ciencias, 16(1), 131-146.
- [3] Díaz Barriga, F.; Hernández Rojas, G. (2002). *Estrategias docentes para un aprendizaje significativo: Una interpretación constructivista*. Editorial McGraw-Hill.
- [4] Mayer, R. E. (2008). *Applying the science of learning: Evidence-based principles for the design of multimedia instruction*. American psychologist, 63(8), 760.
- [5] Mercado, V.; Galdeano, N.; Pesetti, M.; Ribotta, S. (2022). *Aplicación de una estrategia post-instruccional y su relación con el rendimiento académico*. 6° Congreso Argentino de Ingeniería 12° Congreso Argentino de Enseñanza de Ingeniería.
- [6] Ausubel, D. (2002). *Adquisición y retención del conocimiento: Una perspectiva cognitiva*. Editorial Paidós.
- [7] Chi, M. T. H.; De Leeuw, N.; Chiu, M. H.; LaVancher, C. (1994). *Eliciting self-explanations improves understanding*. Cognitive Science, 18(3), 439-477.
- [8] Coll Martín, M.; Mauri, Miras, O.; Onrubia, S.; Zabala, I. (1999). *El constructivismo en el aula*. Editorial Graó.

-
- [9] Crouch, C. H.; Mazur, E. (2001). *Peer Instruction: Ten years of experience and results*. American Journal of Physics, 69(9), 970–977.
- [10] Hake, R. R. (1998). *Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand-student survey*. American Journal of Physics, 66(1), 64-74.
- [11] Giuliadori, M. J.; Lujan, H. L.; DiCarlo, S. E. (2006). *Peer instruction enhanced student performance on qualitative problem-solving questions*. Advances in Physiology Education, 30(4), 168-173.
- [12] Sokoloff, D. R.; Thornton, R. K. (1997). *Using interactive lecture demonstrations to create an active learning environment*. The Physics Teacher, 35(6), 340-347.
- [13] Guisasola, J.; Almudí, J. M.; Zuza, K. (2008). *Introducción a la electricidad: La resolución guiada de problemas ayuda a desarrollar la comprensión conceptual*. Revista Internacional de Educación en Ciencias y Matemáticas, 7 (4), 699–722.
- [14] Guskey, T. R. (2002). Professional Development and Teacher Change. *Teachers and Teaching: Theory and Practice*, 8(3/4), 381–391.
- [15] Knight, J. K.; Wood, W. B. (2005). *Teaching more by lecturing less*. Cell Biology Education, 4(4), 298–310.
- [16] Schraw, G.; Crippen, K.J.; Hartley, K. (2006). *Promoción de la autorregulación en la educación científica: La metacognición como parte de una perspectiva más amplia del aprendizaje*. Investigación en Educación Científica, 36 (1–2), 111–139.
- [17] Vygotsky, LS (1978). *La mente en la sociedad: El desarrollo de los procesos psicológicos superiores*. Cambridge, MA: Harvard University Press.

Prevalencia de patógenos potencialmente micotoxicógenos en granos de maíz, en la región centro este de la provincia de San Luis

Prevalence of potentially pathogens micotoxin producers in corn seeds, in the central east region of the province of San Luis

Daniela Vanesa Farías, Marcia Victoria Micca Ramirez y Nora Raquel Andrada

Departamento de Ciencias Agropecuarias, FICA, UNSL, Ruta Prov. 55 ext. norte, 5730, Villa Mercedes, San Luis, Argentina.

fariasdanielavanesa@gmail.com, marciamicca@gmail.com, nrandrada@gmail.com

CientiFICA Nº2

Año: 2025

pp. 22 – 40

Historial del Artículo

Recibido:

15/04/2024

Enviado revisión:

22/04/2024

Aceptado:

26/07/2024

ARK CAICYT:

<https://id.caicyt.gov.ar/>

ark:/s30089042/lkz6abvt4

Área temática:

Sistemas

Agropecuarios:

Ingeniería agrícola.

Resumen: La necesidad de mayor producción de alimentos provocó una fuerte expansión de los cereales y el maíz es el más importante del país como de la región semiárida. Para conocer las implicancias epidemiológicas de la presencia de determinados patógenos potencialmente productores de micotoxinas, agentes nocivos de la alimentación humana y animal, en la producción de maíz en San Luis, Argentina, se relevaron granos provenientes de 25 sitios del centro-este de la provincia, con condiciones agroecológicas diferentes. Se analizaron 400 granos en DCA de tres repeticiones, con pruebas de sanidad de acuerdo a normas ISTA y fitopatológicas de uso corriente. Se cuantificaron colonias a los 3, 5 y 7 días de la siembra, se realizó análisis de varianza [ANOVA] y test de Tukey [1 %]. La carga fúngica por tratamiento osciló entre 35 y 42 % de *Aspergillus flavus* (AF), *A. niger*, *Fusarium verticilloide* (FV), *Rhizopus microsporus* (RM), *Penicillium variabilis* y *P. paxilli*, potencialmente productores de micotoxinas [con diferencias significativas entre FV [C], AF - RM [B] y los restantes [A]. Dada la importancia de las micotoxicosis deberán considerarse estrategias alternativas posteriores a la cosecha para el manejo de ellos.

Palabras Claves:

micotoxinas – fungi – maíz

Keywords:

mycotoxins – fungi – corn

Abstract: The need for greater food production caused a strong expansion of cereals. Corn has the same importance as a crop in the semi-arid as a cereal in the country. It has been proven that the mycotoxins that can occur in corn grains are harmful agents for human and animal nutrition. To know the epidemiological implications of the presence of certain pathogens that potentially produce mycotoxins in corn production in San Luis, Argentina, 150 grains from 25 monitoring sites located in the central-eastern region of the province of San Luis with different agroecological conditions were surveyed and were analyzed in CRD of three replays whits sanitary tests were performed according to ISTA and phytopathological standards of current use. Colonies were quantified at 3, 5 and 7 days after planting, analysis of variance [ANOVA] and Tukey test [1%] were performed. The fungal intensity per treatment ranged between 35 and 42% but for the species present *Aspergillus flavus*, *A. niger*; *Fusarium verticilloide*, *Rhizopus microsporus*, *Penicillium variabilis* and *P. paxilli*, potentially mycotoxin producers [with significant differences between FV ©, AF-RN [B] and the rest [A]]. Given the importance of mycotoxicosis, alternative post-harvest strategies should be considered for their management.

INTRODUCCIÓN

La necesidad de mayor producción de alimentos en el mundo por el acentuado incremento de la población humana en el presente siglo, provocó una fuerte expansión de las fronteras agrícolas simultáneamente con el desarrollo de nuevas tecnologías de producción entre otras perspectivas [12].

El maíz es el cereal más importante tanto del país como de la región semiárida. Su inclusión en la rotación junto con un manejo adecuado posee efectos benéficos para el suelo y para los cultivos posteriores. Debido a su utilización como grano y forraje para la alimentación animal juega un rol estratégico en los sistemas de producción en San Luis [8].

La contribución media de San Luis a la producción nacional ha sido de aproximadamente 2,2%, con un valor máximo de participación del 6,4% en 1983/84 [9] y una superficie sembrada a valor medio cercano a las 150000 ha donde el Departamento Pedernera tiene el 60%. El rendimiento medio (1970-2020) del cultivo de maíz en la provincia de San Luis fue de $2455 \text{ kg ha}^{-1} \pm 1418 \text{ kg ha}^{-1}$, con un máximo de 5321 kg ha^{-1} en la campaña 2010/11 y un mínimo de 651 kg ha^{-1} en 1971/72 considerando que este crecimiento se debe a la mejora genética, mayores tasas de fertilización, aumentos de precipitaciones y adopción de sistemas de labranza conservacionistas entre otras tecnologías [9].

Como consecuencia de esta expansión y de la intensificación del uso de suelos cultivables, se están incrementando los problemas de naturaleza sanitaria. A esto contribuye el hecho de que los agentes fitopatógenos, entre otros, son capaces de asociarse con las semillas de sus hospedantes, muchas veces de manera imperceptible. Allí pueden sobrevivir por largos períodos y diseminarse a regiones muy distantes, causando luego grandes perjuicios [13], [26].

En muchos casos, los fungi y straminipile presentes en las semillas con determinadas condiciones ambientales, producen metabolitos secundarios llamados micotoxinas que cuando son consumidas por animales y humanos pueden causar enfermedades llamadas micotoxicosis. Estas micotoxinas se desarrollan en el grano, en el campo o durante el almacenamiento [15].

La exposición de las personas a las micotoxinas puede deberse al: consumo de alimentos de origen vegetal que estén contaminados con esas toxinas, arrastre de las micotoxinas y sus metabolitos en productos de origen animal, como carne o huevos y exposición a ambientes o partículas de polvo que contengan toxinas. [4], [10], [25].

La calidad de la semilla que se utilice es crucial, ya que la misma es el punto inicial en la cadena de producción y la materia prima en muchas industrias alimenticias [13], [26].

Como un componente fundamental de la calidad, es importante valorar la sanidad de la semilla a fin de determinar si se deben o no implementar medidas de prevención y control, por lo tanto, se deben conocer las implicancias epidemiológicas de la presencia de determinados patógenos en la producción de semillas [4], [13] y [17]. Estos hongos son contaminantes naturales que están siempre presentes, pero se desarrollan con facilidad produciendo toxinas cuando persisten condiciones ambientales que les son favorables, como las altas temperaturas y alta humedad relativa [5], [23].

En años de ataques severos de *Fusarium*, la siembra de materiales susceptibles implica un mayor riesgo de pérdidas en productividad e inocuidad del grano [21].

Algunos híbridos del mercado evidencian alta susceptibilidad y podrían acumular mayores niveles de micotoxinas en años favorables al desarrollo de estas enfermedades (comúnmente pudriciones de la espiga). Se debe evitar la siembra de híbridos fuera de su ambiente de adaptación [20].

No todos los hongos que afectan al cultivo son productores de estas sustancias. Las cuatro micotoxinas más relevantes en el grano de maíz son: fumonisinas, aflatoxinas, deoxinivalenol y zearalenona. El nivel de toxicidad de estas micotoxinas es variable de acuerdo a la especie, el sexo y la edad de los individuos existiendo un rango de recomendaciones en base a estas variables [19].

ANTECEDENTES

Entre los principales géneros de patógenos de las semillas que afectan al maíz encontramos: *Aspergillus* spp.; *Fusarium* spp.; *Penicillium* spp.; *Alternaria* spp. y *Diplodia* spp. Los efectos tanto benéficos como perjudiciales de los metabolitos fúngicos, son importantes debido a sus propiedades antibióticas, anabólicas,

mutagénicas, carcinogénicas, etc. Al punto que, las micotoxinas son ahora consideradas como contaminantes del ambiente [4], [10].

Las principales micotoxinas producidas por especies de hongos son: *Aspergillus parasiticus* - Aflatoxinas B1, B2, G1 y G2; *Aspergillus flavus* - Aflatoxinas B1 y B2; *Fusarium sporotrichioides* - Toxina T-2; *Fusarium graminearum* - Desoxinivalenol [o nivalenol] Zearalenona; *Fusarium moniliforme* [*F. verticillioides*] - Fumonisin B1; *Penicillium verrucosum* - *Penicillium verrucosum*; *Penicillium paxilli* - Verruculógeno y los *Aspergillus ochraceus*, *Aspergillus niger* - Ocratoxina A. [1], [11].

En Argentina se han realizado estudios de prevalencia de hongos productores de micotoxinas en distintos materiales genéticos [4], [6], [7], [15], [21], [19], [20], [25]. En Manfredi, los 97 híbridos de maíz evaluados por resistencia a hongos toxicogénicos, mostraron variabilidad para reacción a *Fusarium* en condiciones de campo con híbridos mostrando resistencia a *F. verticillioides*, *F. graminearum*. La variabilidad para reacción a *Aspergillus flavus* en condiciones de campo fue escasa y detectable sólo en algunos años. Estos resultados son consistentes con la mayor habilidad de *Fusarium* en relación a *Aspergillus* para crecer con altos contenidos de agua libre en grano que ocurren en condiciones de campo [20]. En dos campañas 2019 y 2020, en Santiago del Estero y Chaco, se compararon 6 híbridos. En ambas provincias se destacó la presencia de *Fusarium* y *Penicillium* en 2019 y de *Fusarium* y *Aspergillus* en 2020 y se concluyó que en años más secos hay posibilidades que *Aspergillus* incremente su participación en las pudriciones de espiga [3]. En un estudio desarrollado con 5 híbridos en Córdoba, se concluyó que los mismos presentan un comportamiento diferencial a un aislado de *A. flavus* y que este patógeno se comporta de distinto modo según la fecha de siembra [24].

Características macro y micro morfológicas de los patógenos potencialmente productores de micotoxinas

Aspergillus flavus: distribución mundial, desde las praderas, a las montañas a zonas con elevadas temperaturas. Es un hongo aeróbico y por tanto está presente en ambientes con mucho oxígeno. Más frecuente en campos cultivados que yermos. Muy abundante en tierra de jardines. También se encuentra en abono, deyecciones de pájaros, tabaco y vegetales almacenados como las papas. Es el hongo aéreo más frecuente debido a que puede crecer en un gran intervalo de temperaturas. Colonias pulverulentas y de color verde oscuro con un borde blanco. Con la edad se pueden volver grises siendo el reverso blanco o marrón. [16]. Características macroscópicas: son colonias de crecimiento rápido, de 3 a 5 días; comienzan con una tonalidad blanco-amarillenta, algodonosas; con el tiempo se tornan pulverulentas y con tonalidades verdosa o verdeamarillentas [27].

Fusarium verticillioides: es un hongo cosmopolita, pero con cierto predominio en zonas tropicales y subtropicales. El crecimiento en APD [agar papa dextrosa] o en OA [agar harina de avena] es rápido, unos 40 mm en una semana con abundante micelio aéreo algodonoso, de color blanco a melocotón o rosa salmón que se tiñe de color azulado o púrpura en pocos días. El color del reverso varía de crema a lila, vino tinto o púrpura [17].

Aspergillus niger: se ha recuperado de numerosos hábitats. La colonia es algodonosa, al principio es blanca o amarilla y luego se vuelve negra. El reverso de la colonia es blanco o amarillo. Los conidióforos parecen de fieltro, al microscopio, los conidios se disponen de forma radiada con células conidiógenas biseriadas. Los conidios son de color marrón [16].

Rhizopus microsporus: distribución mundial. Crecimiento rápido; peludo, marrón grisáceo oscuro. Los esporangióforos son de color marrón y son más comunes en pares. Esporangios esféricos y de color negro grisáceo. Esporangiosporas hialinas, angulares, sub esféricas o elipsoidales y estriadas. Puede crecer a 50-52 °C. La diferenciación entre variedades requiere una gran experiencia o la secuenciación de dianas de ADN [16].

Penicillium spp: sobre las semillas incubadas se observan estructuras color azul, verde pálido, de aspecto aterciopelado, y con conidios dispuestos en conidióforos penicilados. Produce colonias de crecimiento rápido, aterciopeladas a pulverulentas, verdes, grises, amarillas o blancas, raramente rojizas [26].

OBJETIVOS

- Diagnosticar los patógenos presentes en granos de maíz, potencialmente productores de micotoxinas.

- Determinar prevalencia de patógenos potencialmente productores de micotoxinas en la zona este de la Provincia de San Luis.

MATERIALES Y MÉTODOS

Objetivo 1.- ▪ Diagnosticar los patógenos presentes en granos de maíz, potencialmente productores de micotoxinas

Para conocer la carga fúngica de los distintos granos analizados en la presente tesis, se llevaron a cabo los siguientes trabajos de laboratorio, siguiendo las Normas ISTA para pruebas de germinación:

Cuarteo de muestras: se cuarteó la muestra y se trabajó con 400 semillas (4 repeticiones de 100).

Observación de estructuras: se hizo una observación directa de la muestra para detectar carbones, fructificaciones, micelio, conidios, síntomas como semillas arrugadas, manchadas etc.

Incubación: para completar las pruebas de sanidad se incubó las semillas en medio agar papa glucosado al 2%. Las semillas fueron pretratadas con procedimientos de desinfección de superficie: alcohol 70°, hipoclorito de sodio 1%, agua destilada estéril. Una vez sembradas en el medio APG, se las llevó a estufa a 25-28 °C y a los 3, 6 y 9 días se registraron el desarrollo de las estructuras que permiten identificar los microorganismos presentes en la muestra (conidióforos, conidios, picnidios, acérvulas, etc.). Los aislados se realizaron inmediatamente después de la cosecha y los análisis se sostuvieron durante 6 meses para favorecer el desarrollo de las estructuras de los patógenos.

Identificación: se realizó la determinación de Género por observación de características culturales y estructuras de los patógenos. Para la confirmación de especie se enviaron las muestras al Centro de Referencia de Micología (CEREMIC), de la Universidad Nacional de Rosario.

Objetivo 2.- ▪ Determinar prevalencia de patógenos potencialmente productores de micotoxinas en la zona este de la Provincia de San Luis

Para determinar prevalencia de especies de patógenos productores de micotoxinas, se utilizaron muestras de granos obtenidos de un muestreo de un ensayo regional, realizado en 25 sitios de muestreo.

En cada uno de ellos, se establecieron tres repeticiones de parcelas de 10 x 10 m. Las características de los establecimientos fueron determinados al azar, representando distintas áreas agroecológicas del este de la provincia de San Luis y con distintos manejos agronómicos (Tabla 1 y 2) y el estado general de cada sitio y por planteo (Fig. 1).

Tabla 1. Detalles de ubicación, planteo agronómico, híbrido, cobertura y cultivo antecesor de los sitios de evaluación en el centro este de la provincia de San Luis. 2021-2022. C: Coordenadas. PA: Planteo Agronómico. Cb: Cobertura. CA: Cultivo Antecesor

Muestra	Productor	C - Sur	C - Oeste	Zona	PA	Híbrido	Cb	CA
AFM1	Don Ubaldo Sur	33° 49' 33.01"	65° 47' 10.97"	Nueva Escocia	A	NatalSeed1444RRMG	N	Soja
AFM2	Don Norte-Oeste	33° 45' 37.79"	65° 47' 49.40"	Nueva Escocia	A	Pioneer2058YR	N	Soja
AFM3	Don Ubaldo Noreste	33° 45' 58.07"	65° 46' 20.32"	Nueva Escocia	A	Pioneer2058YR	N	Soja
AFM4	Las Mellizas – Lote 7 camino de entrada	33° 47' 24.96"	65° 33' 24.96"	Las Isletas	B	Pioneer1833YR	N	Soja
AFM5	Las Mellizas – Lote 7 fondo	33° 47' 4.46"	65° 33' 30.90"	Las Isletas	B	Pioneer1833YR	N	Soja
AFM6	Pupi & Co	33° 48' 10.64"	65° 29' 19.15"	Lavaisse	C	DK670MGRR	N	Soja
AFM7	Pupi & Co	33° 48' 5.21"	65° 29' 16.29"	Lavaisse	C	DK670MGRR	N	Soja
AFM8	Pupi & Co	33° 48' 6"	65° 29' 12.9"	Lavaisse	C	DK670MGRR	N	Soja
AFM9	Lorea L. 1	33° 44' 26.4"	65° 28' 17.90"	Lavaisse	D	Arvaes2194HXRR	N	Soja
AFM10	Lorea L. 2	33° 44' 23.47"	65° 28' 17.88"	Lavaisse	D	DK670VT3pro	N	Soja
AFM11	Lorea L. 3	33° 44' 18.50"	65° 28' 2.51"	Lavaisse	D	NideraAX870MGRR	N	Maíz
AFM12	Las Taguas L. 6	34° 22' 4.36"	65° 32' 55.02"	La Angelina	A	DK7010RRMG	N	Sorgo

AFM13	Las Taguas L. 3	34° 22' 31.65"	65° 33' 22.14"	La Angelina	A	DK670MGRR	N	Soja
AFM14	Las Taguas L. 14	34° 22' 27.50"	65° 30' 59.80"	La Angelina	A	DK670MGRR	S	Soja
AFM15	Las Taguas L. 18	34° 22' 21.47"	65° 30' 54.77"	La Angelina	A	DK7010RRMG	N	Maíz
AFM16	Pichi Lauquen L.1	34° 23' 59.13"	65° 30' 54.77"	La Angelina	E	LaTijereta632VT3pro	N	Soja
AFM17	Pichi Lauquen L.2	34° 23' 37.09"	65° 25' 17.89"	La Angelina	E	LaTijereta621RR	S	Soja
AFM18	La Josefina L.1	33° 53' 57.48"	65° 25' 30.24"	Justo Daract	B	Pioneer1778YR	N	Soja
AFM19	La Josefina L.2	33° 53' 58.55"	65° 6' 41.18"	Justo Daract	B	Pioneer2058YR	N	Soja
AFM20	Palau L.1	33° 53' 38.04"	65° 9' 40.27"	Justo Daract	F	SPS2121TDTG	N	Soja
AFM21	Palau L.2	33° 53' 38.03"	65° 9' 35.56"	Justo Daract	F	SPS2121TDTG	N	Soja
AFM22	Bonini	33° 49' 2.26"	65° 14' 16.41"	Justo Daract	F	SPS2121TDTG	N	Soja
AFM23	Las Cleidas L.2	33° 22' 36.51"	65° 58' 26.08"	Fraga	G	DK670VT3pro	N	Soja
AFM24	Las Cleidas L.3	33° 22' 0.54"	65° 58' 21.19"	Fraga	G	DK670VT3pro	N	Soja
AFM25	Las Cleidas L.5	33° 22' 0.96"	65° 58' 16.46"	Fraga	G	DK670VT3pro	N	Soja

Tabla 2. Clasificación de los planteos agronómicos. B: Barbecho – DG: Doble Golpe – PrE: preemergente – PosE: Post emergente – F: Fertilización. [N: NO; S: SI]

Planteo Agronómico	B	B II	DG	PrE	PosE	F a la siembra Urea	F a la siembra Urea +	F post Urea
A	S	N	N	S	N	S	N	N
B	S	N	N	S	S	N	S	N
C	S	N	N	S	S	N	N	S
D	S	N	S	N	N	S	N	N
E	S	N	S	N	S	S	N	N
F	S	N	S	S	N	N	S	N
G	S	S	N	N	S	N	N	N

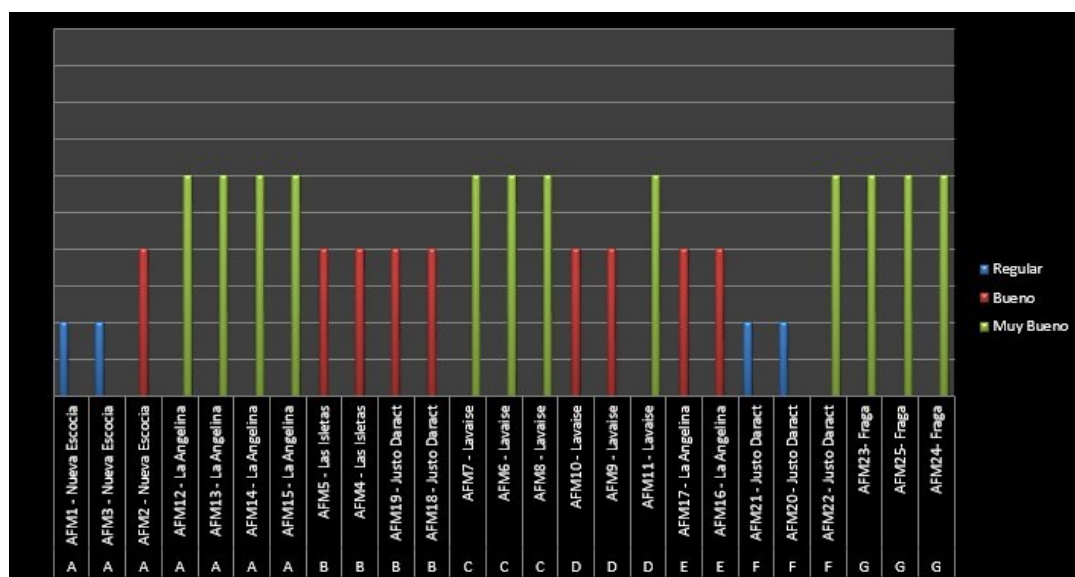


Figura 1. Estado general del cultivo de maíz, por sitio y por planteo agronómico en distintos sitios de producción en áreas agroecológicas del este de la provincia de San Luis. Campaña 2021-2022.

Al realizarse la cosecha en mayo 2022, se extrajeron las muestras de semillas de todos los tratamientos y sus repeticiones. El análisis fitopatológico se realizó según lo descrito en el Objetivo 1.

La incidencia se midió como: lotes con carga fúngica productora de micotoxinas/total de lotes.

Con los datos obtenidos, se elaboraron mapas de prevalencia de las zonas de muestreo y su correspondencia con la presencia de patógenos posibles productores de micotoxinas, determinando en cada sitio, incidencia de los principales patógenos e indicando índice de peligrosidad con rojo (> 50%), amarillo (entre 49 y 10%) y verde (<10) de acuerdo a los valores obtenidos en el programa QGIS [21]. Se graficaron las incidencias para cada ensayo en Excel. Se realizó un Análisis de Varianza y Prueba de Diferencia de Medias (Tukey 0,05) para determinar zonas con mayor potencial de riesgo de aparición. Los análisis estadísticos se realizaron en programas estadístico R [23] e InfoStat. [2].

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Objetivo 1.- ▪ Diagnosticar los patógenos presentes en granos de maíz, potencialmente productores de micotoxinas

Las cepas aisladas en los distintos tratamientos y sus características se detallan en la Fig. 2. Todas las cepas son especies potencialmente productoras de micotoxinas, coincidiendo con lo encontrado por distintos autores en otras zonas agroecológicas de Argentina [1], [4], [6], [7], [11], [15], [19], [20], [21], [25].



Figura 2. colonias aisladas y sus características. Siembra en APG 2%, *Fusarium verticillioides* (arriba-izquierda). *Aspergillus niger* (arriba-derecha). *Aspergillus flavus* (medio-izquierda). *Penicillium paxilli* (medio-derecha). *Penicillium variabili* (abajo-izquierda). *Rizhopus microsporus* (abajo-derecha). Villa Mercedes (San Luis) 2021-2022.

Objetivo 2. ▪ Determinar prevalencia de patógenos potencialmente productores de micotoxinas en la zona este de la Provincia de San Luis

La prevalencia y intensidad de cada patógeno productor de micotoxinas en la zona este de la provincia de San Luis se presenta en la (Fig. 3).

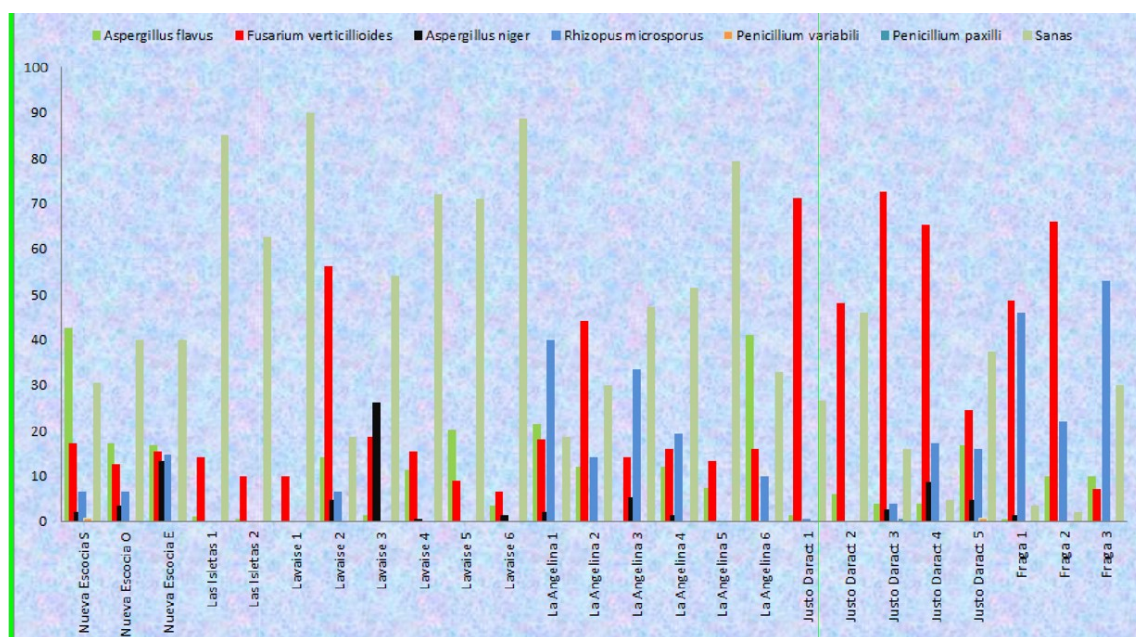


Figura 3. Prevalencia de hongos patógenos en granos de maíz por sitio en áreas agroecológicas del este de la provincia de San Luis. Campaña 2021-2022.

Dada la diversidad de los valores de intensidad se desarrollaron gráficas por patógenos según su presencia en las localidades evaluadas. *Fusarium verticillioides* tuvo un 100% de prevalencia en las zonas monitoreadas (Fig. 4) y presentó los mayores índices de peligrosidad respecto a los restantes patógenos (Fig. 5). Intensidades mayores al 50% se observaron en la zona de Lavalse, Justo Daract y Fraga. Ni la prevalencia ni la incidencia tuvieron correlación con la zona agroecológica; tampoco con el estado general del cultivo.

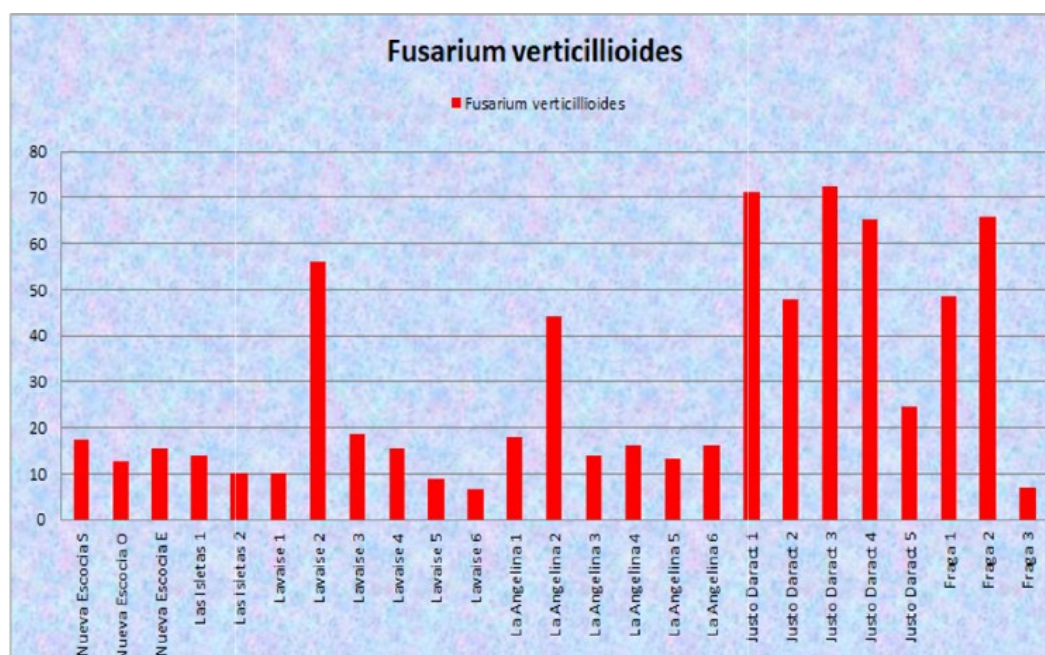


Figura 4. Porcentaje de prevalencia de *Fusarium verticillioides* en granos de maíz, por sitio en el este de la provincia de San Luis. Campaña 2021-2022. Los resultados se muestran en porcentaje.

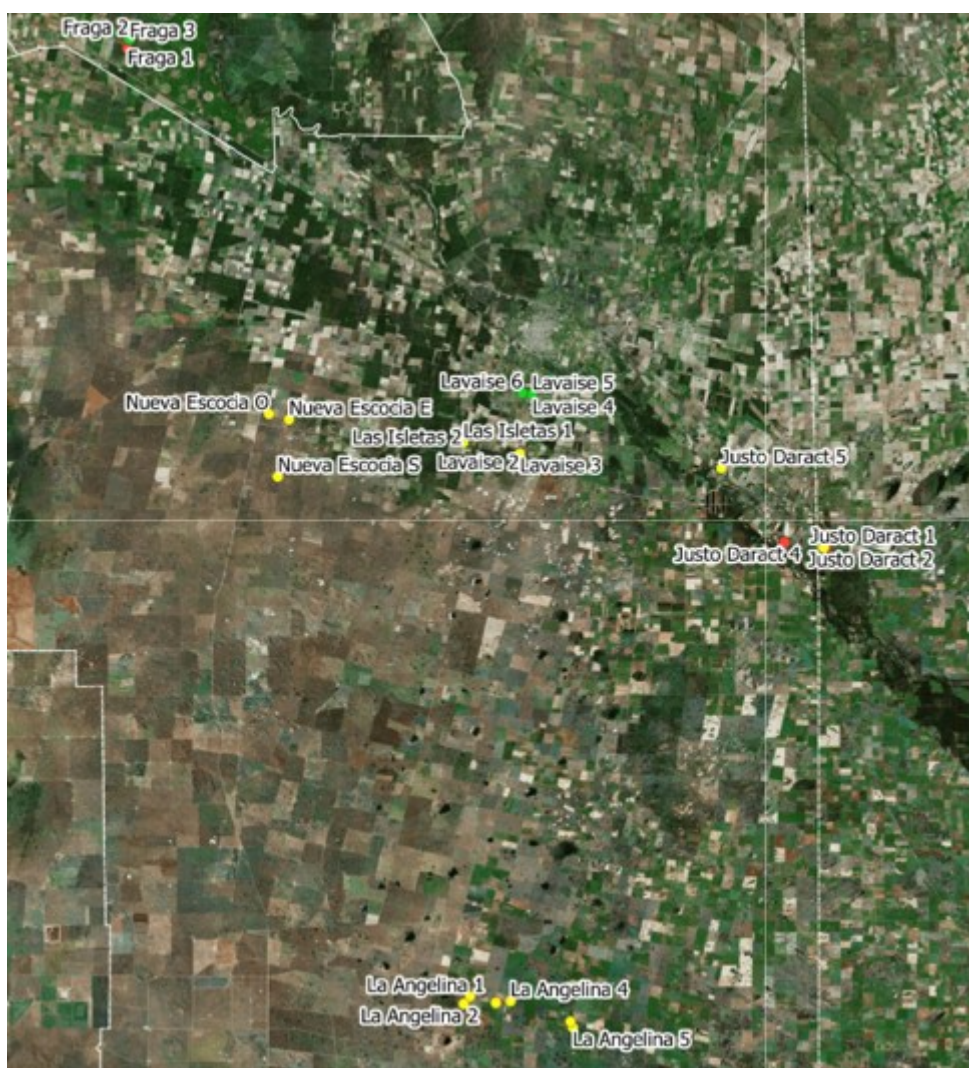


Figura 5. mapa de prevalencia de las zonas de muestreo y su correspondencia con la presencia de *Fusarium verticilloides*, determinando incidencia; índice de peligrosidad con rojo (> 50%), amarillo (entre 49 y 10%) y verde (<10) de acuerdo a los valores. AFM 7 Lavaise 2; AFM 18 Justo Daract 1; AFM 20 Justo Daract 3; AFM 21 Justo Daract 4; AFM 24 Fraga 2 presentan índice de peligrosidad > 50.

La prevalencia del género *Aspergillus* fue variable dependiendo la especie. A diferencia de los resultados obtenidos con un aislado en Córdoba [24], *Aspergillus flavus* se presentó en casi todos los sitios evaluados y tuvo una prevalencia del 92%; mientras que *Aspergillus niger* del 44%.

A su vez la incidencia de *Aspergillus niger* se mantuvo a niveles bajos en todos los lotes donde se presentó, a excepción de Nueva Escocia E y de Lavaise 3, donde los índices de peligrosidad superaron valores medios (Fig. 6 y 8). Por el contrario, *Aspergillus flavus*, tuvo índice de peligrosidad medios (entre 10 y 45%) en la mayoría de las zonas presentes (Fig. 7 y 9).

El comportamiento de este género respecto al de *Fusarium* se corresponde a los resultados obtenidos por otros autores, pero no se puede inferir el efecto positivo de la humedad con este último patógeno [10], [20], [3].

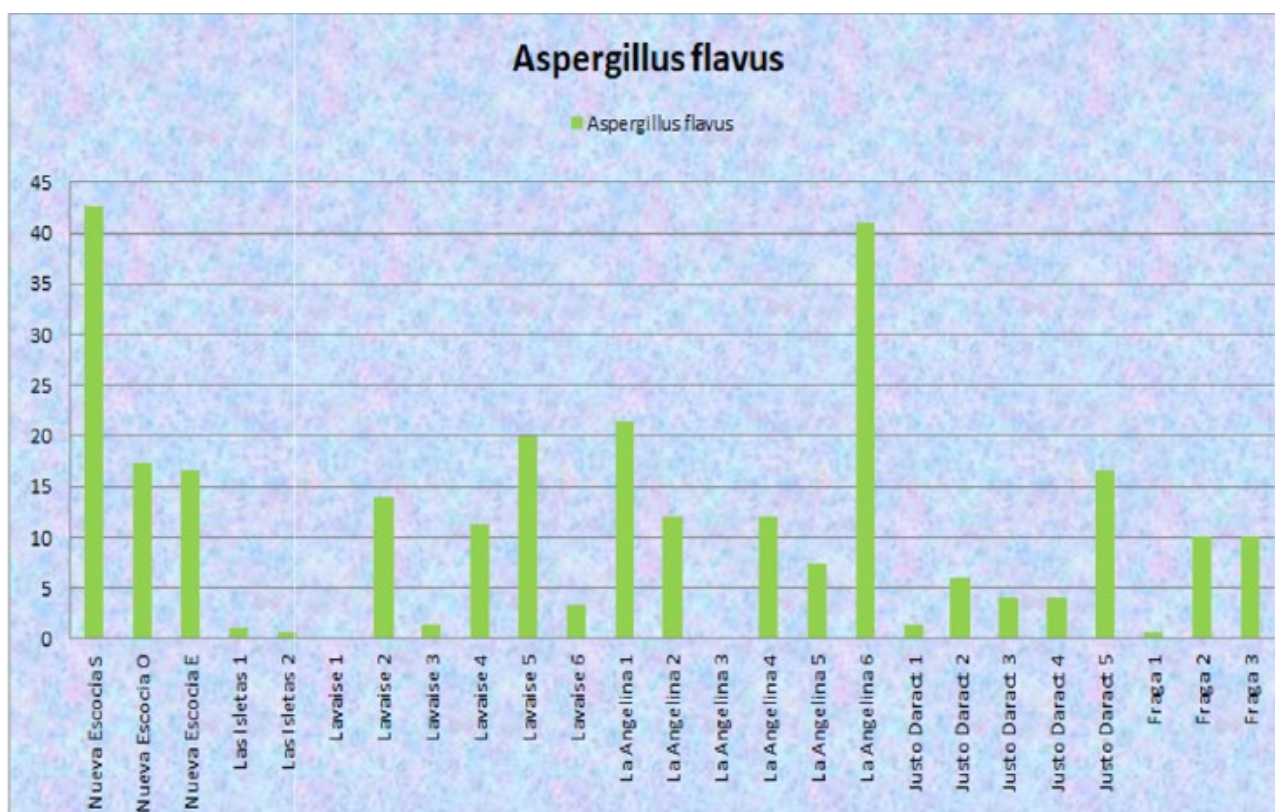


Figura 6. Valores de prevalencia (%) de *Aspergillus flavus* en granos de maíz por sitio en distintos puntos de producción en áreas agroecológicas del este de la provincia de San Luis. Campaña 2021-2022.

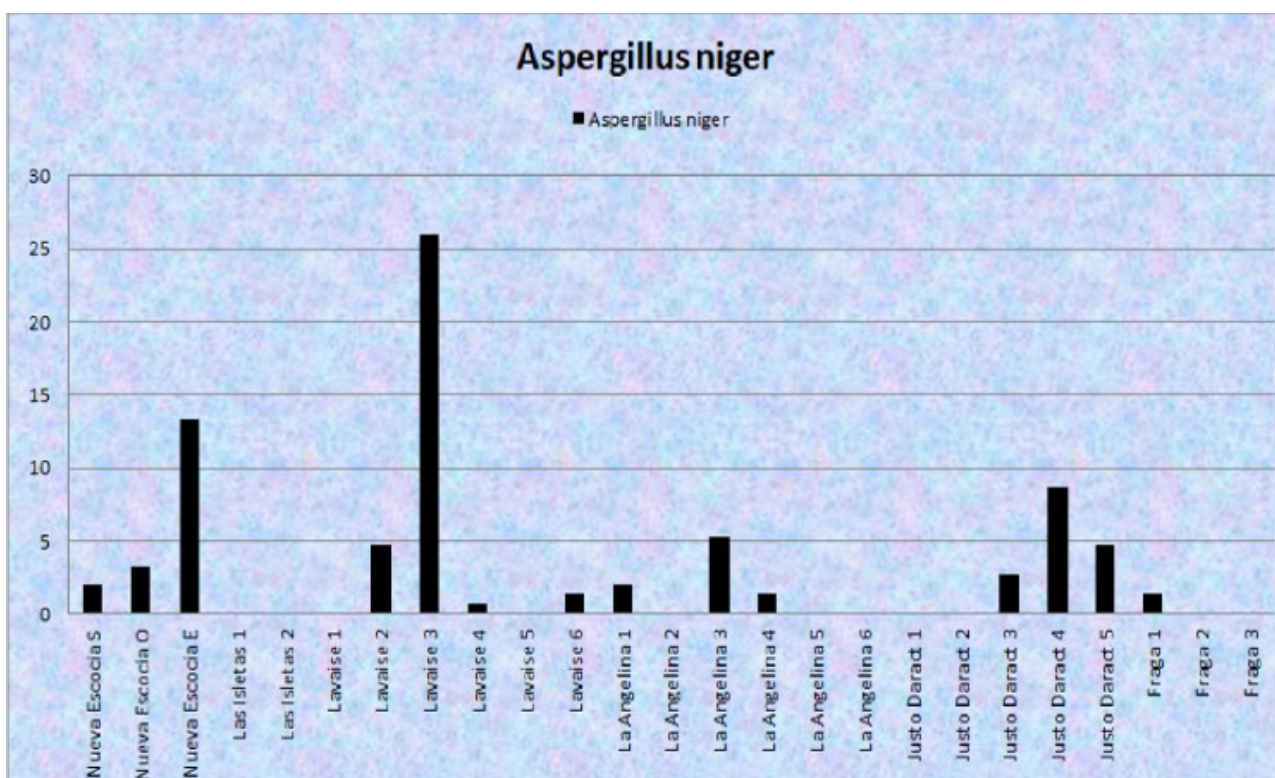


Figura 7. Valores de prevalencia (%) de *Aspergillus niger* en granos de maíz, por sitio en distintos puntos de producción en áreas agroecológicas del este de la provincia de San Luis. Campaña 2021-2022.

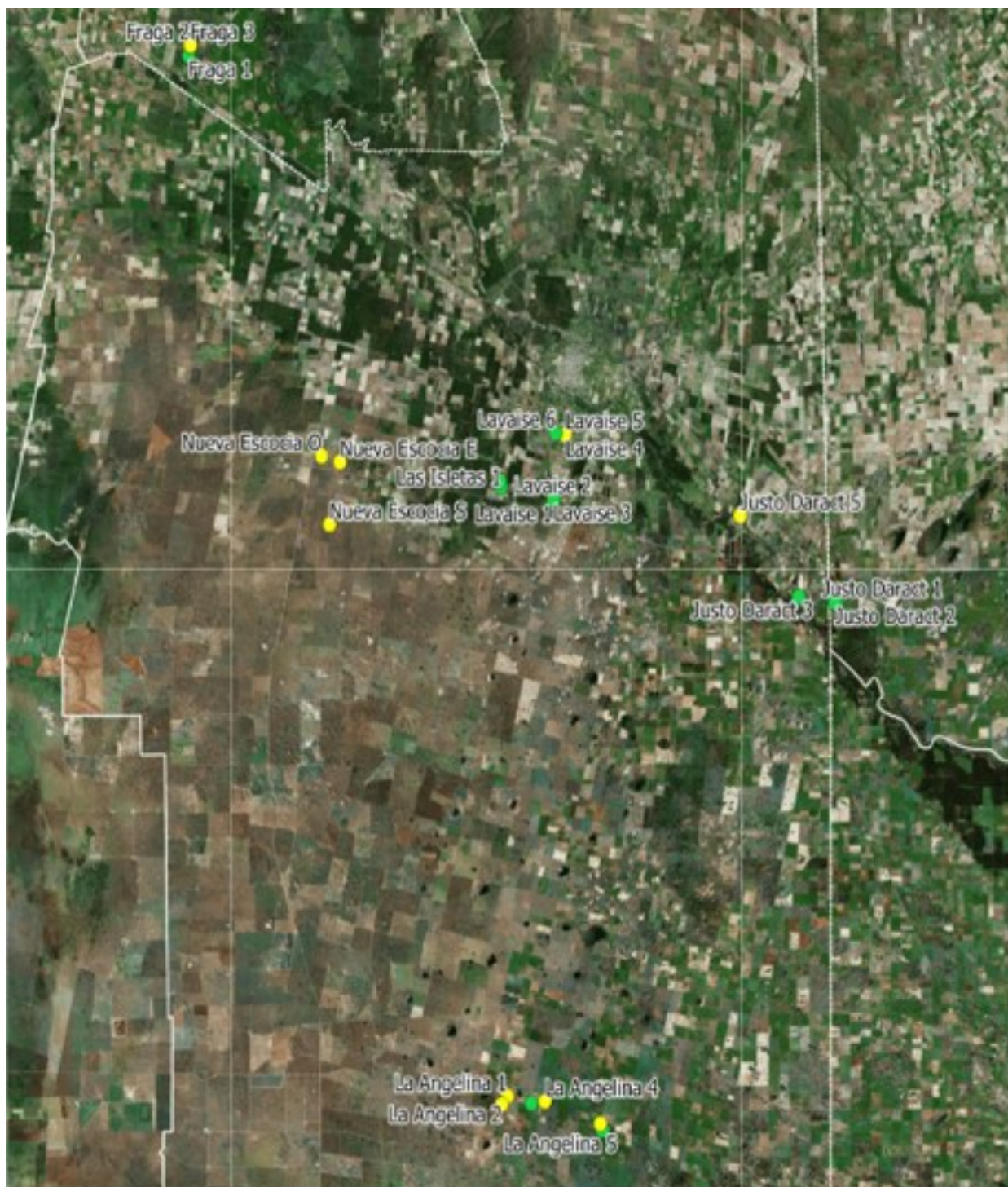


Figura 8. mapas de prevalencia de las zonas de muestreo y su correspondencia con la presencia de *Aspergillus flavus*, determinando incidencia; índice de peligrosidad con rojo [$> 50\%$], amarillo [entre 49 y 10%] y verde [<10] de acuerdo a los valores. No representa peligrosidad

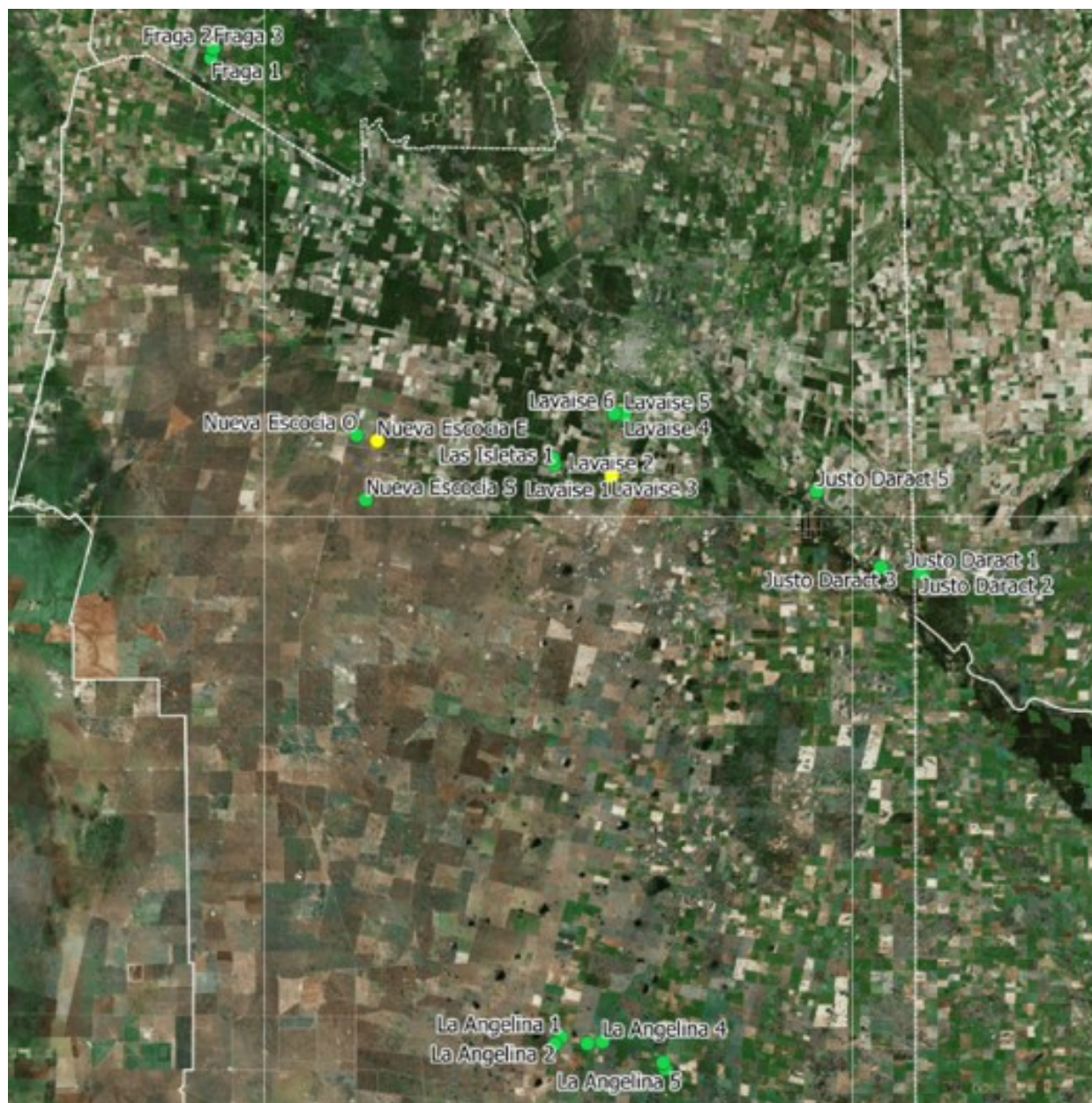


Figura 9. mapas de prevalencia de las zonas de muestreo y su correspondencia con la presencia de *Aspergillus niger*, determinando incidencia; índice de peligrosidad con rojo [$> 50\%$], amarillo [entre 49 y 10%] y verde [<10] de acuerdo a los valores. No representa peligrosidad.

Rizhopus microsporus, junto con *Fusarium verticilloides*, fueron las únicas cepas que presentaron índices altos de peligrosidad en una misma zona, Fraga (Fig. 10). La prevalencia de *Rizhopus* fue del 64%. En el 56% de las localidades en la que estaba presente se detectaron índice de peligrosidad medio (10-49%). Esta prevalencia, con esta intensidad, se encuentran asociadas a la zona de Fraga y de La Angelina (Fig. 12). El género *Penicillium* tuvo una prevalencia del 4% (*P. paxilli*) y del 8% (*P. variabili*). Ambos con intensidades inferior al 1%, lo que determina índice de peligrosidad cercanos al cero (Fig. 11, 13, 14 y 15).

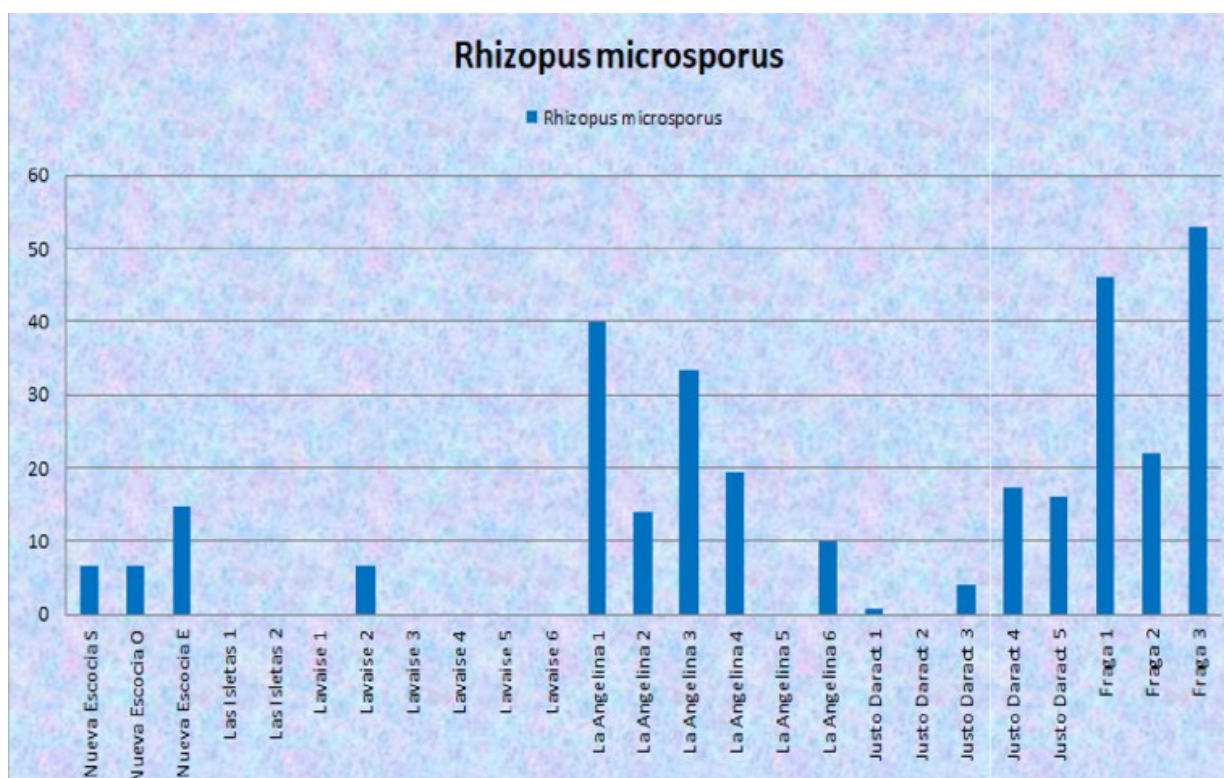


Figura 10. Valores de prevalencia (%) de *Rhizopus microsporus* en granos de maíz en distintos sitios de producción en áreas agroecológicas del este de la provincia de San Luis. Campaña 2021-2022.

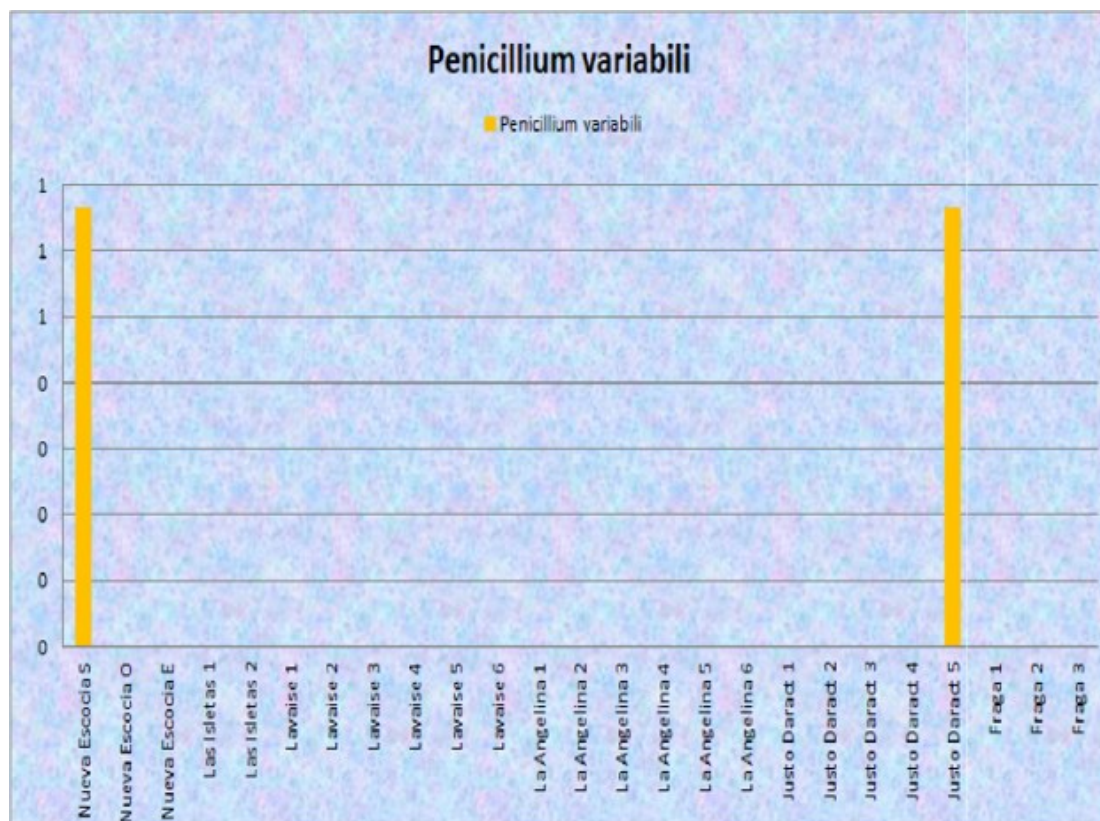


Figura 11. Valores de prevalencia (%) de *Penicillium variabili* en granos de maíz, por sitio y por planteo agronómico en distintos sitios de producción en áreas agroecológicas del este de la provincia de San Luis. Campaña 2021-2022.

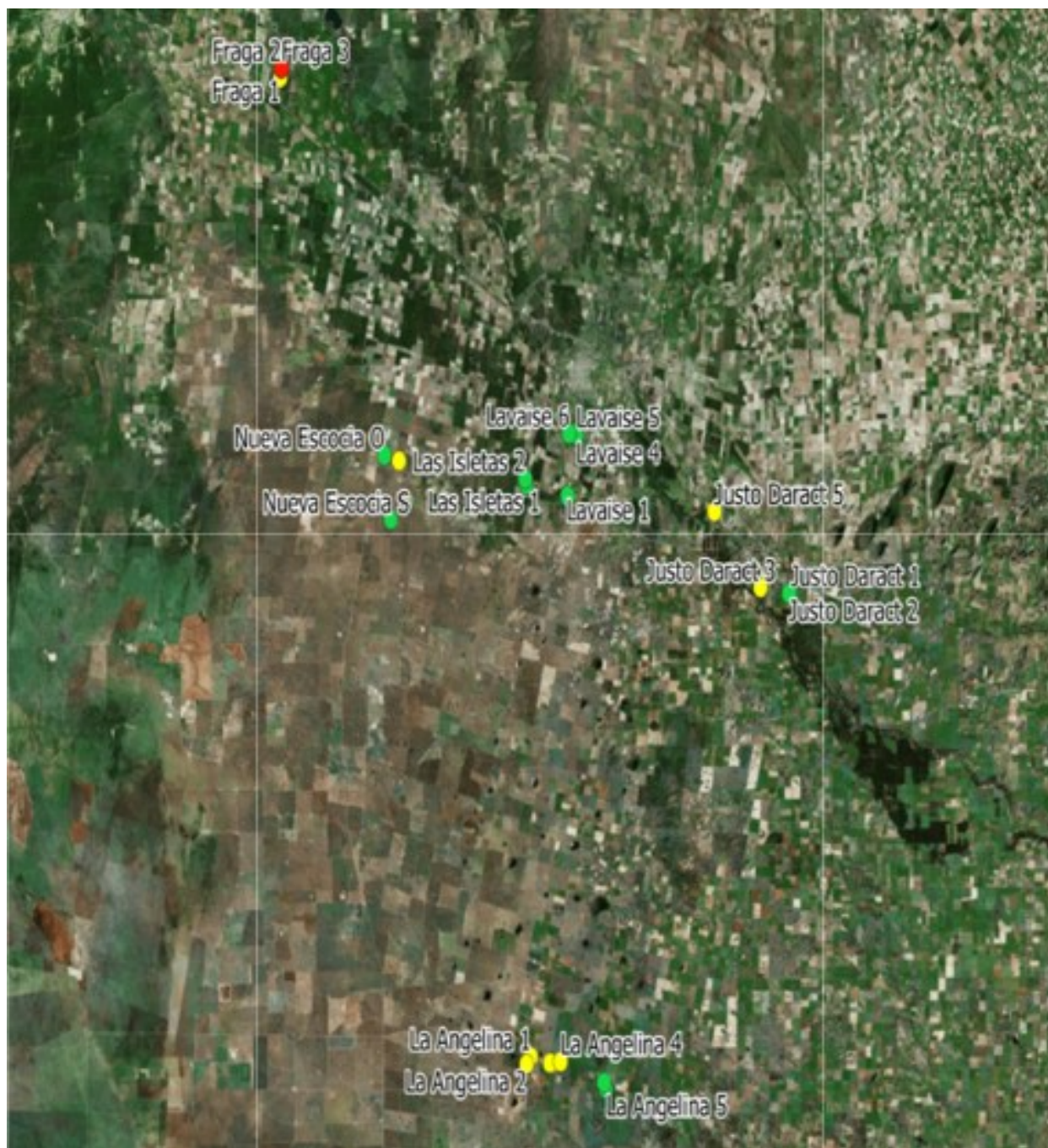


Figura 12. mapa de prevalencia de las zonas de muestreo y su correspondencia con la presencia de *Rizhopus microsporus*, determinando incidencia; índice de peligrosidad con rojo [$> 50\%$], amarillo [entre 49 y 10%] y verde [<10] de acuerdo a los valores obtenidos. Sólo en Fraga 3 AFM25 Las Cleidas - Lote 5 presenta índice de peligrosidad > 50 .

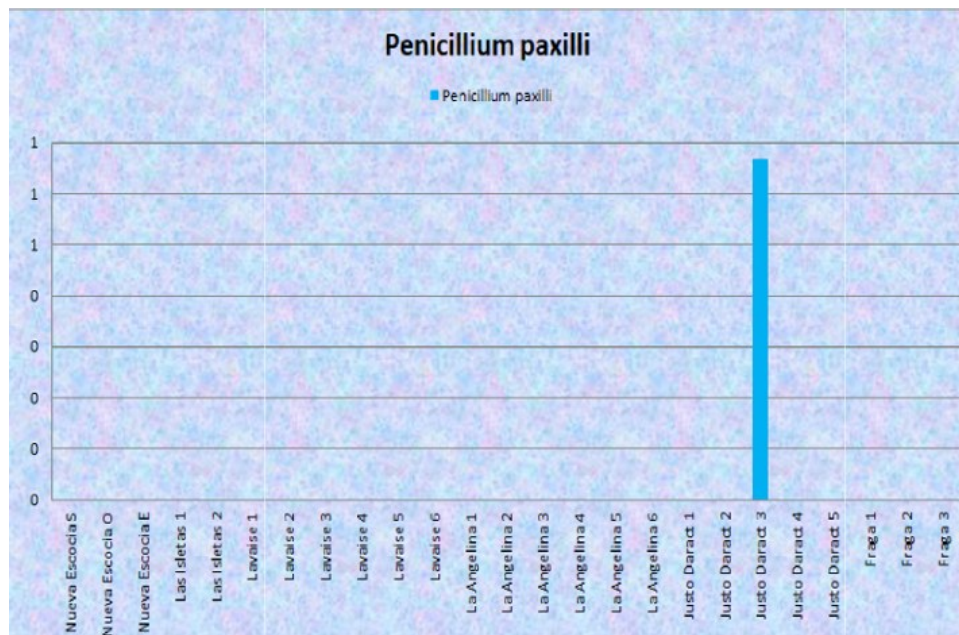


Figura 13. Prevalencia (%) de *Penicillium variabili* en granos de maíz, por sitio y por planteo agronómico en distintos sitios de producción en áreas agroecológicas del este de la provincia de San Luis. Campaña 2021-2022.

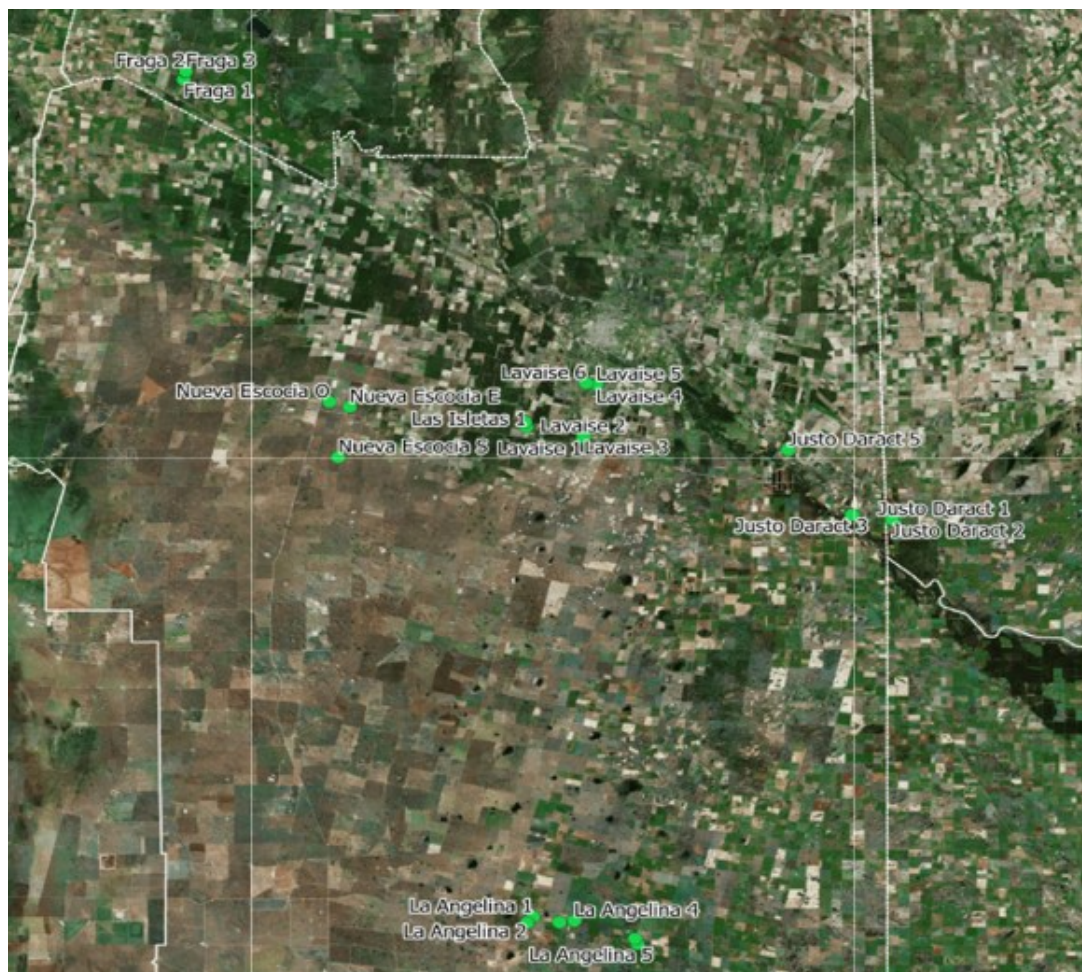


Figura 14. Mapa de prevalencia de las zonas de muestreo y su correspondencia con la presencia de *Penicillium variabili*, determinando incidencia; índice de peligrosidad con rojo [$> 50\%$], amarillo [entre 49 y 10%] y verde [$< 10\%$] de acuerdo a los valores. No representa peligrosidad.

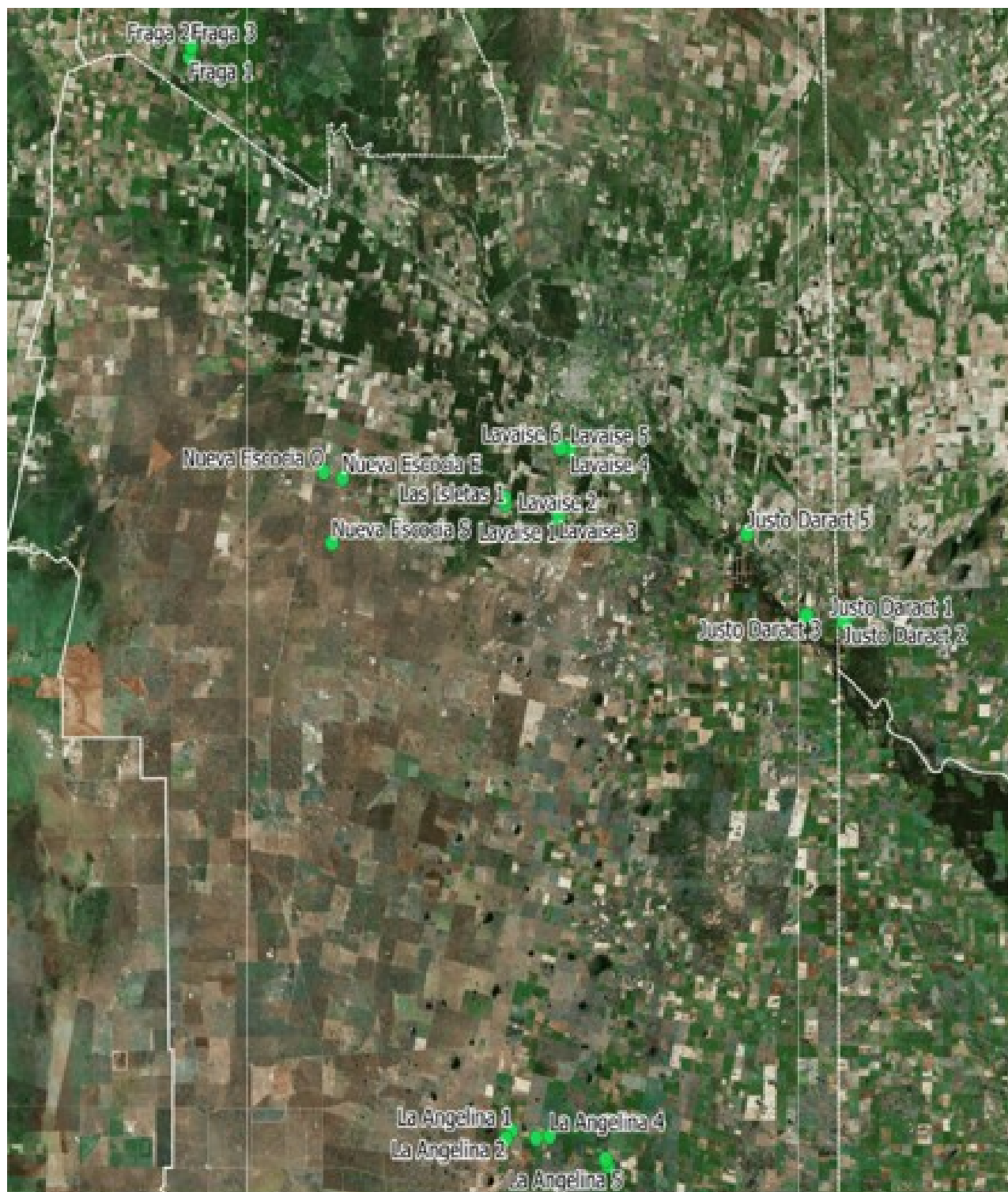


Figura 15. Mapa de prevalencia de las zonas de muestreo y su correspondencia con la presencia de *Penicillium paxilli*, determinando incidencia; índice de peligrosidad con rojo [$> 50\%$], amarillo [entre 49 y 10%] y verde [<10] de acuerdo a los valores. No representa peligrosidad.

Estos resultados fueron validados mediante análisis de varianza y test de Tukey, determinando que las diferencias significativas estuvieron por género de patógenos y no por sitio (Tabla 3).

Tabla 3. Análisis de varianza y test de Tukey. Prevalencia e Incidencia de hongos productores de micotoxinas, en sitios agroecológicos diferentes del este de la provincia de San Luis. Campaña 2021-2022.

Análisis de la varianza				
Variable	N	R ²	R ² Aj	CV
Incendencia	450	0,35	0,31	166,43

Cuadro de Análisis de la Varianza [SC tipo III]				
F.V.	SC	Gl	CM	F p-valor
Modelo	53516,54	31	1726,34	7,40 <0,0001
Variable Sitio	9530,67	24	397,11	1,70 0,0215
Variable Patógeno	43902,44	5	8780,49	37,63 <0,0001
Rep	83,43	2	41,72	0,18 0,8363
Error	97527,24	418	233,32	
Total	151043,78	449		
Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=7,12202				
Error: 233,3187			gl: 418	
Patógeno	Medias	N	E.E.	
PP	0,03	75	1,76 A	
PV	0,05	75	1,76 A	
AN	3,12	75	1,76 A	
AF	11,09	75	1,76	B
RM	12,43	75	1,76	B
FV	28,35	75	1,76	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes [$p > 0,05$]

CONCLUSIONES

1. En la zona este de la provincia de San Luis, se han diagnosticado especies de hongos potencialmente productoras de micotoxinas.
2. El género *Fusarium* y el género *Aspergillus* son considerados los de mayor prevalencia e intensidad
3. La baja prevalencia e incidencia de especies de *Penicillium* no implicarían riesgo para la zona.
4. No se ha podido determinar correlación entre la prevalencia y los índices de peligrosidad por zonas agroecológicas.
5. La presencia de los hongos potenciales productores de micotoxinas NO IMPLICA PRODUCCIÓN DE MICOTOXINAS, pero si nos advierte de su RIESGO.
6. Dada la importancia de las micotoxicosis en la salud animal y humana deberán considerarse estrategias alternativas posteriores a la cosecha, para el manejo de estos patógenos.

REFERENCIAS

- [1] Adiveter S. L. (2002) *Mohos y Micotoxinas*. Información Técnica. España. Recuperado de http://www.adiveter.com/ftp_public/articulo749.pdf 16-10-22
- [2] Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M., Casanoves, F., Di Rienzo, J.A. y Robledo C.W. (2008). *Manual del Usuario*, Editorial Brujas, Córdoba, Argentina
- [3] Barontini J., Ruiz Posse A., Druetta M., Torrico K., Ferrer M., Laguna I.G., Giménez Pecci M.P. (2020). *Composición relativa de hongos causales de la podredumbre de la espiga de maíz en dos ambientes y dos campañas agrícolas*. 5^{to} Congreso Argentino de Fitopatología. [https://repositorio.inta.gob.ar/bitstream/handle/20.500.12123/11815/INTA_CIAP_InstitutodePatolog%
%adaVegetal_Barontini_J_Composici%c3%b3n_relativa_de_hongos.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://repositorio.inta.gob.ar/bitstream/handle/20.500.12123/11815/INTA_CIAP_InstitutodePatolog%c3%adaVegetal_Barontini_J_Composici%c3%b3n_relativa_de_hongos.pdf?sequence=2&isAllowed=y)
- [4] Bodega, J.L. (2010). *Diplodiosis, enfermedad causada por micotoxinas en maíz. Hongos en los rastrojos de maíz, problemas en las vacas*. Producir XXI, Bs. As. 18[225]:24-34

- [5] Campbell, C.L. and Madden, L.V. (1990). *Introduction to Plant Disease Epidemiology*. JohnWiley and Sons, NY. 532 pp.
- [6] Casini, C. (2015). *Micotoxinas, riesgos para el maíz*. Agrovoz
- [7] Chultze, S. (2009). *La UNRC coordina un proyecto a largo plazo de prevención y control de micotoxinas*. https://www.unrc.edu.ar/unrc/n_comp.cdc?nota=22511
- [8] Colazzo, J.C. (2015). *Abstract Libro El cultivo de maíz en San Luis* [PDF] Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/281273477_El_cultivo_de_maiz_en_San_Luis [accessed Apr 25 2022].
- [9] Colazzo, J.C. y Rivarola, R. (2015). *Producción de maíz en la provincia de San Luis*. En: *El cultivo de maíz en San Luis*. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/281273477_El_cultivo_de_maiz_en_San_Luis el 25/4/2022.
- [10] Espinosa Paz, N; Garrido Ramírez, E.; Pérez Salgado, M. M. (2003). *Monitoreo de seis micotoxinas en granos de maíz, sorgo trigo y cacahuete en Chiapas*. Recuperado de: https://smbb.mx/congresos%20smbb/puertovallarta03/TRAB_AJOS/AREA.../CV-10.pdf
- [11] FAO. (2003). *Manual sobre la aplicación del sistema de análisis de peligros y puntos críticos de control [APPCC] en la prevención y control de las micotoxinas*. ISBN 92-304611-2
- [12] FAO. (2020). *Producción y productividad agrícolas en los países en desarrollo*. Recuperado de: <http://www.fao.org/docrep/x4400s/x4400s12.htm>. el 25/04/2022
- [13] Formento, A.N. 2010. *Enfermedades foliares reemergentes del cultivo de maíz: royas [Puccinia sorghi y Puccinia polysora], tizón foliar [Exserohilum turcicum] y mancha ocular [Kabatiella zae]*. Actualización Técnica N° 2. EEA Paraná. INTA. ISSN 1853 – 0060. Pg: 89 -100
- [14] Fry, W.E. (1968). *Plant disease epidemiology: population dynamics and management*. New York, macmillan publishing Company, v. 1, p. 129-150.
- [15] González, M.; Incremona, M.; Ghío, A.; Botta, G. (2004). *Patógenos fúngicos prevalentes en granos de maíz en la zona maicera núcleo argentino*. <http://rehip.unr.edu.ar/handle/2133/833>
- [16] LIFE. Leading international fungal education. (2019) *Fungal Infections*. Recuperado de: <http://www.life-worldwide.org/esp/fungaldiseases/aspergillus-fumigatus>. el 16/10/2022
- [17] Monzón, A. y Rodríguez Tudela, J.L. Seimc. (2000). *Infecciones Causadas Por El Género Fusarium* Recuperado de: <https://seimc.org/contenidos/ccs/revisionestematicas/micologia/fusarium.pdf> el 22/11/21
- [18] Mora Aguilera, G. (2012). *Curso Internacional de Epidemiología Vegetal*. Universidad de San Carlos Guatemala. 68 pp
- [19] Presello, D.; Fernández, M.; Oviedo, S.; Iglesias, J.; Giomi, G. y Faugue, C. (2017) *Micotoxinas en maíz*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria Estación Experimental Pergamino. Comunicación Técnica. https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmpinta_micotoxinas_en_maz_trab_2.pdf
- [20] Presello, D.; Iglesias, J.; Fernández, M.; Fauguel, C.; Eyhéabide, G. y Lorea, R. (2009) *Reacción de cultivares a hongos productores de micotoxinas en maíz*. Recuperado de: https://inta.gob.ar/sites/default/files/intareacc_cultimaiz_micotoxinas_2009.pdf. Ingreso: 25-04-2022
- [21] Presello, D.A.; Oviedo, M.S.; Fernández, M.; Iglesias, J.; Copia, P.A. (2013). *Resistencia a podredumbres de espiga y acumulación de micotoxinas en maíz*. Maíz. RTA / Vol. 10 / N° 32: 29-32
- [22] QGIS. (2020). *Sistema de Información Geográfica. Proyecto de Fundación Geoespacial de código abierto*. <https://www.qgis.org/en/site/>.
- [23] R. Programa estadístico.version 3.1.1 [2014-07- 10] Copyright [C] (2014) The R Foundation for Statistical Computing. Platform: i386-w64- mingw32/i386 [32-bit]

-
- [24] Rodriguez, A. (2020). *Comportamiento de híbridos de maíz ante una cepa de Aspergillus flavus en la provincia de Córdoba*. Tesis de Maestría. Univerisdad Nacional de La Plata. http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/70667/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [25] Roskopf, R. Cardoso, L.; Iglesias, J. y Presello, D. (2017). *Micotoxinas en los granos y subproductos. La prevención a campo, en la cosecha y durante el almacenamiento son determinantes*. Engormix. Recuperado de: <https://www.engormix.com/micotoxinas/articulos/micotoxin-as-granos-subproductos-prevencion-t40611.htm>
- [26] Scandiani, M.M.; Luque, A.G. (2009). *Identificación de patógenos en semilla de soja*. ISSN 987-5024. Análisis de semillas Suplemento especial Nº 2.
- [27] Tangarife, (2011). <https://atlasdemicologia.wordpress.com/2016/06/22/aspergillus-spp/>

Análisis de la biodiversidad de artrópodos del suelo, en ambientes con diferente nivel de disturbio

Soil arthropods biodiversity analysis, in environments with different disturbance levels

Maria Belén Funes, Juan Bautista Casale, y Angélica Sandra Escudero

Universidad Nacional de San Luis (UNSL), Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias (FICA). Ruta Prov. Nº 55
(Ex. 148) Extremo Norte. Villa Mercedes. San Luis. Argentina. CP: 5730

mariabelenfunes@gmail.com, jbautistacasale@gmail.com, asescudero2@gmail.com

CientiFICA Nº2

Año: 2025

pp. 41 – 57

Historial del Artículo

Recibido:

16/04/2024

Enviado revisión:

25/04/2024

Aceptado:

05/07/2024

ARK CAICYT:

[https://id.caicyt.gov.ar/
ark:/s30089042/d60k1kuyk](https://id.caicyt.gov.ar/ark:/s30089042/d60k1kuyk)

Área temática:

Sistemas

Agropecuarios

Resumen: la macrofauna del suelo constituye un importante componente de los ecosistemas naturales y agroecosistemas. La fragmentación del hábitat se considera una amenaza para la biodiversidad, donde la acción antrópica produce transformación de comunidades originales, afectando composición de especies y frecuencias de las mismas. Se comparó la biodiversidad de familias de artrópodos del suelo en ambientes con diferente nivel de disturbio, en el Campo Experimental del Departamento de Ciencias Agropecuarias de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de San Luis. Los muestreos se realizaron entre diciembre de 2018 y abril de 2019, en dos sitios: ambiente poco disturbado "Parque Botánico" y ambiente disturbado "Cultivo de maíz". La periodicidad fue quincenal y se utilizó como técnica de muestreo trampas de suelo tipo Pitfall, colocándose una trampa por sitio de muestreo. Los artrópodos recolectados fueron identificados hasta el rango taxonómico de familia. Para determinar la biodiversidad de los ambientes se calcularon y analizaron los índices de Shannon-Wiener y Simpson, haciendo uso del software estadístico InfoStat. En ambos ambientes se identificaron 33 familias, agrupadas en 8 órdenes y 5 clases, siendo Coleoptera el más diverso. Los valores de los índices obtenidos no arrojaron diferencias significativas entre los ambientes, siendo semejantes en su biodiversidad. El trabajo representa una contribución al estudio de la biodiversidad de artrópodos en San Luis y enfatiza la necesidad de profundizar estos estudios y su impacto en los ambientes.

Palabras Claves:

macrofauna del suelo,
ecosistemas naturales,
agroecosistemas.

Keywords:

soil macrofauna,
natural ecosystems,
agroecosystems.

Abstract: soil macrofauna constitutes an important component of natural ecosystems and agroecosystems. Habitat fragmentation is considered a threat to biodiversity, where anthropic action produces transformation of original communities, affecting species composition and frequencies. Families biodiversity of soil arthropods was compared in environments with different disturbance levels, in the Experimental Field of the Department of Agricultural Sciences of the Engineering and Agricultural Sciences Faculty of the National University of San Luis. Sampling was carried out between December 2018 and April 2019, in two sites: slightly disturbed environment "Botanical Park" and disturbed environment "Corn crop". The periodicity was biweekly and Pitfall type soil traps were used as a sampling technique, placing one trap per sampling site. The collected arthropods were identified up to the taxonomic rank of the family. To determine the biodiversity of the environments, the Shannon-Wiener and Simpson indices were calculated and analyzed, using the InfoStat statistical software. In both environments, 33 families were identified, grouped into 8 orders and 5 classes, with Coleoptera being the most diverse. The values of the indices obtained did not show significant differences between the environments, being similar in their biodiversity. The work represents a contribution to the study of arthropod biodiversity in San Luis and emphasizes the need to deepen these studies and their impact on the environments.

INTRODUCCIÓN

Una perturbación, disrupción o disturbio ambiental es un cambio en las condiciones del ambiente que causa a su vez un cambio drástico en un ecosistema. Cuando las perturbaciones son agudas, estas se caracterizan por actuar rápidamente, con gran efecto, alterando la estructura física y la composición de sus elementos bióticos y abióticos. En tanto que la perturbación crónica, ocurre durante un período de tiempo largo, cambiando la biodiversidad total dentro de un ecosistema [1].

La biodiversidad del suelo refleja la variedad de organismos vivos. Comprende innumerables organismos no visibles a simple vista, tales como los microorganismos (ej. bacterias, hongos, protozoarios y nematodos), la mesofauna (ej. ácaros y colémbolos) y la más reconocida macrofauna (ej. lombrices y termitas). Estos organismos interactúan entre sí, con las plantas y con la biota del ecosistema, formando un complejo sistema de actividad biológica. Los organismos del suelo aportan una serie de servicios fundamentales para la sostenibilidad de todos los ecosistemas. Actúan como agentes primarios para la conducción del ciclo de los nutrientes, la regulación de la dinámica de la materia orgánica del suelo, el secuestro del carbono en el suelo y las emisiones de gases de efecto invernadero. Estas características modifican la estructura física del suelo y el almacenamiento de agua, aumentando la cantidad y disponibilidad de nutrientes para la vegetación y salud de la planta. Estos servicios no sólo son esenciales para el funcionamiento de los ecosistemas naturales, sino que constituyen un recurso importante para la gestión sostenible de los sistemas agrícolas [2].

La macrofauna del suelo constituye un importante componente de los ecosistemas naturales y agroecosistemas, cumpliendo en ellos funciones primordiales tales como, la participación en la regulación de procesos como la fragmentación, descomposición de la materia orgánica y el reciclado de nutrientes, así como la modificación de la estructura del suelo y regulación de la actividad de otros organismos más pequeños [3].

En la actualidad, la fragmentación del hábitat es considerada una de las mayores amenazas para la biodiversidad y es un proceso complejo, donde la acción antrópica produce transformación de comunidades originales, introducción de cultivos generando sistemas homogéneos y más espacios en sucesión, afectando la composición de especies y las frecuencias de las mismas [4].

Si bien las propiedades físicas y químicas de los suelos se han usado tradicionalmente para diagnosticar la calidad y sanidad de los agroecosistemas, la disminución de la capacidad productiva y la fertilidad del suelo, también se pueden detectar por cambios en las poblaciones de los invertebrados edáficos. Al respecto, Paoletti y Bressan (1996) argumentaron que la distribución y abundancia de la fauna del suelo están determinadas por las características de los ecosistemas, relacionadas con la disponibilidad de nutrientes y alimento, la textura y porosidad del suelo, la retención de agua y la presencia y abundancia de predadores y parasitoides [5]. La magnitud de los efectos del uso del suelo sobre la edafofauna depende del tipo de uso, del sistema de siembra (convencional o directa), de la diversidad y rotación de cultivos, de los insumos utilizados y de las condiciones climáticas locales. Diferentes estudios demuestran que factores como la humedad, el contenido de materia orgánica, la compactación, la intensificación agrícola o el tipo de cobertura vegetal modifican significativamente la densidad, composición y distribución de las comunidades edáficas, las cuales seleccionan ambientes con coberturas capaces de disminuir los efectos de la temperatura y ofrecer disponibilidad de recursos alimenticios [3].

Para la captura de artrópodos epigeos, diversos métodos son utilizados en el análisis de la biodiversidad, siendo uno de ellos, el uso de trampas Pitfall. Éste es un método de bajo costo y de fácil uso. Los insectos colectados con mayor frecuencia pertenecen a las familias Carabidae, Staphylinidae, Elateridae y Scarabaeidae del orden Coleoptera; la familia Formicidae del orden Hymenoptera; las familias Gryllidae y Acrididae del orden Orthoptera y las familias Anisolabididae y Labiduridae del orden Dermaptera. Estos conforman un grupo muy importante en los agroecosistemas debido a que son parte de la artropofauna que interviene en el procesamiento de recursos vegetales, ciclos de nutrientes y red trófica existente [6].

A nivel mundial, existen numerosos análisis de la macrofauna del suelo en distintos sistemas naturales y agrícolas, ya sea considerando el conjunto de todos los taxa presentes, o aquellos enfocados hacia un grupo en particular, pero corresponden principalmente a zonas tropicales y templadas como Amazonia, América Central, Australia, Europa y África subsahariana. En la Argentina, los estudios referidos a la macrofauna en ecosistemas naturales y antropizados se restringen a algunas regiones como la Pampeana o se enfocan generalmente en un grupo taxonómico en particular, como lombrices de tierra, hormigas y coleópteros [7]. En la provincia de San Luis, existen numerosos estudios referidos a artrópodos subterráneos en referencia a gusanos del suelo (Coleoptera: Scarabaeidae y Elateridae) en diferentes condiciones agroecológicas de cultivo [8]-[10], mientras que, en maíz, son cuantiosos los aportes existentes en referencia a insectos que

pueden comportarse como plagas de la parte aérea [11] siendo escasa la información que haga referencia a la presencia de artrópodos epigeos.

En los ecosistemas naturales o con bajo nivel de disturbio, los artrópodos epigeos cumplen roles importantes en su funcionamiento. En estos ambientes, los organismos encuentran un hábitat adecuado para su desarrollo y juegan un papel fundamental en el ciclado de nutrientes, entre otras funciones. En algunos casos actúan como agentes de polinización y dispersión de semillas para un elevado número de plantas y pueden determinar, a través del consumo selectivo de algunas especies, la composición florística de la comunidad. También constituyen un importante recurso alimentario para diferentes grupos consumidores, en especial vertebrados [6].

En los sistemas agrícolas, la biodiversidad brinda servicios ecológicos como el reciclado de nutrientes, el control del microclima local, la regulación de procesos hidrológicos locales, la abundancia de organismos indeseables y la detoxificación de residuos de químicos nocivos [12].

El “maíz” *Zea mays* L. (Poaceae), es considerado de gran importancia económica a nivel mundial, ya sea como alimento humano, como alimento para el ganado o como fuente de un gran número de productos industriales. En la actualidad es el segundo cultivo del mundo por su producción, después del trigo, y el primer cereal en rendimiento de grano por hectárea [13]. En San Luis, es el segundo en importancia provincial luego de la soja [14]. Cuenta con una superficie sembrada de 536.000 ha aproximadamente para la campaña 2022/23, lo que implicaría un aumento del 4 % interanual y del 30 % con respecto al promedio histórico (2017-2021) [15].

Debido a su importancia, se han realizado numerosos trabajos sobre su entomofauna asociada. Sin embargo, pocos son los estudios de insectos de suelo comparados con los que habitan la planta, y usualmente dichas investigaciones están enfocadas en grupos taxonómicos específicos (por ejemplo, Carabidae), debido al mayor número de individuos encontrados [6].

ANTECEDENTES

A nivel internacional, investigaciones desarrolladas por Villalobos *et al.* (1999) en México, explican que existe evidencia que sugiere que la densidad y diversidad de la macrofauna del suelo es substancialmente menor en los agroecosistemas en comparación con ecosistemas menos perturbados, y que la mayor actividad biológica tiene lugar en los primeros 20 cm de profundidad del suelo [16].

Lima *et al.* (2007), evaluaron la diversidad de la macrofauna edáfica como indicadora de calidad de suelo en sistemas agroforestales en Brasil, concluyendo que los sistemas agroforestales presentaban los mayores valores de diversidad en relación a un área de agricultura de corte y quema y un bosque nativo [17].

En Uruguay, Zerbino (2010) evaluó la macrofauna del suelo en rotaciones cultivos-pasturas con laboreo convencional, siendo la intensidad de uso del suelo un factor determinante en los resultados obtenidos. El tratamiento S4 (rotación agricultura 33 % - pradera 66 %) registró los valores más altos de macrofauna del suelo, brindando las condiciones de hábitat más favorables, con mayor número de recursos a ser colonizados [18].

A nivel nacional, Almada (2014) en Santa Fe, define que sistemas de cultivos complejos albergan más especies de artrópodos que los hábitats agrícolas simplificados, y que los sistemas con asociaciones heterogéneas de plantas poseen más biomasa y recursos alimenticios, tendiendo hacia ambientes permanentes en el tiempo, estableciendo comunidades más estables que le confieren la propiedad de recuperarse más fácilmente después de una perturbación. De esta manera, determinó que los sistemas ganaderos y ambientes naturales mostraron mayor riqueza y diversidad de especies en relación a sistemas cultivados, siendo la densidad de individuos y de especies significativamente mayor en ambientes naturales, intermedia en los sistemas ganaderos (presión de disturbio menor) y menor en sistemas cultivados [4].

En concordancia a lo anteriormente expuesto, en determinaciones realizadas en La Pampa, Vilches (2010) afirma que una mayor heterogeneidad en los cultivos hace suponer que en ellos se establece una artropodofauna más diversa y/o abundante que en un monocultivo, y agrega que en este último la eliminación de la diversidad vegetal reduce las fuentes de alimento y refugio de los organismos fitófagos y de sus enemigos naturales, provocando un aumento de los daños producidos por insectos plaga [12].

En Buenos Aires, Díaz Porres *et al.* (2014) establecieron y analizaron las diferencias entre las comunidades de macroartrópodos de suelos con diferentes intensidades de uso. Concluyeron que la intensidad de uso del

suelo afecta la abundancia de varios grupos y la composición de la comunidad de macroartrópodos; que la densidad total de organismos y su riqueza disminuyen significativamente en los sistemas agrícolas y que ambas variables fueron mayores en los sitios naturalizados [3].

Un estudio realizado por Lietti *et al.* (2008) en Santa Fe, asegura que la densidad del total de artrópodos y predadores es mayor en siembra directa (con menor nivel de disturbio), en relación a la labranza convencional (con mayor nivel de disturbio). Concluyen que, en general, la densidad de los artrópodos fitófagos-detritívoros y predadores, las arañas y las larvas fitófagas-detritívoras (Diptera, Coleoptera y Lepidoptera) son significativamente mayores en cultivos con siembra directa [19].

En la provincia de San Luis, existen antecedentes referentes a la biodiversidad de artrópodos del suelo en diferentes condiciones de cultivo y con diferente metodología de muestro. Suárez (2016), monitoreo la entomofauna presente en un ambiente natural utilizando técnicas de muestreo de tipo exploratorias, entre ellas, las trampas de caída tipo Pitfall, concluyendo que el orden Coleoptera fue el taxón con mayor número de familias y especies representativas del lugar [20].

Bonivardo *et al.* (2015a) monitorearon artrópodos benéficos por medio de trampas Pitfall en 3 sectores dentro de un cultivo de alfalfa: loma, media loma y bajo, determinando que la riqueza específica de los artrópodos benéficos no guardó relación con las distintas condiciones de cultivo [21].

Bucci (2022) en un cultivo de soja al sur de Villa Mercedes, determinó la captura de controladores biológicos por medio de trampas Pitfall. Los resultados obtenidos posicionan al orden Coleoptera como el más diverso y abundante por sobre los demás órdenes [22].

En otro estudio, Bonivardo *et al.* (2015b) relevaron escarabeidos (Coleoptera) por medio de la extracción de tierra con el uso de una pala de punta, en ambientes con diferente nivel de disturbio: pastizal natural, pasto llorón y maíz y observaron que hubo una mayor diversidad en pasto llorón y maíz para el primer periodo de muestreo [23].

Mientras que Funes (2011), determinó la abundancia relativa de larvas de elatéridos (Coleoptera) en pastizal natural y pasto llorón, en el Área Medanosa con Pastizales e Isletas de Chañar. Concluyó que la abundancia relativa varió en función del mayor grado de disturbio del suelo, entendido el mismo como condiciones naturales del suelo o intervenido mediante siembras [24].

OBJETIVO GENERAL

Comparar la biodiversidad de familias de artrópodos del suelo en ambientes con diferente nivel de disturbio, en el Campo Experimental del Departamento de Ciencias Agropecuarias de la FICA-UNSL.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Identificar los especímenes recolectados hasta el rango taxonómico de familia.

Calcular y analizar los índices de biodiversidad que caractericen cada uno de los ambientes.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se enmarca dentro del Proyecto de Investigación PROICO 140520: "Sistema epidemiológico fitosanitario del cultivo de maíz en la región este de la provincia de San Luis, Argentina". Se llevó a cabo en el Predio del Campo Experimental del Departamento de Ciencias Agropecuarias de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias (FICA), de la Universidad Nacional de San Luis (UNSL), sito en Ruta Provincial 55 (ex 148), extremo norte de la Ciudad de Villa Mercedes, San Luis, Argentina, a los 33° 64' 09,84" de latitud sur y 65° 44' 62,40" de latitud norte Figura 1.



Figura 1. Departamento de Ciencias Agropecuarias de la FICA, UNSL (Google Maps, 2023).

Caracterización de la zona de estudio

El ensayo se realizó sobre suelo del orden Molisoles, Haplustol (gran grupo) éntico (subgrupo), familia franco gruesa, mixta, térmica, serie Villa Mercedes. El perfil modal es A-AC-C, el cual se caracteriza por tener bajos contenidos de materia orgánica, buena permeabilidad y drenaje. No presenta problemas de salinidad ni sodicidad [25].

Caracterización de los ambientes

Ambiente poco disturbado “Parque Botánico”

Se encuentra ubicado en la zona este del Departamento de Ciencias Agropecuarias de la FICA, UNSL Figura 2. Está representado por especies arbustivas y arbóreas, destacándose la presencia de especies herbáceas monocotiledóneas.



Figura 2. Parque Botánico del Departamento de Ciencias Agropecuarias de la FICA, UNSL (Casale, 2019).

Ambiente disturbado “Cultivo de maíz”

El material genético utilizado fue un DK70-10 RR2, sembrado a una distancia entre surcos de 0,52 m Figura 3. Es de ciclo corto, con perfil sanitario muy balanceado y una buena respuesta a vuelco, tolerante a Glifosato y recomendado como refugio estructurado para híbridos VT3P de ciclo corto y medio [26].



Figura 3. Cultivo de maíz en el Departamento de Ciencias Agropecuarias de la FICA, UNSL (Bonivardo, 2019).

Muestreos de artrópodos del suelo

Los muestreos se realizaron entre diciembre de 2018 y abril de 2019, en dos sitios: ambiente poco disturbado “Parque Botánico” y ambiente disturbado “Cultivo de maíz”. Se utilizó como técnica de muestreo trampas de suelo tipo Pitfall Figura 4, colocándose una trampa por sitio de muestreo, siendo su periodicidad quincenal. Las trampas fueron cebadas con alcohol al 50 % y transcurridos los 15 días, cada muestra era recolectada en un frasco de vidrio, rotulada y llevada al Laboratorio de Manejo Integrado de Problemas Fitosanitarios (MIPF) para su procesamiento. Finalmente, los artrópodos fueron trasvasados a frascos en alcohol al 70 %, identificados y almacenados en la colección entomológica de la asignatura Zoología Agrícola de la FICA-UNSL, donde se acondicionaron y montaron, según técnicas estandarizadas [27]. En cada fecha de monitoreo se recolectaron los datos y se registraron en planillas de campo.



Figura 4. Trampa Pitfall (Casale, 2019).

Identificación de los artrópodos del suelo

La identificación se realizó mediante comparación con muestras de la colección de la Asignatura Zoología Agrícola, comparación con imágenes de catálogos, uso de claves y por combinación de dos o más de estos procedimientos. Las claves utilizadas fueron: Cibrián *et al.*, 1995; Sáenz & Llana, 1990; White, 1983; Lorus & Milne, 1984; Borror & White, 1970; Cigliano y Lange, 1998; CSIRO, 1996; Coronado y Márquez, 1991; Da Costa Lima, 1940; Daly *et al.*, 1998; Flores, 1998; Gallo *et al.*, 1988; Lanteri *et al.*, 2002; Morrone y Posadas,

1998; Nickle, 1992 a y b; Palacios-Vargas, 1992; Paradell *et al.*, 2000; Roig-Juñent, 1998; Ross, 1973; y Willink, 1998.

Para la comparación con imágenes, se recurrió a sitios web de referencia, como la Sociedad Entomológica Argentina, Sociedad Entomológica Aragonesa, Bold Systems, Index to Organism Names (ION), Museu de Entomologia da ESALQ, New World Cerambycidae Catalog, Integrated taxonomic information system, Bug guide y la bibliografía disponible en la biblioteca de la asignatura Zoología Agrícola de la FICA-UNSL.

Índices de biodiversidad

Los índices de biodiversidad se calcularon y analizaron, a través de un análisis estadístico descriptivo, exploratorio e inferencial. Los datos se llevaron a planilla Excel y luego se migró la información para su análisis al programa InfoStat, versión 2020e, donde se cuantificó la biodiversidad evaluándola a través de la riqueza de familias (número de familias en la comunidad) y la abundancia jerarquizada (frecuencia o número de especímenes por familia) [28], [29].

Desde la simulación de remuestreo en InfoStat, se obtuvieron los parámetros de los índices de biodiversidad para cada ambiente.

La riqueza de familias de artrópodos permite describir la comunidad y la diversidad de los ambientes, constituyendo la base para la comparación entre sitios [30].

La abundancia es el número de individuos que componen cada taxón del ambiente, siendo la abundancia relativa (1), la proporción de un taxón respecto a todos los taxones contenidos en un sitio. Es un componente de biodiversidad y se refiere a cuan común o rara es una especie en comparación con otras especies en un mismo ambiente biológico o ubicación definida [31]. Se calcula dividiendo el número de individuos de un grupo (taxón) por el número total de especies de todos los grupos (taxones).

$$Abundancia\ Relativa = \frac{N^{\circ}\ de\ individuos\ de\ clase/orden/familia}{N^{\circ}\ total\ de\ individuos\ de\ clase/orden/familia} \times 100 \quad (1)$$

El comportamiento de la abundancia de las distintas familias en los ambientes de la comunidad, se denomina equitatividad. Es baja cuando hay una familia fuertemente dominante; mientras que, si no existe una familia dominante, la equitatividad es alta. Entonces, indica si la comunidad es dominada por la presencia de una o unas pocas familias, o bien si todas las familias se presentan en forma más o menos equitativa [28].

En referencia a los índices de diversidad de Shannon-Wiener y Simpson [32], el más común es el de la entropía de Shannon (Shannon y Wiener, 1949), se usa para caracterizar la diversidad de familias en ambientes, y tiene en cuenta tanto la abundancia como la equitatividad. Cuanto mayor es el valor del índice, más diversa es la comunidad. En la medida que la heterogeneidad aumenta, ya sea por un incremento en el número de familias y/o porque los individuos se distribuyen más equitativamente entre las familias, el valor del índice aumenta [33]. El índice de Shannon-Wiener (2) se expresa en la siguiente fórmula:

$$(Shannon - Wiener) = - \sum_{i=1}^n p_i * \ln p_i \quad (2)$$

Donde:

$p_i = n_i/N$,

n_i = abundancia para la familia i ,

N = Total de todas las familias, y

$\ln p_i$ = logaritmo natural de p_i .

El índice asume valores entre cero, cuando hay una sola familia, y el logaritmo de S , cuando todas las especies están representadas por el mismo número de individuos [$0 \leq H \leq \log S$] [33].

El índice de dominancia de Simpson – propuesto por Simpson (1949) – sugiere que una medida intuitiva de la diversidad de una población está dada por la probabilidad de que dos individuos tomados independientemente de una población pertenezcan a la misma especie. Se expresa con un número positivo, que en la mayoría de los ecosistemas naturales varía entre 0,5 y 5, aunque su valor normal está entre 2 y 3; valores inferiores a 2 se consideran bajos en diversidad y superiores a 3 son altos en diversidad de especies [32]. El índice de Simpson (3) se expresa en la siguiente fórmula:

$$(Simpson) D = \sum_{i=1}^r \frac{xi(xi - 1)}{to(to - 1)} \quad (3)$$

Donde:

r = número total de especies observadas en la muestra, y

to = número total de individuos o abundancia total en la muestra, y es = $\sum xi$.

El índice varía entre $1/r$ (menor concentración o máxima diversidad posible con r especies) y 1 (mayor concentración o mínima dispersión cuando una especie domina la comunidad) [32]. $[0,5 \leq D \leq 5]$

Finalmente, para conocer cuán estadísticamente significativa es la diferencia entre la biodiversidad de los artrópodos del suelo de los dos ambientes, se realizó la Prueba de Wilcoxon (Mann – Whitney U) [33].

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Identificación de los artrópodos del suelo

La identificación de los artrópodos del suelo recolectados hasta el rango taxonómico de familia en ambos ambientes, se muestran en la Tabla 1. Respecto a los órdenes Dermaptera, Isopoda, Araneae y a la clase Chilopoda, no se identificaron los ejemplares, debido a que se encontraban dañados en su morfología externa.

Tabla 1. Familias identificadas en ambos ambientes. Dpto. Cs. Agr. Período 2018/2019.

Orden	Familia	Orden	Familia
Coleoptera	Bostrichidae	Diptera	Calliphoridae
	Carabidae		Cecidomyiidae
	Coccinellidae		Drosophilidae
	Cucujidae		Muscidae
	Curculionidae		Phoridae
	Elateridae		Sarcophagidae
	Histeridae		Tachinidae
	Melyridae		Tephritidae
	Scarabaeidae		
	Silvanidae		
	Staphylinidae		
	Tenebrionidae		
Hemiptera	Cercopidae	Hymenoptera	Apidae
	Cicadellidae		Braconidae
	Cydnidae		Formicidae
	Geocoridae		Mutillidae
			Scelionidae
Orthoptera	Acrididae		Tiphiidae
	Gryllidae		Vespidae

Índices de biodiversidad

Durante todo el periodo de muestreo realizado en el área de estudio, se identificaron un total de 1.548 individuos.

Se recolectaron un total de 684 y 864 artrópodos, en los ambientes poco disturbado Tabla 1 y Figura 5 y disturbado Tabla 2 y Figura 6, respectivamente, siendo a su vez clasificados y graficados por clase, orden o familia.

Tabla 1. Artrópodos totales en el Ambiente 1 "Parque Botánico", según taxón. Dpto. Cs. Agr. Período 2018/2019.

Ambiente 1 "Parque Botánico"	
clase/orden/familia	N° de individuos
Formicidae	335
Araneae	53
Drosophilidae	47
Isopoda	41
Histeridae	37
Staphylinidae	26
Cicadellidae	24
Tephritidae	22
Muscidae	18
Bostrichidae	14
Scarabaeidae	10
Gryllidae	9
Sarcophagidae	7
Tenebrionidae	6
Callyphoridae	6
Elateridae	5
Cucujidae	4
Mutilidae	4
Curculionidae	3
Silvanidae	3
Phoridae	2
Chilopoda	1
Diplopoda	1
Carabidae	1
Melyridae	1
Cecidomyiidae	1
Cercopidae	1
Cydnidae	1
Geocoridae	1

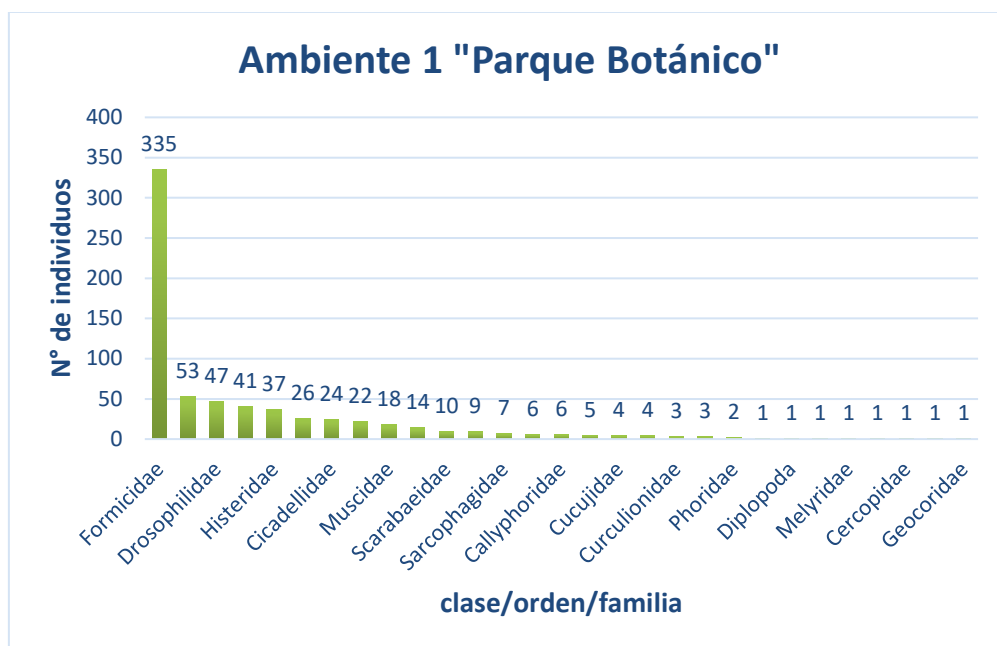


Figura 5. Artrópodos totales en el Ambiente 1 "Parque Botánico", según taxón. Dpto. Cs. Agr. Período 2018/2019.

En la Figura 5 se evidencia una dominancia absoluta de la familia Formicidae, encontrándose en segundo lugar al orden Araneae, seguido de la familia Drosophilidae.

Tabla 2. Artrópodos totales en el Ambiente 2 "Cultivo de maíz", según taxón. Dpto. Cs. Agr. Período 2018/2019.

Ambiente 2 "Cultivo de maíz"	
Clase/Orden/Familia	N° de individuos
Staphylinidae	235
Formicidae	215
Apidae	159
Histeridae	58
Callyphoridae	27
Phoridae	27
Araneae	23
Drosophilidae	21
Scarabaeidae	15
Bostrichidae	13
Tenebrionidae	9
Dermaptera	8
Isopoda	7
Elateridae	6
Muscidae	6
Gryllidae	5
Cicadellidae	4
Geocoridae	3
Mutillidae	3
Chilopoda	2
Cucujidae	2
Curculionidae	2
Melyridae	2

Acrididae	2
Scelionidae	2
Vespidae	2
Carabidae	1
Coccinellidae	1
Silvanidae	1
Tachinidae	1
Braconidae	1
Tiphiidae	1

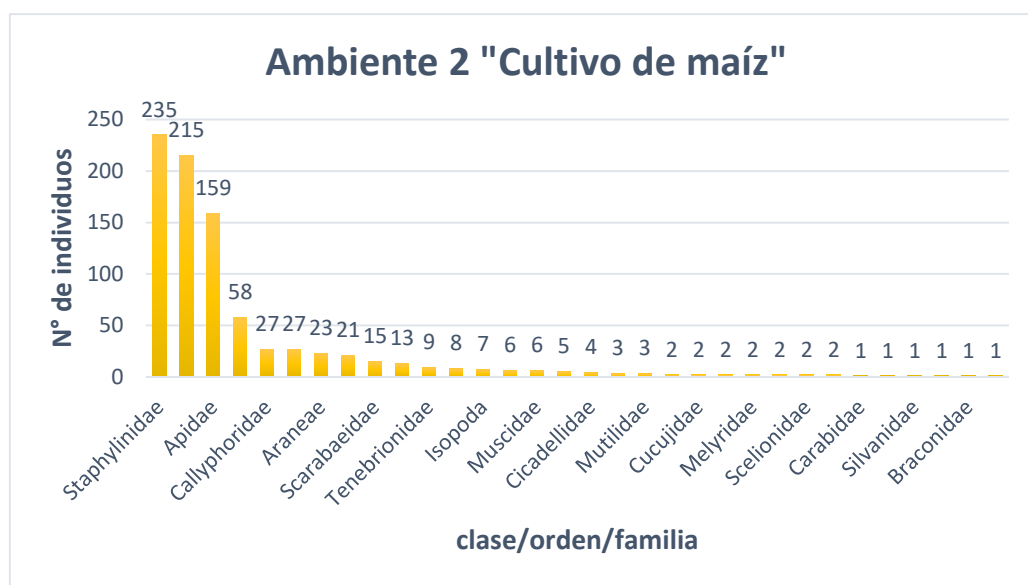


Figura 6. Artrópodos totales en el Ambiente 2 "Cultivo de maíz", según taxón. Dpto. Cs. Agr. Período 2018/2019.

En la Figura 6 se evidencia una dominancia absoluta de la familia Staphylinidae, seguida de las familias Formicidae y Apidae.

Tanto en el Ambiente 1 como en el Ambiente 2, el orden Coleoptera fue el más diverso, coincidiendo con lo obtenido por Bonivardo *et al.* (2015a), Suárez (2016) y Bucci (2022).

En la Tabla 3 se resumen las abundancias absoluta, relativa y total, clasificadas según la taxonomía de los artrópodos.

Tabla 3. Abundancia absoluta, relativa y total de los artrópodos. Dpto. Cs. Agr. Período 2018/2019.

Clase/Orden/Familia	Ambiente 1 (A1): Parque Botánico		Ambiente 2 (A2): Cultivo de maíz		Abundancia Absoluta total A1+A2
	Abundancia Absoluta	Abundancia Relativa (%)	Abundancia Absoluta	Abundancia Relativa (%)	
Araneae	53	7,75	23	2,66	76
Chilopoda	1	0,146	2	0,23	3
Dermaptera	0	0	8	0,926	8
Diplopoda	1	0,146	0	0	1
Isopoda	41	6	7	0,81	48
Bostrichidae	14	2,05	13	1,5	27
Carabidae	1	0,146	1	0,116	2
Coccinellidae	0	0	1	0,116	1

Cucujidae	4	0,58	2	0,23	6
Curculionidae	3	0,44	2	0,23	5
Elateridae	5	0,73	6	0,69	11
Histeridae	37	5,4	58	6,71	95
Melyridae	1	0,146	2	0,23	3
Scarabaeidae	10	1,46	15	1,736	25
Silvanidae	3	0,44	1	0,116	4
Staphylinidae	26	3,8	235	27,2	261
Tenebrionidae	6	0,877	9	1,04	15
Callyphoridae	6	0,877	27	3,125	33
Cecidomyiidae	1	0,146	0	0	1
Drosophilidae	47	6,87	21	2,43	68
Muscidae	18	2,63	6	0,69	24
Phoridae	2	0,29	27	3,125	29
Sarcophagidae	7	1,02	0	0	7
Tachinidae	0	0	1	0,116	1
Tephritidae	22	3,216	0	0	22
Cercopidae	1	0,146	0	0	1
Cicadellidae	24	3,5	4	0,46	28
Cydnidae	1	0,146	0	0	1
Geocoridae	1	0,146	3	0,347	4
Apidae	0	0	159	18,4	159
Braconidae	0	0	1	0,116	1
Formicidae	335	48,98	215	24,88	550
Mutillidae	4	0,58	3	0,347	7
Scelionidae	0	0	2	0,23	2
Tiphiidae	0	0	1	0,116	1
Vespidae	0	0	2	0,23	2
Acrididae	0	0	2	0,23	2
Gryllidae	9	0	5	0,58	14
Total	684		864		1548

La mayor abundancia relativa de artrópodos en el ambiente 1 correspondió a la familia Formicidae, con 48,98 %, correspondiendo en el ambiente 2 a la familia Staphylinidae, con 27,2 %.

Se obtuvieron los parámetros de simulación de Bootstrap para los índices de biodiversidad en la Tabla 4, detallando sus intervalos (IC) con un nivel de confianza del 95 % para cada ambiente y se graficaron los más relevantes para el estudio Figura 7.

Tabla 4. Simulación de Bootstrap para cada ambiente. Dpto. Cs. Agr. Período 2018/2019 (InfoStat, 2023).

	Índice Shannon-Wiener	Índice Simpson
Ambiente 1	2,03	0,27
Ambiente 2	2,17	0,18

$$A_1 \quad P[1,73 \leq H1 \leq 2,17] = 0,95$$

$$P[0,18 \leq D1 \leq 0,36] = 0,95$$

$$A_2 \quad P[1,76 \leq H2 \leq 2,28] = 0,95$$

$$P[0,14 \leq D2 \leq 0,29] = 0,95$$

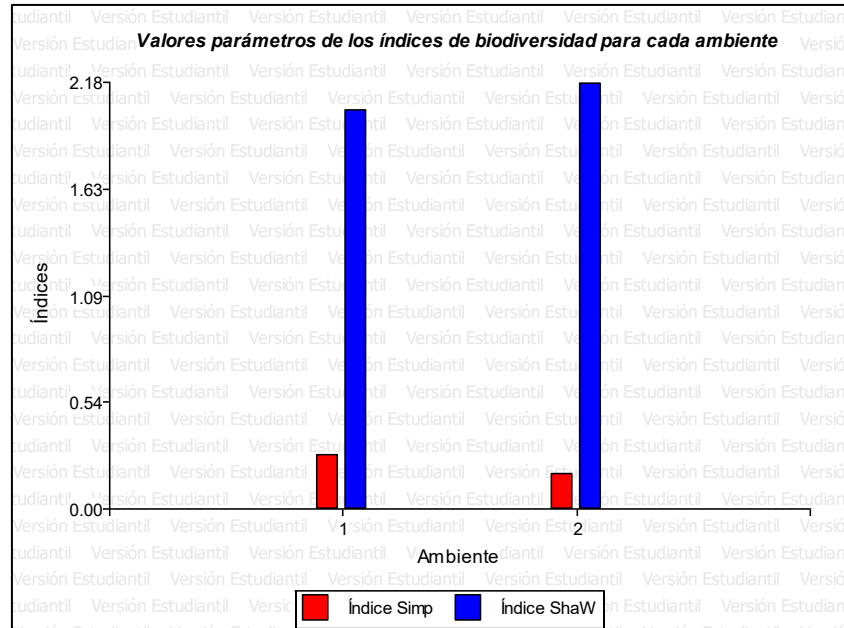


Figura 7. Parámetros de los índices de biodiversidad para cada ambiente. Dpto. Cs. Agr. Período 2018/2019 (InfoStat, 2023).

Se registraron y analizaron los estimadores puntuales de los índices de biodiversidad obtenidos Tabla 5 y se graficaron Figs. 8 y 9.

Tabla 5. Índices de biodiversidad para cada ambiente y fecha de monitoreo. Dpto. Cs. Agr. Período 2018/2019 (InfoStat, 2023).

Ambiente 1	Índice Shannon-Wiener	Índice Simpson
27/12/2018	1,44	0,40
11/01/2019	1,97	0,23
25/01/2019	1,75	0,23
07/02/2019	1,69	0,28
21/02/2019	1,84	0,23
07/03/2019	1,44	0,31
21/03/2019	1,03	0,49
Ambiente 2	Índice Shannon-Wiener	Índice Simpson
27/12/2018	1,84	0,27
11/01/2019	1,86	0,22
25/01/2019	1,90	0,22
07/02/2019	1,71	0,26
21/02/2019	0,55	0,79
07/03/2019	1,53	0,33
21/03/2019	1,15	0,29

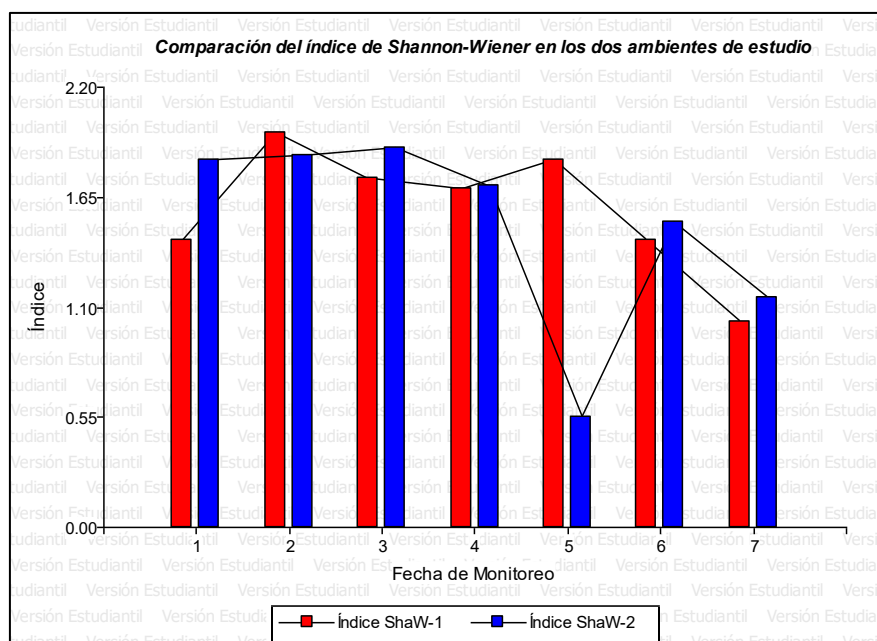


Figura 8. Índice de Shannon-Wiener para cada ambiente. Dpto. Cs. Agr. Período 2018/2019 (InfoStat, 2023).

La Figura 8 muestra la comparación de valores de índice de Shannon-Wiener para cada fecha de monitoreo en donde no se evidencian grandes diferencias entre los ambientes, a excepción de la fecha 5 (21/02/2019). Esto tendría explicación en que para esa fecha se recolectaron individuos de unas pocas familias, siendo una de ellas altamente dominante en relación al resto (ambiente 2).

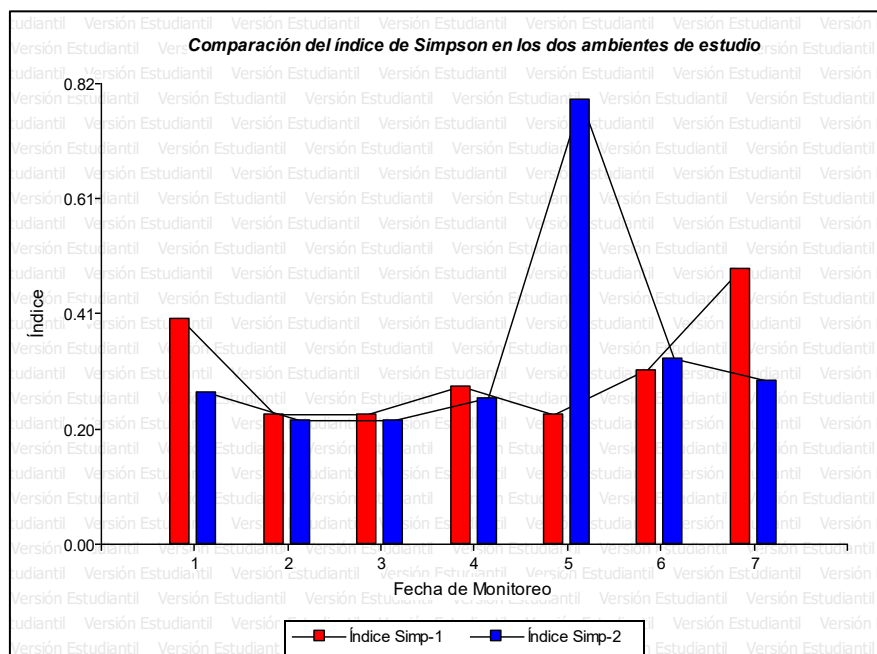


Figura 9. Índice de Simpson para cada ambiente. Dpto. Cs. Agr. Período 2018/2019 (InfoStat, 2023).

En la Figura 9 se observa una diferencia significativa en la fecha de monitoreo 5 para el Ambiente 2, pero de manera contraria. En este caso, esto se podría explicar entendiendo que el índice de Simpson es un índice de dominancia más que de diversidad.

El cumplimiento sobre el supuesto del comportamiento de los datos se evaluó mediante la Prueba de Normalidad de Shapiro-Wilks:

Variable	n	Media	D.E.	W*	p
Clase/Orden/Familia	165	9,33	21,32	0,43	<0,0001

Debido a que no se cumple el supuesto de normalidad y para saber cuán significativa es la diferencia entre la diversidad de artrópodos del suelo de los dos ambientes, se utilizó la prueba no paramétrica de Wilcoxon para dos muestras independientes, determinándose el estadístico "W".

Prueba de Wilcoxon para muestras independientes – Índice de Shannon-Wiener

Clasific	Variable	R-media(1)	R-media(2)	W	p(2 colas)
Ambientes	IndiceShaW	7,36	7,64	51,50	0,8981

Prueba de Wilcoxon para muestras independientes – Índice de Simpson

Clasific	Variable	R-media(1)	R-media(2)	W	p(2 colas)
Ambientes	IndiceSimp	7,86	7,14	55,00	0,7480

Los resultados de la prueba indican que, tanto para el índice de Shannon-Wiener como para el índice de Simpson, los ambientes no difieren significativamente entre sí (p-valor > 0,05).

Al no existir diferencias significativas entre la biodiversidad de artrópodos del ambiente poco disturbado y disturbado, se discrepa con lo expresado por Villalobos *et al.* (1999), Zerbino (2010), Almada (2014), Vilches (2010), Díaz Porres *et al.* (2014) y Lietti *et al.* (2008), los cuales coinciden de diferentes maneras en que, ambientes poco disturbados poseen mayor biodiversidad de artrópodos en relación a ambientes disturbados.

No se coincide con las afirmaciones de Lima *et al.* (2007), quienes ubican a los sistemas agroforestales como aquellos con una biodiversidad superior en comparación con un bosque nativo y una agricultura de corte y quema, así como también con lo expuesto por Bonivardo *et al.* (2015b) en donde evidenciaron una mayor diversidad de escarabeidos (Coleoptera) en pasto llorón y maíz, en detrimento de un pastizal natural, en un primer periodo de muestreo, ni con Funes (2011), quien observó presencia de larvas de Elateridae en suelos con mayor grado de disturbio.

CONCLUSIÓN

De los artrópodos capturados e identificados se concluye que el orden Coleoptera fue el más diverso en términos de cantidad de familias totales encontradas, mientras que Hymenoptera fue el más abundante en términos de cantidad de individuos totales encontrados.

La familia Formicidae fue la más numerosa en todo el ensayo.

El ambiente disturbado fue el que presentó la mayor cantidad de artrópodos a lo largo del período de monitoreo.

No se encontraron diferencias significativas en cuanto a biodiversidad de artrópodos entre los ambientes poco disturbado y disturbado.

El trabajo representa una contribución al estudio de la biodiversidad de artrópodos en la provincia de San Luis. Se enfatiza en la necesidad de continuar con estudios que permitan comprender su impacto en los ambientes estudiados.

REFERENCIAS

- [1] Dale, V.H.; Joyce, L.A.; McNulty, S.; Neilson, R.P.; Ayres, M.P.; Flannigan, M.D.; Hanson, P.J.; Irland, L.C.; Lugo, A.E.; Peterson, C.J.; Simberloff, D.; Swanson, F.J.; Stocks, B.J. y Wottom, B. M. (2001).

Climate Change and Forest Disturbances: Climate change can affect forests by altering the frequency, intensity, duration, and timing of fire, drought, introduced species, insect and pathogen outbreaks, hurricanes, windstorms, ice storms, or landslides. BioScience, 51, 723-734.

- [2] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. *La biodiversidad del suelo*. Simposio Mundial sobre la Biodiversidad del Suelo. Simposio virtual. Fecha de consulta: 3 de octubre de 2023. En: <https://www.fao.org/about/meetings/soil-biodiversity-symposium/es/>
- [3] Díaz Porres, M.; Rionda, M.H.; Duhour, A.E. y Momo, R.F. (2014). *Artrópodos del suelo: Relaciones entre la composición faunística y la intensificación agropecuaria*. Ecología Austral, 24, 327-334.
- [4] Almada, M.C. (2014). Tesis doctoral: *Biodiversidad y densidad de arañas (Araneae) en un sistema agropastoril, tendientes a mejorar el impacto de los enemigos naturales sobre insectos plaga*. Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata.
- [5] Paoletti, M.G. y Bressan, M. (1996). *Soil invertebrates as bioindicators of human disturbance*. Critical Reviews in Plant Sciences, 15, 21-62.
- [6] Livia, C.; Sánchez, G. y Cruces, L. (2020). *Diversidad de insectos del suelo asociados al cultivo de maíz (Zea mays L.) en La Molina, Lima, Perú*, Ecología Aplicada, 19(2), 57-64.
- [7] Gómez Pamies, D.F.; Godoy, M.C. y Coronel, J.M. (2015). *Macrofauna edáfica en ecosistemas naturales y agroecosistemas de la ecorregión Esteros del Iberá (Corrientes, Argentina)*. Ciencia del Suelo (Argentina), 34(1), 43-56.
- [8] Funes, B. (2007). Tesis de grado: *Identificación de larvas de "Gusanos Alambre" (Coleoptera: Elateridae)*. Facultad de Ingeniería y Ciencias Económico Sociales, Universidad Nacional de San Luis.
- [9] Perassi Mana, G. (2016). Tesis de grado: *Diversidad específica y niveles poblacionales de "Gusanos Blancos" (Coleoptera: Scarabaeidae) en distintos sistemas productivos, en dos zonas del este de la provincia de San Luis*. Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de San Luis.
- [10] Pollacchi, E. (2008). Tesis de grado: *Identificación de larvas del complejo de "Gusanos Blancos" (Coleoptera: Scarabaeidae), de la región agrícola-ganadera centro-este de la provincia de San Luis*. Facultad de Ingeniería y Ciencias Económico Sociales, Universidad Nacional de San Luis.
- [11] Funes, B.; Gatafoni, N.; Núñez, M.; Patricelli, M.; Senilliani, L. y Martínez, N. (2022). *Determinación de incidencia y severidad de insectos de importancia regional en híbridos de maíz en San Luis, Argentina*. Libro de resumen XVII Jornadas Fitosanitarias Argentinas.
- [12] Vilches, J.Y. (2010). Tesis de grado: *Estimación de la biodiversidad de Araneidos (Arthropoda: Queliceriformes) y Formícidos (Insecta: Hymenoptera) en cultivos de soja y maní de un sitio de la Ecorregión Pampeana*. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de La Pampa.
- [13] Golik, S.I.; Larran, S.; Gerard, G.S. y Fleitas, M.C. (2018). *Maíz: Importancia, origen, sistemática, morfología y composición química*. En M.R. Simón y S.I. Golik (coord.), Cereales de verano (10-25). La Plata, Buenos Aires.
- [14] Colazo, J.C. y Rivarola, R. (2015). *Producción de maíz en la provincia de San Luis*. En J.A. Garay y J.C. Colazo (Eds.), El cultivo de maíz en San Luis. INTA Ediciones. San Luis.
- [15] Bolsa de Cereales de Córdoba. (2023). *San Luis: El efecto de la sequía y la helada causaría graves pérdidas en los cultivos*. Agrositio. Fecha de consulta: 5 de agosto de 2023. En: <https://www.agrositio.com.ar/noticia/228030-san-luis-el-efecto-de-la-sequia-y-la-helada-causaria-graves-perdidas-en-los-cultivos.html>.
- [16] Villalobos, F.J.; Ortiz-Pulido, R.; Moreno, C.; Pavón-Hernández, N.P.; Hernández-Trejo, H.; Bello, J. y Montiel, S. (1999). *Patrones de la macrofauna edáfica en un cultivo de Zea mays durante la fase postcosecha en "La Mancha", Veracruz, México*. Acta Zool. Mex, 80, 167-183.
- [17] Lima, S.S.; Aquino, A.M.; Leite, L.F.; Silva, P.H.S.; Castro, A.A. y Oliveira, F. (2007). *Diversidade da macrofauna edáfica em agroflorestas de diferentes estádios sucessionais*. Revista Brasileira de Agroecologia/out, 2007, 2 (2).

- [18] Zerbino, M.S. (2010). *Evaluación de la macrofauna del suelo en rotaciones cultivos-pasturas con laboreo convencional*. Acta Zoológica Mexicana (nueva serie), 2, 189-202.
- [19] Lietti, M.; Gamundi, J.C.; Montero, G.; Molinari, A. y Bulacio, V. (2008). *Efecto de dos sistemas de labranza sobre la abundancia de artrópodos que habitan en el suelo*. Ecología Austral, 18, 71-87.
- [20] Suárez, A. (2016). *Tesis de grado: Contribución al conocimiento de la entomofauna del centro oeste de la provincia de San Luis*. Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de San Luis.
- [21] Bonivardo, S.L.; Martínez, A.N.; Basconcello, J.; Bosco, A. y Pérez Quinteros, M. (2015a). *Artrópodos (perjudiciales y benéficos) y malezas en el primer año de implantación de alfalfa, en la provincia San Luis*. Revista FAVE – Ciencias Agrarias, 14 (2).
- [22] Bucci, B. (2016). *Tesis de grado: Efecto de las variables biológicas y antropogénicas sobre las poblaciones de orugas defoliadoras presentes en el cultivo de soja Glycine max (L.) Merrill en la región centro de la provincia de San Luis*. Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de San Luis.
- [23] Bonivardo, S.L.; Martínez, A.N.; Perassi Magna, G. y Pérez Suárez, A. (2015b). *Relevamiento de escarabeidos (Insecta, Coleoptera) en pastizal natural, pasto llorón y maíz, en el este de la provincia de San Luis (Argentina)*. Revista FAVE – Ciencias Agrarias, 14 (2).
- [24] Funes, B. (2011). *Tesis de posgrado: Determinación taxonómica y abundancia relativa de géneros de Coleoptera Elateridae en el Área Medanosa de Pastizales e Isletas de Chañar en la provincia de San Luis (Argentina)*. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Católica de Córdoba.
- [25] Peña, C.; D'Hiriart, A.; Aguirre, E.; Demmi, M.; Elizondo, J.; García, S. y Pascuarelli, A. (2006). *Carta de suelos de la República Argentina, hoja Villa Mercedes. Provincia de San Luis, escala 1: 100.000*. EEA INTA San Luis.
- [26] Agro Noble. (s.f.). DK70-10. Fecha de consulta: 15 de septiembre de 2023. En: <http://www.agronoble.com.ar/dk70-10/>.
- [27] Martínez, A.N.; Funes, M.B. y Suárez, A.R. (2015). *Guía teórico-práctica Zoología Agrícola: Caza y conservación*. Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de San Luis.
- [28] Magurran, A.E. (2004). *Measuring Biological Diversity*. Blackwell Publishing, U. K., 256 pp.
- [29] Di Rienzo J.A.; Casanoves F.; Balzarini M.G.; Gonzalez L.; Tablada M.; Robledo C.W. (2008). *InfoStat, versión 2008*, Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- [30] Peñaloza, O.A.; Corronca, J. y Balzarini, M. (2012). *Descripción de artrópodos epigeos en dos ambientes del Parque Nacional Talampaya, La Rioja, Argentina*. UNLaR Ciencia, 1(3), 17-23.
- [31] Loáisiga Jarquín, F. y Jiménez Martínez, E. (2022). *Abundancia, riqueza y diversidad de insectos asociados al cultivo de maracuyá (Passiflora edulis Sims) en Matagalpa, Nicaragua*. La Calera, 22(39).
- [32] Balzarini M.G.; Gonzalez L.; Tablada M.; Casanoves F.; Di Rienzo J.A.; Robledo C.W. (2008). *Manual del Usuario*, Editorial Brujas, Córdoba, Argentina. 336 pp.
- [33] Magurran, A.E. (1988). *Ecological diversity and its measurement*. Princeton University Press, New Jersey. 179 pp.

Efecto de *Dichelops furcatus*, *Spodoptera frugiperda* y *Helicoverpa zea* en maíz tardío

Effect of *Dichelops furcatus*, *Spodoptera frugiperda* and *Helicoverpa zea* on late corn

Silvia Liliana Bonivardo, María Belén Funes, María Cecilia Sosa, María Alicia Cendoya y Milena Godoy

Universidad Nacional de San Luis – Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias – Departamento de Ciencias Agropecuarias

sbonivardo@gmail.com, mariabelenfunes@gmail.com, abacaceci@gmail.com, malicia.cendoya@gmail.com

CientíFICA N°2

Año: 2025

pp. 58 – 64

Historial del Artículo

Recibido:

16/04/2024

Enviado revisión:

25/04/2024

Aceptado:

10/10/2025

ARK CAICYT:

<https://id.caicyt.gov.ar/ark:/s30089042/k7r9aca1a>

Área temática:

Sistemas agropecuarias

Palabras Claves:

Corn, *Dichelops furcatus*, *Spodoptera frugiperda*, *Helicoverpa zea*

Keywords:

agricultural systems

Resumen: El ataque de artrópodos en siembra tardía de maíz, se acentúa por el aumento en las poblaciones. El objetivo fue evaluar la incidencia y severidad de *Dichelops furcatus*, *Spodoptera frugiperda* y *Helicoverpa zea*, en un híbrido de maíz mejorado genéticamente (MG), en siembras tardías a campo. El muestreo fue realizado lote de 27 ha de maíz con tecnología MG en los primeros días de diciembre. Desde la emergencia, se evaluó a *D. furcatus* con la escala de daño de Flores, 2012; desde V4 del cultivo y hasta el final del estado vegetativo VT se evaluó *S. frugiperda* usando la escala de Fernández y Expósito (2000) y para la evaluación de *H. zea* se contó el número de oviposiciones por espiga y al final del ciclo el daño en espiga contando número de granos faltantes. Los resultados muestran que: para *D. furcatus* la incidencia fue de 17 % y el 98% de las plantas con una severidad grado 1; *S. frugiperda* no estuvo presente en el cultivo y *H. zea* presentó 56% de las espigas con oviposiciones y el daño en espiga tuvo 75% de incidencia y 7,08% de severidad. Los resultados permiten concluir que en el maíz con tecnología MG, en siembra tardía en el oeste del Departamento Río Cuarto (Cba), las especies de lepidópteros que afectan al cultivo de maíz, no siempre se convierten en plaga.

Abstract: The attack of arthropods in late corn planting is accentuated by the increase in populations. The objective was to evaluate the incidence and severity of *Dichelops furcatus*, *Spodoptera frugiperda* and *Helicoverpa zea*, in a genetically modified (GM) corn hybrid, in late field sowings. Sampling was carried out on a plot of 27 hectares of corn with GM technology in the first days of December. Since the emergency, *D. furcatus* was evaluated with the damage scale of Flores, 2012; From V4 of the crop and until the end of the vegetative state VT, *S. frugiperda* using the scale of Fernández and Expósito (2000) and for the evaluation of *H. zea* the number of ovipositions per ear was counted and at the end of the cycle the damage to the ear was counted by counting the number of missing grains. The results show that: for *D. furcatus* the incidence was 17% and 98% of the plants had grade 1 severity; *S. frugiperda* was not present in the culture and *H. zea* 56% of the spikes presented with oviposition and spike damage had a 75% incidence and 7.08% severity. The results allow us to conclude that in corn with GM technology, in late sowing in the west of the Río Cuarto Department (Cba), the lepidoptera species that affect the corn crop do not always become pests.

INTRODUCCIÓN

El maíz es ampliamente cultivado en todo el mundo, es un cultivo versátil que se utiliza tanto como alimento para humanos y animales como en la industria. Es el tercer cultivo más importante en el mundo en términos de producción, solo superado por el trigo y el arroz en cuanto a volumen de producción. El cultivo de maíz surge como un componente que, integrado a otros, tiene una contribución sustancial al funcionamiento y mantenimiento de la calidad de los recursos y potencial productivo de nuestros suelos [1].

La elección de fecha de siembra tardía en el cultivo de maíz, se ha generalizado como una herramienta para diversificar el periodo crítico, para sembrar lotes con agua útil a la siembra o para sembrar ambientes que por sus génesis tienen poca capacidad de retener agua, aunque llueva, como son los suelos con alto contenido de arena. Las zonas donde más se ha generalizado esta alternativa, son norte y suroeste de Córdoba, La Pampa, San Luis, y oeste de Buenos Aires. En Ensayos Comparativos de Rendimiento realizados en la zona central y sur de Córdoba, se observaron aumentos en los rindes promedios de entre 7.112 kg/ha y 9.000 kg/ha con picos de 14.000 kg/ha aproximadamente [2].

En las siembras tardías de maíz, el ataque de artrópodos en general se acentúa ya que las condiciones ambientales favorecen el desarrollo de los mismos, provocando un aumento en las poblaciones y como consecuencia los daños que pueden realizar.

Entre las especies de importancia por el daño que causan en etapa vegetativa se encuentran las que son problema durante la emergencia, *Dichelops furcatus*, “chinche de los cuernos”, con posterioridad y durante todo el ciclo del cultivo *Spodoptera frugiperda*, “oruga militar tardía o cogollero” y en etapa reproductiva, *Helicoverpa zea*, “Isoca de la espiga”.

Entre los múltiples beneficios de la práctica de la siembra directa, está la de la presencia de residuos vegetales (cobertura) y la estabilidad del suelo, lo que hace que cambien las características físico químicas del mismo, como así también numerosos parámetros biológicos favoreciendo la presencia de insectos y otros organismos asociados al suelo, muchos de los cuales son dañinos al cultivo que allí se implanta [3]. En la campaña 2001-2002 la chinche marrón, *D. furcatus* “chinche de los cuernos” ha provocado daños que han alcanzado hasta el 30% de las plantas jóvenes de maíz en varias localidades en el centro de Córdoba (La Carlota, Rio Cuarto, Hernando). Las plántulas de maíz atacadas por chinches presentan luego del ataque síntomas muy característicos, como un crecimiento anormal de las hojas y perforaciones simétricas. Estas presentan bordes amarillentos (diferentes a los que provocan los insectos masticadores), se originan por la introducción de toxinas cuando el insecto se alimenta con sus estiletes bucales en las hojas pequeñas aun envainadas del maíz. El ataque de chinches en maíz joven, puede producir la aparición de macollos que afectan el posterior desarrollo del tallo principal. Los lotes más afectados tenían rastrojo de soja debajo del cual las chinches se refugiaban durante los meses de invierno [3]. Es una especie considerada plaga desde inicio del ciclo del cultivo, ya que inyecta toxinas en el tallo de las plántulas durante su proceso de alimentación causando reducción del stand o perjudicando el vigor [4]. Los daños de chinche de los cuernos en maíz se ponen de manifiesto por el retorcimiento de plántulas o de plantas jóvenes, detención del crecimiento, y hasta muerte de las mismas por ataques intensos en los estados más susceptibles. Las plántulas que no mueren, si bien luego alcanzan a recuperarse parcialmente, por el retraso producido en su desarrollo a su vez sufrirán la competencia de las plantas circundantes, todo lo cual disminuirá su potencial productivo [5]. En la campaña 2007-2008, se reportaron lotes con daños de diferente intensidad causado por *D. furcatus* en el cultivo de maíz [6]- [7]. En la zona de Villa Mercedes durante la campaña 2014/2015 se evaluó el daño a nivel de ensayo y la incidencia fue del 3% y la mortandad de plantas fue del 50% correspondiendo sólo al grado 4 [8].

El daño ocasionado por las larvas de *S. frugiperda*, durante los primeros días de desarrollo de la planta puede ser de dos tipos, cortando la planta cerca del suelo, o desfoliándola parcial o totalmente, lo que puede causar la muerte de la planta si afectó al meristema apical. Durante el periodo subsiguiente de desarrollo vegetativo (6 hojas en adelante) el daño generalmente se circunscribe al cogollo. Las larvas recién nacidas se alimentan de la epidermis de las hojas y se dispersan dentro de hojas y vainas. Al crecer las larvas comienzan a provocar perforaciones en las hojas y finalmente en los últimos estadios larvales se alimentan de las hojas enrolladas del cogollo, donde producen perforaciones transversales que debilitan y quiebran las hojas perdiendo su parte distal. En la última etapa del cultivo, puede afectar la panoja, estigmas y, granos. Los maíces cultivados en las zonas cálidas, son los más afectados por esta plaga [9]. Se ha convertido en una plaga constante en los maíces tardíos de la región centro. Esto llevó a que en los últimos años se vuelva foco de investigaciones y desarrollo tecnológico tanto en el sector público como privado. Las probabilidades de pérdidas económicas asociadas a esta plaga se incrementan en la medida en que la fecha de siembra se atrasa. La aclimatación

de esta especie ha permitido que su distribución geográfica sea amplia y que el esfuerzo de monitoreo para la detección temprana se magnifique. En la campaña 2017/18 se llevó a cabo un seguimiento en lotes de producción comercial y experimentales de INTA Marcos Juárez. Se realizó el monitoreo en lotes sembrados con maíz no Bt a fines de evaluar la infestación sin interferencia del control por transgénesis. En siembras de inicio de noviembre no se detectaron ataques tempranos hasta V6 en el cual se manifestó la plaga con un nivel de daño muy bajo, con una incidencia menor al 1% de plantas atacadas y sin presencia de orugas. Para maíces sembrados hacia fines de noviembre el daño se hizo manifiesto en V2, se encontró un 2% de plantas con daño no significativo sin presencia de orugas. En los maíces sembrados durante la segunda quincena de diciembre el daño comenzó a detectarse con un 5% de plantas atacadas y orugas presentes a partir de V2 y hasta V4. A partir de inicios del mes de enero comienza a incrementarse el vuelo de hembras adultas debido a las altas temperaturas y las poblaciones, comienzan a sucederse a intervalos más cortos, en un estadio fenológico de 7 hojas completamente expandidas o posterior, el nivel de daño alcanzado estuvo en torno a 20% de plantas atacadas con daño significativo y orugas presentes. En lotes experimentales muy tardíos sembrados durante la primera quincena de enero la infestación hacia mediados de febrero superó el 90% de plantas atacadas [10].

La hembra de *H. zea* deposita los huevos sobre los estigmas de la inflorescencia de maíz. Al nacer, las larvas se alimentan de ellos produciendo el corrimiento de granos por falta de polinización de óvulos y más adelante lo hacen de los granos en los estados lechoso y pastoso. Al cabo de cinco o seis estadios larvales los individuos se dirigen al suelo donde, tras un breve período de prepupa, pasan a empupar. El adulto, una polilla robusta de unos 2,5 cm de largo y 4 cm de envergadura alar, es de hábitos nocturnos y se alimenta de néctar. Es una especie que realiza su daño en las espigas de maíz y debido a esto escapa al control químico si no es realizado en el momento adecuado, el cual suele presentar eficiencias erráticas. Consecuencia del daño de *H. zea*, no sólo es la pérdida de rendimiento, sino también el ingreso de hongos a partir del daño y el desarrollo de micotoxinas a partir de esta situación a campo. El tipo de tecnología del híbrido resulta crucial en su control ya que es prácticamente la única herramienta que se posee para minimizar su impacto [9]-[11].

La determinación del daño que una plaga puede ocasionar a un cultivo varía en función de la densidad poblacional de la plaga, los factores ambientales y el comportamiento del híbrido [12].

El objetivo del trabajo fue evaluar la incidencia y severidad de *Dichelops furcatus* “chinche de los cuernos”, *Spodoptera frugiperda* “oruga militar tardía o cogollero” y *Helicoverpa zea* “isoca de la espiga”, en un híbrido de maíz Bt, en siembras tardías en condiciones a campo.

MATERIALES Y MÉTODOS

La evaluación fue realizada durante la campaña 2019/2020 en un establecimiento agropecuario de la zona rural de Chaján, al oeste del departamento de Río Cuarto, en el sur de Córdoba.

El muestreo fue realizado en un lote de producción a campo, de 27 ha de maíz con tecnología MG. El híbrido fue sembrado en surcos a 52 cm en los primeros días de diciembre.

Desde la emergencia, se hicieron dos evaluaciones (27/12/2019 y 12/01/2020) del daño de *D. furcatus* observando las plantas en 5 estaciones del muestreo seleccionadas al azar. En cada estación de muestreo, se tomaron 3 surcos y en cada surco se evaluaron las plantas de 10 metros lineales. Se determinó incidencia a partir del número de plantas afectadas/total de plantas evaluadas y el nivel de daño según Balbi y Flores, 2012 [12]. Esta escala contempla cuatro grados: (i) “0” sin daño, (ii) “1” plantas con daño inicial, punteado en la lámina ya desplegada, planta con altura normal, (iii) “2” Plantas con 1 a 3 hojas secas y enruladas en el extremo que obstaculizan la normal emergencia de las demás hojas, (iiii) “3” plantas que por su afección presentan una marcada disminución en el crecimiento (menor tamaño que las normales) y (iiii) “4” plantas que por su afección no completan su ciclo.

En la evaluación de *S. frugiperda* “oruga militar tardía” o “cogollero”, el muestreo se realizó a partir de estado V4 del cultivo y hasta el final del estado vegetativo VT (según escala de Ritchie y Hanway, 1982) en 5 estaciones de muestreo seleccionadas al azar, de cada estación se tomaron 3 surcos y en cada surco se evaluaron las plantas en 10 metros. Se evaluó la incidencia a partir del número de plantas afectadas/total de plantas evaluadas y la severidad (grado de daño) usando la escala visual de daño de Fernández y Expósito (2000) [13]. Esta escala contempla cinco grados de daños: (i) “1” ningún daño visible, o solamente de 1-3 daños en forma de ventana, (ii) “2” más de 3 daños en forma de ventana, y/o 1-3 daños menores de 10 mm, (iii) “3” más de 3 daños menores de 10 mm, y/o 1-3 daños mayores de 10 mm, (iiii) “4” de 3-6 daños mayores

de 10 mm, y/o verticilo destruido más del 50% y (iiii) “5” más de 6 daños mayores de 10 mm, y/o verticilo totalmente destruido.

En la evaluación de *H. zea* “isoca de la espiga”, se contó el número de oviposturas por espiga por observación directa en el momento de aparición de estigmas (estigmas frescos). El muestreo se realizó en 5 estaciones seleccionadas al azar, en cada estación se tomaron 2 surcos y en cada surco se evaluaron 10 plantas consecutivas. Al final del ciclo, se evaluó el daño de la larva en la espiga, recolectando espigas de 4 plantas al azar en 5 estaciones de muestreo y se determinó incidencia (número de espigas afectadas/número total de espigas evaluadas) y severidad (número de granos comidos o dañados/número total de granos que debería tener la espiga).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La evaluación de daño para *Dichelops furcatus* “chinche de los cuernos”, se puede observar en la Tabla 1. La incidencia para las dos fechas evaluadas fue de 15,5 % y de 18,1 % respectivamente, siendo los grados de daños presentes D1, D2 y D3 (Fig. N°2, 3 y 4).

Tabla 1. Valores de grados de daño observados en dos fechas de muestreo, para *Dichelops furcatus*.

Fecha	27/12/2019	12/01/2020
Estado fenológico	V3	V7
Total plantas evaluadas	418	398
Plantas con daño	65	72
Plantas con daño 1	64	70
Plantas con daño 2	0	2
Plantas con daño 3	1	0

La incidencia de *D. furcatus* fue de 17 %, no alcanzando la evaluada por Aragón [3] para otras zonas de la provincia de Córdoba, pero si superó la incidencia manifestada por [8], para la zona de Villa Mercedes (SL). Se pudo observar, con el transcurso del ciclo del cultivo, alteraciones en las plantas afectadas, tal lo manifestado por [6] y [7] y menor desarrollo por competencia con el resto según lo expresado por [5]. Respecto de la severidad se pudo observar que el 98 % de las plantas alcanzaron el grado 1, siendo este daño leve, sin llegar a producirse la muerte de las mismas, tal lo expresado por [8] para la zona de Villa Mercedes.



Figura 2. Daño de *D. f* grado 1 en V7

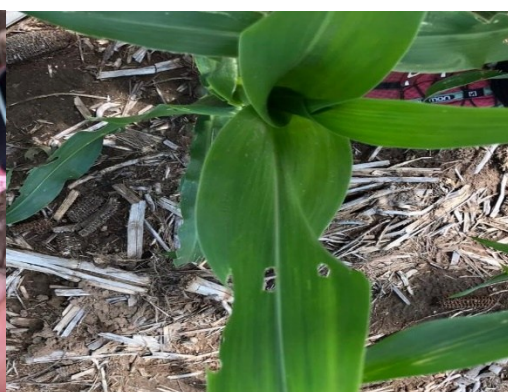


Figura 3. Daño de *D. f* grado 2 en V7



Figura 4. Daño de *D. f* grado 3 en V7

En el caso de la especie *S. frugiperda* “cogollero”, no estuvo presente en el cultivo durante toda la campaña 19/20. Esta situación no es coincidente con lo expresado por [9], respecto de haberse transformado en una plaga constante para el centro del país.

En la evaluación de daño para *H. zea* “Isoca de la espiga” se obtuvieron valores de oviposturas (Fig. N°5) que se pueden observar en la Tabla 2. Como se puede observar el 56% de las espigas presentaron oviposturas y en varias de ellas con más de una ovipostura por espiga.

Tabla 2. Valores de incidencia y número de oviposturas de *Spodoptera frugiperda*

Estación de muestreo	Número de plantas	Número de espigas	Incidencia	Número de oviposturas totales
1	20	20	10	12
2	20	20	12	14
3	20	20	13	16
4	20	20	11	15
5	20	20	10	12
Valor Total y %	100	100	56	69

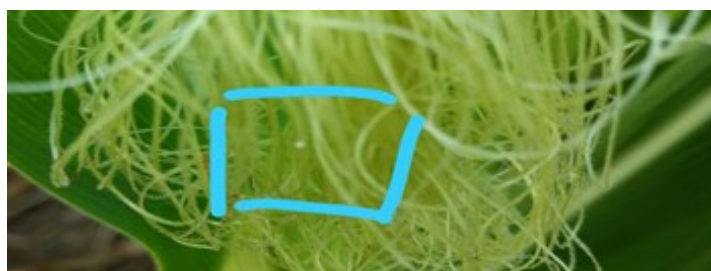


Figura 5. Ovipostura de *Helicoverpa zea* en estigmas frescos

De la evaluación del daño de las larvas en la espiga por consumo de granos (Fig. N°6) se obtuvieron los valores de incidencia y severidad que se detallan en la Tabla 3. Los daños observados son coincidentes con los manifestados por [10].



Figura 6. Espigas con daño de *Helicoverpa zea*

Tabla 2. Valores de número de hileras y granos por espiga, granos faltantes por daño de *H. zea*, evaluados en condiciones de campo

Espiga	Número hileras	Número granos por hilera	Número granos faltantes
1	20	31	19
2	18	39	31
3	16	43	21
4	20	28	41
5	12	32	12
6	14	33	0
7	18	31	41
8	16	27	87
9	16	39	34
10	18	41	13
11	16	39	6
12	18	41	0
13	18	37	6
14	14	34	0
15	16	38	0
16	18	39	5
17	16	37	34
18	18	45	0
19	20	33	9
20	16	35	12

Con estos resultados se calculó la incidencia 75% y la severidad 7,08%. Si bien los valores de severidad son considerados bajos, esos daños provocan otros, considerados secundarios, como es predisponer el ingreso de enfermedades fúngicas que son productoras de micotoxinas tal como lo expresa [11].

CONCLUSIÓN

Con los datos obtenidos a campo, se llegó a la conclusión de que para el maíz con tecnología MG, en siembra tardía en el oeste del Departamento Río Cuarto (Cba), las principales especies de lepidópteros que afectan al cultivo de maíz, no siempre pueden considerarse plagas, ya que:

Spodoptera frugiperda: no fue encontrada a lo largo del ciclo del cultivo, comprobándose su aparición ocasional.

Dichelops furcatus: sus daños fueron evidenciados desde principios del estado vegetativo, con una incidencia del 17% y el 98 % de las plantas tuvieron una severidad de grado 1.

Helicoverpa zea: en estado R1 se observaron oviposturas con una incidencia del 56% de las espigas. El daño en grano tuvo un valor de incidencia a nivel de espiga del 75%; pero la severidad fue sólo del 3%. Si bien es una severidad muy baja, ese daño es vía de ingreso de patógenos, como por ejemplo *Fusarium* quien puede a su vez producir micotoxinas con mayores consecuencias, tales como: rechazo de la mercadería a la hora de la comercialización y para los animales que se alimentan de esos granos y rastrojo a campo.

Es necesario continuar con estudios a campo, que permitan contar con más datos para poder implementar estrategias de manejo integrado en la planificación.

REFERENCIAS

- [1] Satorre, E. (2002). *El cultivo de maíz como oportunidad para la sustentabilidad de la agricultura y sus empresas*. En: Guía Dekalb del cultivo de maíz.
- [2] Vallone, P; Gudelj, V; Galarza, C; Anselmi, H; Donadio, H; Videla, H; Salafia, A; Chiacchiera, S y Conde, B. (2018). *Ensayo comparativo de rendimiento de maíz. Campaña 2018/19. En: MAÍZ. Actualización 2018. Informe de actualización técnica en línea N° 11. INTA. EEA Marcos Juárez. Pág.: 14-26.*
- [3] Aragón, J. (2002). *Guía de reconocimiento y manejo de plagas tempranas relacionadas a la siembra directa*
- [4] Bianco, R. (1997). Citado por Canale y Ferreira en Manejo de *Dichelops furcatus*: *chinche de los cuernos*.
- [5] Canale, A y Ferreira, L. (2013) *Manejo de Dichelops furcatus: chinche de los cuernos*.
- [6] Flores, F.; Liotta, I.; Salines, N.; Oliva, G. (2007) *Chinche de los cuernos y oruga militar en maíces de primera y segunda*. Área Suelos y Producción Vegetal. INTA Marcos Juárez.
- [7] Flores, F.; Oliva, G. y Liotta, I.J. (2012) *Evaluación del daño en implantación de Dichelops furcatus (Fab.) en el cultivo de Maíz*.
- [8] Bonivardo S L, Martinez A N, Colombino M A A, Funes M B, Suarez A, Cendoya M A, Gil S. (2016) *Damage evaluation of Dichelops furcatus in late corn in Villa Mercedes (S.L.)*. XXXIV Reunión Científica Anual de la Sociedad de Biología de Cuyo. 1 al 3 de diciembre 2016. Mendoza. A164
- [9] Balbi, E.I; Flores, F y Maury M. (2018) *Monitoreo de la oruga cogollera en cultivos de maíz. Campaña 2018/19. En: MAÍZ. Actualización 2018. Informe de actualización técnica en línea N° 11. INTA. EEA Marcos Juárez. Pág.: 40-44.*
- [10] SINAVIMO (2016) <http://www.sinavimo.gov.ar/plaga/helicoverpa-zea> Consulta: noviembre 2016.
- [11] Rodríguez, J.; Paerson, C.; Pos, M; Poneleit, C. y Beine, R. (1993) *Role of selected arthropods in the contamination of corn by as Aspergillus flavus measured by aflatoxin producon*. Alabama: Cramaster Printers. Pp. 23-26.
- [12] Balbi, E.I y Flores, F. (2015) *Evaluación del daño causado por el "cogollero de maíz" (Spodoptera frugiperda) y presencia de la "isoca de la espiga" (Helicoverpa zea) en distintos híbridos de maíz transgénicos*. INTA Marcos Juárez.
- [13] Fernández J. L. y Expósito I. E. (2000) *Nuevo método para el muestreo de Spodoptera frugiperda (J. E. Smith) en el cultivo del maíz en Cuba*. Centro Agrícola 27, 32-38.

Modelado y control de una estación de carga para vehículos eléctricos pequeños

Modelling and control of a charging station for small electric vehicles

Kevin Pavez, Guillermo Magaldi, Francisco Esteban, Federico Serra y Matías Tello

Laboratorio de Control Automático, Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de San Luis

kevinpavez97@gmail.com

CientiFICA Nº1

Año: 2025

pp. 65 – 73

Historial del Artículo

Recibido:

02/07/2025

Enviado revisión:

29/07/2025

Aceptado:

27/10/2025

ARK CAICYT:

<https://id.caicyt.gov.ar/>

ark:/s30089042/rmtrj05b9

Área temática:

Electricidad/Electrónica

Resumen: En este trabajo se propone el modelado y control de una estación de carga para vehículos eléctricos pequeños (tales como bicicletas, motocicletas y monopatines eléctricos) alimentada por energía solar. La estación de carga consta de un panel fotovoltaico, un banco de baterías de respaldo y dos convertidores de potencia conectados en cascada. Para modelar el sistema, se analiza cada convertidor de manera independiente. Con el modelo en pequeña señal de cada uno, se diseñan dos controladores lineales basados en controladores PI para regular la tensión de salida de ambos convertidores en sus respectivos valores de referencia y, de esta manera, lograr la carga tanto del banco de batería de respaldo como del banco de baterías del vehículo eléctrico. El desempeño de los controladores, así como del sistema global, es validado a través de resultados de simulación, los cuales muestran que el sistema es capaz de cargar el sistema de almacenamiento del vehículo eléctrico tanto si hay recurso solar disponible como si no, en cuyo caso se utiliza la energía del sistema de almacenamiento de respaldo.

Palabras Claves:

estación de carga,
vehículos eléctricos,
energía solar,
convertidores de
potencia

Keywords:

charging Station,
electric vehicle, solar
energy, power
converter

Abstract: This work proposes the modeling and control of a charging station for small electric vehicles (such as electric bicycles, motorcycles, and scooters) powered by solar energy. The charging station consists of a photovoltaic panel, a backup battery bank, and two power converters connected in cascade. To model the system, each converter is analyzed independently. Using the small-signal model of each converter, two linear controllers based on PI controllers are designed to regulate the output voltage of both converters to their respective reference values and, in this way, achieve the charging of both the backup battery bank and the electric vehicle's battery bank. The performance of the controllers, as well as the overall system, is validated through simulation results, which show that the system is capable of charging the electric vehicle's storage system whether or not solar resource is available, in which case the energy from the backup storage system is used.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el aumento en los niveles de contaminación ambiental ha provocado un interés por parte de la sociedad en fuentes de energía eléctrica renovables y vehículos eléctricos (VE), ya que estas tecnologías, durante su vida útil, no emiten gases de efecto invernadero hacia la atmósfera [1]. Por ello, para promover el cuidado del medio ambiente, muchas ciudades y gobiernos buscan incentivar la movilidad eléctrica. Sin embargo, para la adopción a gran escala de VE es necesario disponer de infraestructuras que permitan la recarga de los vehículos [2]. Existe en la literatura científica diversos trabajos que han desarrollado infraestructuras de carga de VE que emplean fuentes de energía renovable [3], [4]. De todas las fuentes de energía renovable existentes en la actualidad, la energía solar fotovoltaica es una de las que más se ha desarrollado en este tipo de aplicaciones, debido a que es abundante, libre de polución y requiere poco mantenimiento [5]. Dado que la potencia de los sistemas basados en energía solar depende íntegramente del recurso solar, estos utilizan baterías para almacenar energía en los momentos en los que el recurso renovable está disponible [5] [6]. Todos los elementos que componen al sistema de recarga de del VE han de interconectarse a través de convertidores electrónicos de potencia [1].

En cuanto al control de este tipo de sistemas, se distinguen dos niveles [6]:

- Control de alto nivel: se encarga de gestionar la energía del sistema y generar las referencias de tensión y corriente que debe controlar cada convertidor del sistema.
- Control de bajo nivel: opera sobre cada convertidor de manera individual, suministrándoles las acciones de control necesarias en función de las referencias de tensión, corriente o potencia impuestas por el control de alto nivel.

El esquema de control presentado para la estación de carga descrita es un esquema simplificado de bajo nivel que regula las tensiones de salida de ambos convertidores en un valor de referencia por control directo usando controladores Proporcionales-Integrales (PI).

La topología de la estación de carga propuesta en este trabajo se vislumbra en la Fig. 1 y consta de un panel fotovoltaico (PV), el cual es modelado como una fuente de tensión constante [1], un convertidor de corriente continua a corriente continua (CC-CC) de tipo elevador (*Boost 1*) que suministra energía al sistema de almacenamiento de energía (SAE), donde sobre el mismo se conecta otro convertidor similar al anterior (*Boost 2*) cuya salida suministra energía al banco de baterías del vehículo eléctrico (BVE). Las topologías de los convertidores fueron seleccionadas teniendo en cuenta las tensiones consideradas, tanto en el banco de baterías de respaldo como en el VE.

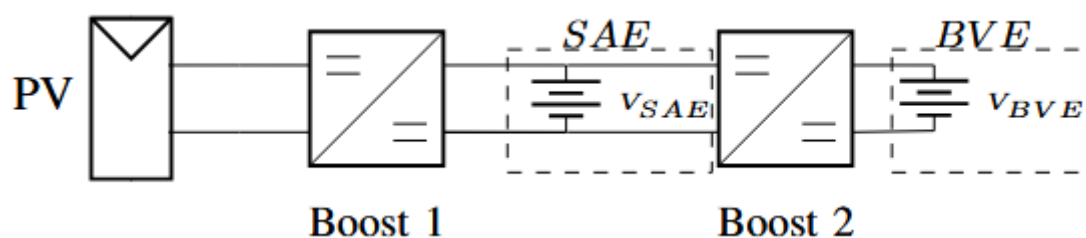


Figura 1. Topología de la estación de carga.

Este trabajo está organizado de la siguiente manera: en la sección 1 se realiza el modelado, de manera independiente, de cada convertidor de la estación de carga. En la sección 2 se diseña la estrategia de control propuesta. En la sección 3 se validan los controladores diseñados a través de resultados de simulación. Estos muestran que ambos controladores cumplen con los objetivos de control al lograr regular las tensiones de salida de ambos convertidores en sus respectivos valores de referencia y, además, lograr realizar la carga tanto del SAE como de la BVE. Finalmente, en la sección 4 se dan las conclusiones de este trabajo y se proponen trabajos a futuro.

MODELADO DEL SISTEMA

La estación de carga, descrita en la sección anterior, se muestra con mayor detalle en las Fig. 2 y 3, donde se observan los componentes específicos del sistema. En este trabajo se optó por despreciar las resistencias internas de inductores, llaves semiconductoras y diodos de libre circulación. Además, para realizar el modelado de cada convertidor de manera independiente, se toman las siguientes consideraciones en cuanto al funcionamiento del sistema:

- En primera instancia el flujo de potencia se considera desde el panel PV hacia el SAE y la BVE. Como la dinámica del convertidor *Boost* 2 alimentando la BVE es más rápida que la del *Boost* 1, el primero será visto por el segundo como una carga de potencia constante (fig. 2) [7].
- En segunda instancia el flujo de potencia se considera desde el SAE hacia la BVE, sin generación del sistema PV, por lo cual $V_{PV} = 0$. (fig. 3). Esto implica que la fuente de energía solar no se encuentra suministrando potencia al sistema.

En las siguientes subsecciones, se modelan ambos convertidores y, a partir del modelo promediado de cada uno, se obtienen sus respectivos modelos lineales en pequeña señal.

Modelado del Boost 1

Observando la fig. 2, y bajo las consideraciones mencionadas, el modelo promediado del convertidor *Boost* 1 está dado por,

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{L1} \\ \dot{v}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{V_{PV}}{L_1} - \frac{v_1(1-\alpha_1)}{L_1} \\ \frac{i_{L1}(1-\alpha_1)}{C_1} - \frac{v_1 - V_{SAE}}{C_1 r_{SAE}} - \frac{P}{C_1 v_1} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

donde L_1 es el valor de inductancia, V_{PV} es la tensión del panel fotovoltaico, C_1 es el valor de capacitancia del capacitor de salida, V_{SAE} es la tensión de las baterías de respaldo, r_{SAE} es la resistencia equivalente de las baterías de respaldo, P es la potencia de la carga de potencia constante (la cual corresponde a la potencia consumida por el *Boost* 2) y α_1 es la señal de control, i_{L1} es la corriente en el inductor y v_1 es la tensión de salida del convertidor *Boost* 1 y la variable a controlar. Como se mencionó anteriormente, el *Boost* 2 se modela como una carga de potencia constante, debido a que su dinámica es más rápida que la del convertidor *Boost* 1 [7].

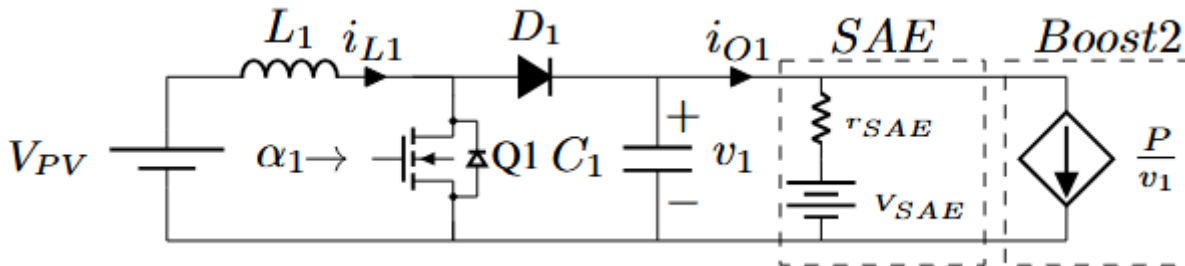


Figura 2. Esquema eléctrico del *Boost* 1.

Dado que el sistema formado por (1) es no lineal, para aplicar una estrategia de control lineal es necesario linealizar el sistema alrededor de un punto de operación [7].

Un modelo lineal en pequeña señal está expresado por la siguiente expresión en variables de estados:

$$\dot{\tilde{x}} = A\tilde{x} + B\tilde{u}, \quad (2)$$

donde: \tilde{x} representa las variaciones de los estados alrededor del punto de equilibrio y \tilde{u} representa las variaciones de la señal de control alrededor del punto de equilibrio. Además, la matriz de estados A y la matriz de entrada B se definen como sigue [8].

$$A = \left(\frac{\partial f(x, u)}{\partial x} \right)_{x^*, u^*}, \quad (3)$$

$$B = \left(\frac{\partial f(x, u)}{\partial u} \right)_{x^*, u^*}, \quad (4)$$

donde: $f(x, u)$ representa el sistema no lineal, x^* es el vector de estados en el punto de equilibrio y u^* es la señal de control en el punto de equilibrio.

Tomando como $f(x, u)$ a (1), x al vector de estados formado por i_{L1} y v_1 , y α_1 como u , aplicando (3) y (4) podemos obtener el modelo lineal en pequeña señal del convertidor *Boost* 1 como,

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{i}}_{L1} \\ \dot{\tilde{v}}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{(1-\alpha_1^*)}{L_1} \\ \frac{(1-\alpha_1^*)}{C_1} & -\frac{1}{C_1 r_{SAE}} + \frac{P}{C_1 v_1^{*2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_{L1} \\ \tilde{v}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{v_1^*}{L_1} \\ -\frac{i_{L1}^*}{C_1} \end{bmatrix} \tilde{\alpha}_1, \quad (5)$$

donde \tilde{i}_{L1} , \tilde{v}_1 y $\tilde{\alpha}_1$ representan las variaciones de los estados y la señal de control alrededor del punto de equilibrio, mientras que i_{L1}^* , v_1^* y α_1^* representan los valores de los estados y la señal de control en el punto de equilibrio.

El modelo lineal en pequeña señal del convertidor *Boost* 1 está representado por (5). A partir de este modelo, se diseña en secciones posteriores un esquema de control directo del estado v_1 utilizando un controlador PI.

Modelado del Boost 2

Siguiendo la fig. 3 el modelo promediado del convertidor *Boost* 2 está expresado por,

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{L2} \\ \dot{v}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{V_{ESS}}{L_2} - \frac{i_{L2} r_{ESS}}{L_2} - \frac{v_2(1-\alpha_2)}{L_2} \\ \frac{i_{L2}(1-\alpha_2)}{C_2} - \frac{v_2 - V_{EV}}{C_2 r_{EV}} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

donde, i_{L2} es la corriente en el inductor, C_2 es el valor de capacitancia del capacitor de salida, V_{ESS} es la tensión de las baterías de respaldo, r_{ESS} es la resistencia equivalente de las baterías de respaldo, V_{EV} es la tensión de las baterías del vehículo eléctrico, r_{EV} es la resistencia equivalente del banco de baterías del vehículo eléctrico y α_2 es la señal de control, i_{L2} es la corriente en el inductor y v_2 es la tensión de salida del convertidor *Boost* 2 y la variable a controlar.

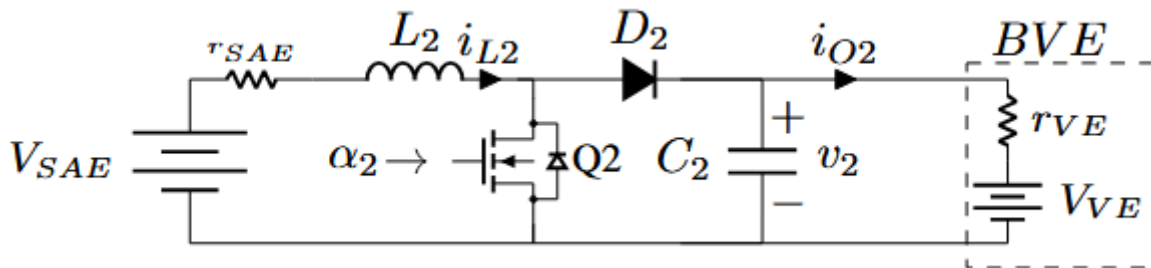


Figura 3. Esquema eléctrico del Boost 2

Al igual que en el caso anterior, (6) representa un sistema no lineal. Para poder diseñar y aplicar un controlador lineal, es necesario linealizar (6) alrededor de un punto de equilibrio. Tomando como $f(x, u)$ a (6), x al vector de estados formado por i_{L2} y v_2 , y α_2 como u , aplicando (3) y (4) podemos obtener el modelo lineal en pequeña señal del convertidor *Boost* 2.

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{i}}_{L2} \\ \dot{\tilde{v}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_{ESS}}{L_2} & -\frac{(1-\alpha_2^*)}{L_2} \\ \frac{(1-\alpha_2^*)}{C_2} & -\frac{1}{C_2 r_{EV}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_{L2} \\ \tilde{v}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{v_2^*}{L_2} \\ -\frac{\dot{i}_{L2}^*}{C_2} \end{bmatrix} \tilde{\alpha}_2, \quad (7)$$

donde \tilde{i}_{L2} , \tilde{v}_2 y $\tilde{\alpha}_2$ representan las variaciones de los estados y la señal de control alrededor del punto de equilibrio, mientras que i_{L2}^* , v_2^* y α_2^* representan los valores de los estados y la señal de control en el punto de equilibrio.

El modelo lineal en pequeña señal del convertidor *Boost* 2 está representado por (7)

SELECCIÓN DE LAS GANANCIAS DE LOS CONTROLADORES

En esta sección, se seleccionan las ganancias de los controladores a partir de los modelos en pequeña señal obtenidos en la sección 1. Las estrategias de control para ambos convertidores consisten en un esquema de control directo de la tensión de salida utilizando controladores de tipo PI, tal y como se muestra en la Fig. 4. Para respetar la condición impuesta en la sección "Modelado del sistema", se diseña el controlador del *Boost* 2 para que sea 10 veces más rápido que el controlador del *Boost* 1. En ambos casos se elige como variable a controlar la tensión de salida de ambos convertidores y como variable de entrada los anchos de pulso de sus señales de conmutación.

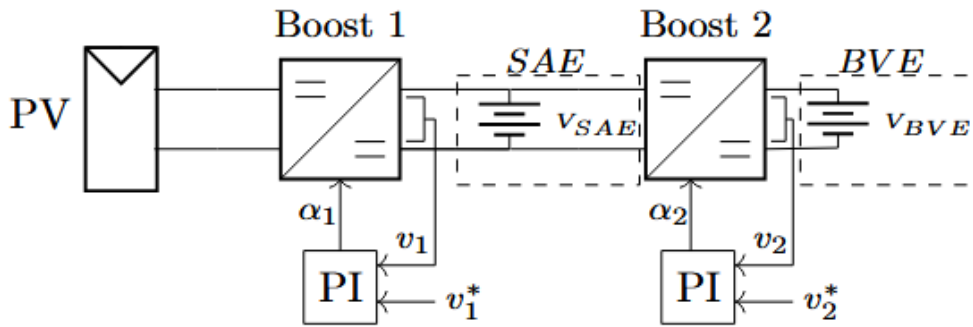


Figura 4. Diagrama en bloques del esquema de control.

Controlador del *Boost* 1

Para diseñar los controladores por el método del lugar geométrico de las raíces se obtiene la función de transferencia del sistema, eligiendo como salida la tensión \tilde{v}_1 y como entrada a $\tilde{\alpha}_1$. Se escoge esa salida ya que, como se muestra en la Fig. 4, el objetivo de control es regular la tensión aplicada al SAE mediante un controlador lineal PI. Al hacer un control directo de tensión, se evita el tener que medir la otra variable de estado del sistema (la corriente en el inductor i_{L1}) y, por lo tanto, se evita el uso de un sensor de corriente adicional, haciendo al sistema más económico, además de que se evita el uso de una entrada analógica adicional, se simplifica el diseño y la implementación del controlador y se reducen los requerimientos por parte del microcontrolador. La función de transferencia se puede calcular a partir de (5) como sigue [9]:

$$G_1(s) = \mathbf{C}_1(s\mathbf{I} - \mathbf{A}_1)^{-1}\mathbf{B}_1 = \frac{\frac{(1-\alpha_1^*)}{L_1}v_1^* - si_{L1}^*}{s^2C_1 + s\left(\frac{1}{C_1r_{SAE}} - \frac{P}{C_1v_1^{*2}}\right) + \frac{(1-\alpha_1^*)^2}{L_1}}, \quad (8)$$

Como estamos controlando v_1 , entonces $\mathbf{C}_1 = [0 \quad 1]$.

La función de transferencia del sistema, dada por (8), posee un cero real positivo, indicando que el sistema, con esta salida elegida, presenta una dinámica cero inestable. Es decir que, si el controlador diseñado posee valores de ganancia muy elevada, los polos a lazo cerrado del sistema van a tender hacia este cero y, cuando los polos crucen el eje imaginario del plano s , el sistema se volverá inestable. Para evitar este

problema, se eligen ganancias de valor pequeño, de tal forma de evitar que los polos a lazo cerrado se acerquen demasiado al eje imaginario en el plano s .

Para calcular las ganancias del controlador se utiliza la técnica del lugar geométrico de las raíces. El objetivo de control fue regular la tensión v_1 en su valor de referencia sin error en régimen permanente. No se tuvo en cuenta parámetros temporales tales como tiempo de asentamiento o tipo de respuesta. Los valores de ganancia del controlador fueron: $K_{p1} = 0,002$ y $K_{i1} = 7,363$. Siendo K_{p1} la ganancia proporcional y K_{i1} la ganancia integral.

Controlador del Boost 2

De manera análoga al caso anterior, para diseñar la estrategia de control del convertidor *Boost* 2 se emplea la función de transferencia del mismo escogiendo como salida la tensión v_2 y como entrada de control α_2 . Se elige esa variable como salida ya que el objetivo de control es regular la tensión aplicada a la BVE. Además, al realizar un control directo de tensión no es necesario medir la otra variable de estado del sistema, la corriente i_{L2} , evitando, de esta manera, un sensor de corriente, además de que se evita el uso de entradas analógicas adicionales en el microcontrolador, se simplifica el diseño y la implementación del controlador y se reducen los requerimientos por parte del microcontrolador. A partir de (7) y (8):

$$G_2(s) = \mathbf{C}_2(s\mathbf{I} - \mathbf{A}_2)^{-1}\mathbf{B}_2 = \frac{\frac{(1 - \alpha_2^*)}{L_2}v_2^* - si_{L2}^*}{s^2C_2 + s\frac{1}{r_{BVE}} + \frac{(1 - \alpha_2^*)^2}{L_2}} \quad (9)$$

Como el objetivo de control es regular v_2 , se elige $\mathbf{C}_2 = [0 \quad 1]$.

Al igual que para el caso del *Boost* 1, la función de transferencia del *Boost* 2, dada por (9), posee un cero real positivo y, por lo tanto, una dinámica cero inestable al hacer control directo de tensión. De vuelta, para evitar este problema, se eligen ganancias de valor pequeño, de tal forma de evitar que los polos a lazo cerrado crucen al lado derecho del eje imaginario en el plano s .

Las ganancias del controlador fueron calculadas utilizando la técnica del lugar geométrico de las raíces. El objetivo de control fue regular la tensión v_2 en su valor de referencia sin error en régimen permanente. No se tuvo en consideración parámetros tales como tiempo de asentamiento o tipo de respuesta. Las ganancias calculadas de esta forma tienen los siguientes valores: $K_{p2} = 1,4 \cdot 10^{-4}$ y $K_{i2} = 7,6216$. Siendo K_{p2} la ganancia proporcional y K_{i2} la ganancia integral.

RESULTADOS DE SIMULACIÓN

En esta sección se validan los controladores diseñados a través de resultados de simulación, utilizando los parámetros de la Tabla 1, los cuales provienen de un prototipo experimental construido en el Laboratorio de Control Automático de la Universidad Nacional de San Luis. Se realizan ensayos que tienden a mostrar la carga de la BVE y la interacción del SAE cuando existen cambios de irradiancia sobre el panel PV.

Tabla 1. Parámetros del sistema.

Parámetro	Símbolo	Valor
Inductancia	L_1, L_2	700 μ H
Capacitancia	C_1, C_2	47 μ F
Frecuencia de conmutación	f_s	20kHz
Tensión del panel solar	V_{PV}	17V
Tensión de baterías de respaldo	V_{SAE}	24V
Resistencia de baterías de respaldo	r_{SAE}	0,7 Ω
Potencia del Boost2	P	100W
Tensión baterías del vehículo	V_{VE}	36V
Resistencia baterías del vehículo	r_{VE}	0,3 Ω

Para una irradiancia constante de $1000 \frac{W}{m^2}$ y las referencias de tensión $v_1^* = 26V$ y $v_2^* = 38V$, se muestran en la Fig. 5 las tensiones v_1 y v_2 (fig. 5a), las corrientes i_{o1} e i_{o2} (fig. 5b) y los estados de carga (*State Of*

Charge, SOC), SOC_{SAE} y SOC_{BVE} (fig. 5c). En este ensayo, dado que se posee recurso solar, se espera poder cargar ambos bancos de baterías empleando la energía generada por el panel fotovoltaico. La fig. 5a muestra que los controladores son capaces de regular las tensiones de salida de ambos convertidores en sus valores de referencia, aunque la tensión v_1 presenta una tensión de rizado apreciablemente mayor que v_2 . En la Fig. 5b se observan las corrientes de salida de ambos convertidores, como éstas poseen valores positivos, existe un flujo de energía desde el panel fotovoltaico hacia los bancos de baterías, esto último se comprueba observando la fig. 5c, en donde los SOC de ambos bancos de baterías aumentan durante todo el ensayo, indicando que el sistema está utilizando la energía generada por el panel solar para cargar ambos sistemas de almacenamiento.

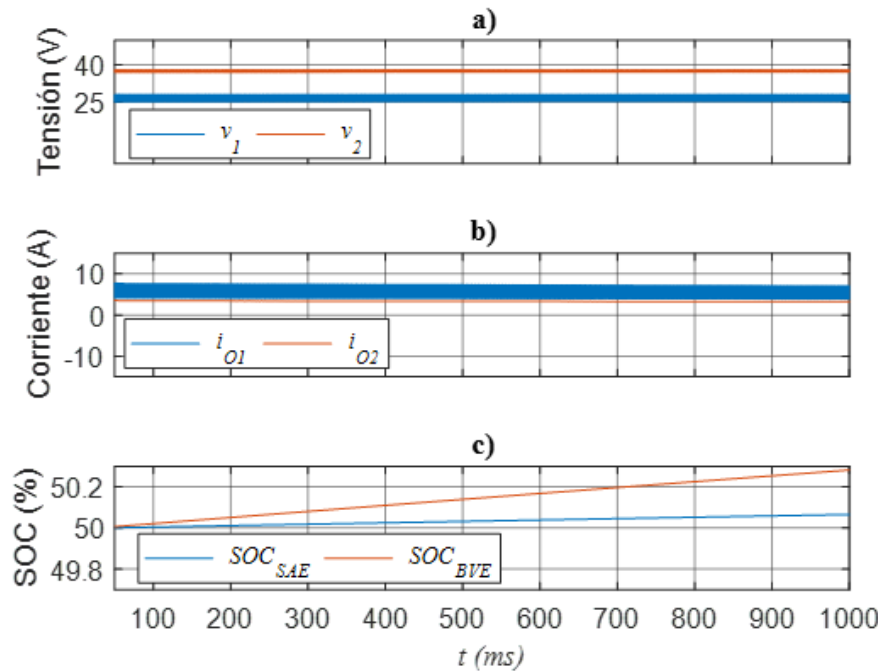


Figura 5. Curvas para una irradiancia constante de $1000 \frac{W}{m^2}$. a) Tensión de salida de ambos convertidores. b) corriente de salida de ambos convertidores y c) SOC del SAE y de la BVE.

En el ensayo de la fig. 6, se busca comprobar que el sistema sea capaz de cargar la BVE incluso en ausencia de generación solar (para ello deberá utilizar la energía almacenada en el SAE). Para comprobar esto, se redujo la irradiancia sobre el panel fotovoltaico a $0 \frac{W}{m^2}$ en $t = 500ms$. Cuando esto ocurre, el convertidor *Boost* 1 deja de suministrar potencia al sistema, tal y como se muestra en la fig. 6b, donde la corriente i_{O1} alcanza el valor de 0 A, dado que no se tiene generación de energía por parte del panel fotovoltaico, y la tensión v_1 se iguala a la tensión en bornes del SAE (fig. 5a). Gracias a que se tiene energía almacenada en el SAE, el controlador del *Boost* 2 es capaz de mantener la tensión v_2 en su valor de referencia, continuando con la carga de la BVE. Esto último se puede comprobar observando la corriente i_{O2} (Fig. 6b), la cual sigue siendo positiva luego del cambio de irradiancia y los SOC de ambos bancos de baterías (fig. 6c). Luego del cambio de irradiancia, el SOC_{BVE} sigue aumentando (lo que implica que la BVE se sigue cargando), mientras que el SOC_{SAE} comienza a disminuir, lo que implica que el SAE se descarga y transfiere su energía a la BVE.

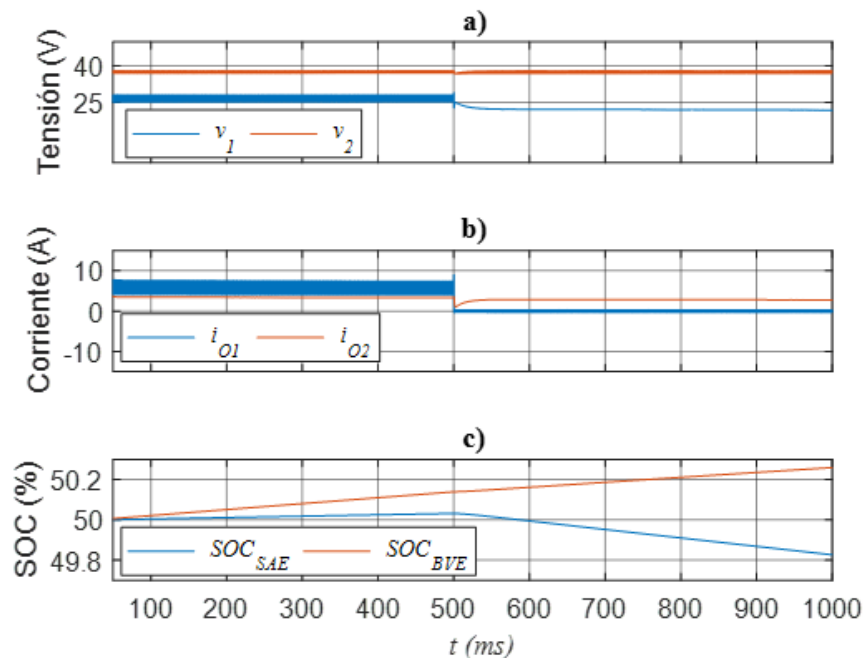


Figura 6. Curvas para un cambio de irradiancia de $1000 \frac{W}{m^2}$ a $0 \frac{W}{m^2}$ en $t = 400$ ms. a) Tensión de salida de ambos convertidores. b) corriente de salida de ambos convertidores. c) SOC del SAE y de la BVE.

CONCLUSIONES Y TRABAJOS A FUTURO

En este trabajo, se propuso el modelado y el control de una estación de carga para vehículos eléctricos pequeños que consta de un panel fotovoltaico, un convertidor elevador *Boost 1* que se encarga de alimentar un banco de baterías de respaldo y un segundo convertidor elevador *Boost 2*, el cual se encarga de alimentar el banco de baterías del vehículo eléctrico. Utilizando el modelo en pequeña señal de ambos convertidores, se implementaron dos controladores lineales basados en controladores PI con el objetivo de regular la tensión de salida de ambos convertidores y, de esta manera, lograr cargar ambos bancos de baterías. Los controladores fueron validados mediante resultados de simulación, los cuales mostraron que ambos lograron establecer las tensiones de salida en sus valores de referencia sin error en estado estable, cumpliendo de esta manera con los objetivos de control. Además, se logró realizar la carga de ambos bancos de baterías cuando hay energía disponible en el panel fotovoltaico, y transferir energía de un banco a otro cuando la energía del panel fotovoltaico no está disponible. Sin embargo, tanto la tensión como la corriente de salida del *Boost 1* (v_1 e i_{O1}) presentan un elevado rizado el cual puede no ser ideal para una aplicación de carga de baterías. Por lo tanto, como trabajo futuro se propone validar los controladores propuestos en un prototipo experimental construido en el Laboratorio de Control Automático de la Universidad Nacional de San Luis y diseñar un control de alto nivel que permita la gestión de la energía de la estación de carga.

REFERENCIAS

- [1] Martínez, F. G., Magaldi, G. L., & Serra, F. M. (2018). "Solar charging station for small electric vehicles". In *2018 Argentine Conference on Automatic Control (AADECA)* (pp. 1-6).
- [2] Fogelberg, F. (2014). Solar Powered Bike Sharing System with Electric Bikes, master thesis, Chalmers University of Technology, Gotemburgo, Suecia.
- [3] J. Philip *et al.* (2016), "Control and Implementation of a Standalone Solar Photovoltaic Hybrid System," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, no. 4, pp. 3472-3479.

-
- [4] J. C. Hernandez and F. S. Sutil (2016), "Electric Vehicle Charging Stations Fedded by Renewable: PV and Train Regenerative Braking," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 7, pp. 3262-3269.
 - [5] Magaldi, G. L., Serra, F. M., & Silva, L. I. (2015). "Estrategia de control de gestión de la energía para un sistema fotovoltaico aislado". *XV reunión de trabajo en procesamiento de la información y control*.
 - [6] H. Mahmood and J. Jiang (2018), "Autonomous Coordination of Multiple PV/Battery Hybrid Units in Islanded Microgrids," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 6, pp. 6359-6368.
 - [7] Singh, Suresh; Gautam, Aditya R.; Fulwani, Deepak, "Constant power loads and their effects in DC distributed power systems: A review", in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 72, pp. 407-421.
 - [8] Bacha, S., Munteanu, I., & Bratcu, A. I. (2014). *Power electronic converters: modeling and control* (Vol. 4). London, UK: Springer.
 - [9] Ogata, K. (2010). *Modern control engineering*. India: Prentice Hall.

Desarrollo de una herramienta de análisis estadístico aplicado al pronóstico de la demanda en sistemas eléctricos de potencia

Development of a statistical analysis tool applied to Load Forecasting in electric power systems

Marco Antonio Pérez González, Sergio Alonso Rincón Ramírez, Ramón Octavio Jiménez Betancourt, Juan Miguel González López, Efraín Villalvazo Laureano

Facultad de Ingeniería Electromecánica de la Universidad de Colima

marcoprez@ucol.mx, srincon@ucol.mx, rjimenez@ucol.mx, j720984@ucol.mx, evillalvazo@ucol.mx

CientiFICA Nº2

Año: 2025

pp. 74 – 92

Historial del Artículo

Recibido:

24/07/2025

Enviado revisión:

29/07/2025

Aceptado:

8/10/2025

ARK CAICYT:

<https://id.caicyt.gov.ar/ark:/s30089042/q91ipqf1k>

Área temática:

Área temática del artículo

Resumen: En este trabajo se presenta el desarrollo de una herramienta de simulación digital para el análisis, ajuste y pronóstico de datos de consumo energético, basada en métodos estadísticos como los promedios móviles y la suavización exponencial. La herramienta permite comparar distintos modelos de ajuste a las curvas de demanda de sistemas reales y ofrece al usuario la capacidad de seleccionar el método más adecuado en función del error absoluto medio (EAM) y el error cuadrático medio (ECM) que se generan para cada tipo de ajuste. Su implementación se llevó a cabo mediante una interfaz gráfica de usuario en Matlab®, lo que facilita su uso con fines didácticos en entornos académicos. La aplicación es capaz de operar con conjuntos de datos de gran tamaño, si fuera necesario, del orden de miles de registros, y permite al usuario adoptar modelos estadísticos con mayor facilidad en contextos energéticos reales. Se propone además una métrica adicional que permite comparar de forma general el tipo de ajuste usado contra las tasas de error utilizadas. Los hallazgos encontrados permiten establecer que los métodos basados en el promedio móvil ponderado son más precisos en la predicción a partir de los datos de la demanda energética diaria, en comparación con otros enfoques evaluados.

Palabras Claves:

hasta cuatro palabras claves.

Keywords:

Up to four keywords are allowed

Abstract: In this work, the development of a digital simulation tool for the analysis, fitting, and forecasting of energy consumption data is presented. The tool is based on statistical methods, including moving averages and exponential smoothing. It allows users to compare various models applied to real system load curves, providing the capability to select the most suitable method based on the Mean Absolute Error (MAE) and the Mean Squared Error (MSE) generated for each type of adjustment. The implementation was carried out using a graphical user interface developed in Matlab®, facilitating its didactic use within academic environments. Furthermore, the application is capable of managing large datasets, potentially containing thousands of records, thereby enabling users to more readily apply statistical models in real energy contexts. An additional metric is also proposed, allowing a general comparison between the chosen fitting model and the corresponding error rates. The findings indicated that methods based on weighted moving averages demonstrated greater accuracy in predicting daily energy demand data, compared to other evaluated approaches.

INTRODUCCIÓN

El pronóstico de carga es una herramienta fundamental en los sistemas eléctricos de potencia modernos, ya que permite una utilización eficiente de los recursos energéticos, el potencial de generación y la infraestructura disponible. Su correcta aplicación asegura que la red eléctrica de una región o país cumpla con el objetivo de proporcionar energía de manera continua, con niveles mínimos aceptables de calidad y confiabilidad para los usuarios finales, [1] – [3].

En ese sentido, la estadística ha probado ser un enfoque muy eficiente para pronosticar procesos o fenómenos que evolucionan en el tiempo. La aplicación de tales modelos a la economía, la dinámica poblacional, fenómenos de salud pública o el crecimiento del PIB (Producto Interno Bruto) en un país, han probado su eficiencia metodológica y precisión. Por esta razón, este tipo de métodos también son ampliamente socorridos para predecir las fluctuaciones estacionales de los mercados energéticos o la evolución de la matriz energética de un determinado país, [4].

La importancia de predecir el consumo de energía eléctrica radica en el gran desafío que aun representa su almacenamiento. Aunque en años recientes se han logrado avances, especialmente a pequeña escala como la industria automotriz, aun es necesario desarrollar tecnologías más eficaces y económicamente viables para el almacenamiento a gran escala, principalmente en lo que respecta al uso de baterías, [5]. En este contexto, anticipar el comportamiento futuro del consumo de energía eléctrica resulta especialmente relevante, ya que, contar con esa información de manera anticipada permite optimizar la gestión y planificación de recursos energéticos, económicos y humanos.

Para el área de planeación y operación del sistema eléctrico de potencia de una red nacional o regional, el conocimiento previo de por lo menos el perfil de consumo energético durante el año anterior (o mejor aún, los años anteriores) posibilita una mejor gestión de los recursos energéticos y optimiza la operación desde el punto de vista económica al tiempo que sirve de un primer filtro para eliminar escenarios de estrés para la red eléctrica. Estas situaciones de estrés de la red eléctrica pueden incluir, pero no están limitados a: exceso de demanda no cubierta en el corto plazo, sobre carga de circuitos de alimentación, fallas progresivas en cascada y hasta el escenario de fallas catastróficas conocidas como blackouts (“apagones”) que han generado grandes pérdidas económicas derivadas de las consecuencias de la pérdida de energía eléctrica en grandes regiones de un país, [6].

En este contexto, el presente trabajo se enfoca en el uso de herramientas estadísticas para abordar un problema específico y de creciente relevancia en el ámbito energético: el análisis y pronóstico de curvas características de perfiles de consumo eléctrico. El objetivo general de este estudio consiste en evaluar y aplicar métodos estadísticos para el análisis y pronóstico de curvas de consumo energético, considerando tanto su potencial académico como su aplicabilidad en entornos reales. Para alcanzar dicho propósito, se establecieron los siguientes objetivos específicos: realizar un estudio comparativo de los métodos comúnmente utilizados para analizar y pronosticar el consumo eléctrico; recopilar datos reales provenientes de grandes centros de carga; desarrollar una aplicación digital que permita al usuario seleccionar tanto los conjuntos de datos como el modelo de ajuste o pronóstico; establecer representaciones gráficas y métricas que faciliten la comparación del grado de ajuste de cada método; y, finalmente, evaluar los resultados obtenidos mediante indicadores clásicos como el error absoluto medio (EAM) y el error cuadrático medio (ECM).

Para agilizar la obtención de estas métricas se desarrolló una interfaz gráfica de usuario (GUI) en la plataforma Matlab®, que permita al usuario interesado en el pronóstico de la demanda eléctrica —particularmente a largo plazo— la comprensión de las ventajas, interacciones y limitaciones de los distintos modelos considerados. Al mismo tiempo, ofrecerá al desarrollador un entorno práctico para identificar las condiciones y contextos en los que resulta conveniente aplicar diversas formulaciones estadísticas, tanto clásicas como emergentes, en el análisis de datos energéticos vinculados al comportamiento del mercado eléctrico. El uso de simuladores interactivos con representación visual ha demostrado ser una herramienta eficaz en la enseñanza de conceptos complejos y en la adopción de técnicas de modelado en contextos técnicos y académicos; [4], [7].

Pronosticar la demanda consiste en realizar una estimación del consumo energético y de potencia, que permita conocer con anticipación la demanda real. Esto es de gran importancia ya que aporta algunas ventajas como: Establecer criterios para que los agentes generadores decidan sus ofertas de generación, programar y operar las unidades de generación diariamente, y ayudar a estimar el flujo de carga entre otras. Este método proporciona menor dispersión de los pronósticos al contrario de los métodos convencionales. El pronóstico ayuda al operador de red para tomar las decisiones correctas y necesarias a la hora que se necesiten, para

prevenir las sobrecargas o eventos como las fallas en las máquinas y apagones. Para esto es necesario tener una tipificación de la demanda energética de los siete días a la semana, ya que su comportamiento es diferente con días festivos, sin días festivos, vacaciones o semana de puente.

Existen diferentes y numerosos trabajos sobre el tema que incluyen enfoques básicos basados en la estadística hasta modelos de redes neuronales e inteligencia artificial. Por ejemplo, Hammad et al, en [8], hacen una recopilación exhaustiva de las técnicas modernas para el análisis del pronóstico de la demanda, tanto del corto como de largo plazo. Tras revisar 45 artículos publicados, clasifican los modelos según criterios como el marco temporal, las variables de entrada y el modelo de salida, la escala en la que se aplican y el desempeño. Sus hallazgos destacan que la regresión sigue siendo una herramienta sencilla y efectivo a largo plazo mientras que en el corto plazo señalan la irrupción de los enfoques basados en la inteligencia artificial (IA), las redes neuronales artificiales (ANN) y máquinas de soporte vectorial (SVM) entre otras.

El trabajo de Holt [9], es considerado seminal en el uso de promedios móviles y métodos de suavización exponencial para series con y sin tendencia, y estableció las bases para técnicas ampliamente usadas hoy en diversas áreas, incluido el pronóstico de la demanda eléctrica.

En [10], también se presentan una recopilación de métodos de pronóstico, evaluando los algoritmos revisados desde el punto de vista de su precisión, aplicación según el escenario y sus implicaciones en los costos de operación y consumo, revelando que los mejores son aquellos basados en la inteligencia artificial. Utilizan la raíz del error cuadrático medio (RSME) como métrica principal para comparar los 77 artículos publicados en un intervalo de 10 años (2010 a 2020) revisados.

En [11] se presenta un modelo basado en promedios móviles simples y dobles para el pronóstico horario de potencia y energía eléctrica, aplicado a una empresa comercializadora del sector eléctrico colombiano. El modelo es alimentado con datos reales de demanda horaria y permite prever con buena precisión las curvas de carga del día siguiente. Los autores destacan la simplicidad, rapidez computacional y bajo requerimiento de memoria de estos métodos, lo cual los hace especialmente útiles para ser integrados en herramientas de apoyo a la toma de decisiones en mercados eléctricos desregulados. Además, el estudio valida el modelo al compararlo con los valores reales medidos, evaluando su precisión con indicadores como el error medio absoluto (EMA) y el error porcentual medio. Los resultados sugieren que, pese a su sencillez, los métodos de promedio móvil son competitivos frente a otros enfoques más complejos, siempre que los patrones de consumo tengan cierta regularidad.

Por otra parte, en [12], se analiza el modelado de series de tiempo diarias en el ajuste del componente estacional en un sistema eléctrico potencia en Argentina. Para solucionar el problema se proponen modelos estructurales de series de tiempo. También se recomiendan métodos alternativos cuando se desconocen los valores futuros de la temperatura: el de escenarios para distintos valores futuros o un modelo con variables “dummy” para temperaturas extremas como variables explicativas, este último modelo presenta muy buenas medidas de ajuste y bondades predictivas u otros modelos como el ARIMA, modelos de regresión y los modelos de redes neuronales.

El enfoque principal de [13], es el análisis de las técnicas y modelos más usados en el pronóstico de la demanda de electricidad y la problemática o dificultades a las que se enfrentan los analistas del sistema cuando se pretende realizar un pronóstico. El análisis muestra que las técnicas más usadas son los modelos ARIMA y las redes neuronales artificiales. El uso de modelos no lineales para el estudio del pronóstico de la demanda aún no ha sido completamente estudiado, ya que no se ha agotado la lista de los modelos posibles para emplearse.

Hacia la mejora de los métodos estadísticos clásicos, en [14] se demuestra que el ajuste preciso del coeficiente de suavización en modelos exponenciales mejora significativamente la precisión en el pronóstico de carga. El estudio enfatiza la utilidad de estos modelos en contextos donde se requiere simplicidad y bajo costo computacional, resaltando que la optimización de dichos coeficientes mediante técnicas adecuadas permite capturar eficientemente las tendencias y estacionalidades en series temporales de demanda eléctrica.

En un trabajo aplicado al contexto energético de Malasia, se evaluaron diversas variantes de suavización exponencial. El modelo Holt-Winters Taylor (HWT) mostró un desempeño superior en escenarios horarios y diarios, destacando por su capacidad para adaptarse a variaciones estacionales [15].

Más recientemente, en [16] se comparan técnicas de regresión lineal, promedio móvil y suavización exponencial aplicadas a datos reales de la red eléctrica de Mindanao. Si bien los métodos autoregresivos fueron más precisos, los enfoques basados en promedios móviles y suavización demostraron ser competitivos, accesibles y adecuados para tareas de análisis preliminar y formación académica.

Ariza, en [17] utiliza distintos tipos de métodos para sistemas de distribución, se realiza la descripción de cada uno de los métodos, luego se presenta la metodología o procedimiento para su aplicación y posteriormente se hace la implementación de estos; para ello se hace uso de los siguientes programas: MS Excel®, Matlab® entre otros. Se hace el modelado de la demanda utilizando datos históricos según el método a utilizar. En el caso de Matlab® se realiza un código que aplica el método de distribución de probabilidad y redes neuronales artificiales. Posteriormente el que tenga mayor correlación o un valor cercano a uno será el método utilizado para pronosticar la demanda energética. Para los casos didácticos basta con 4 años de registros, pero para los casos prácticos al menos 10 años.

Estos análisis también se pueden aplicar en el nivel de distribución del sistema de potencia, en [18] se analiza el consumo de energía eléctrica residencial en el área metropolitana de Monterrey, Nuevo León, México. Utilizando datos de consumo energético en diferentes zonas de la ciudad, los autores examinan las principales variables que afectan el consumo como el tamaño del hogar, el nivel de ingresos y las condiciones climáticas. A través de modelos econométricos, identifican patrones de consumo y destacan cómo los factores económicos, como el ingreso y el uso de electrodomésticos, tienen un impacto significativo sobre el gasto energético. El estudio contribuye a comprender la estructura de demanda residencial, lo que es útil para políticas públicas relacionadas con la eficiencia energética. Además, discute cómo los cambios en la estructura demográfica y las políticas tarifarias pueden influir en las tendencias de consumo en el futuro, proporcionando recomendaciones para la optimización del uso de energía en áreas urbanas.

En [19] se identifican y valoran las consecuencias que ocasiona no pronosticar el consumo energético de manera correcta. El alto costo de la energía, ya que si se tiene un pronóstico erróneo a la hora de mayor demanda se tendrán que utilizar unidades de generación costosas. Pero al desarrollar de manera adecuada el método ayuda a disminuir la dispersión y por lo tanto generar lo suficiente para así poder entregar un servicio de calidad al consumidor

En función del análisis previo y del panorama general de las técnicas utilizadas en el pronóstico de la demanda eléctrica, este trabajo se enfoca en el desarrollo de una herramienta computacional basada en métodos estadísticos clásicos, con el propósito de facilitar el análisis y la toma de decisiones en entornos académicos y profesionales. En las secciones siguientes se detalla la formulación matemática de los modelos implementados, así como el diseño y funcionamiento del entorno gráfico interactivo, el cual permite manipular conjuntos de datos reales y analizar el desempeño de cada técnica bajo distintos escenarios de demanda energética.

METODOLOGÍA

Formulación Estadística

Tendencia

Cuando se trabaja con series temporales una característica fundamental que debe determinarse es si el conjunto de datos posee una tendencia. Este concepto se refiere al comportamiento a largo plazo que presenta una variable a lo largo del tiempo. Es la dirección persistente —ya sea ascendente, constante o descendente— que sigue la serie y que no responde a fluctuaciones estacionales ni variaciones aleatorias de corto plazo. La figura 1, muestra este tipo de tendencia que se pueden encontrar.

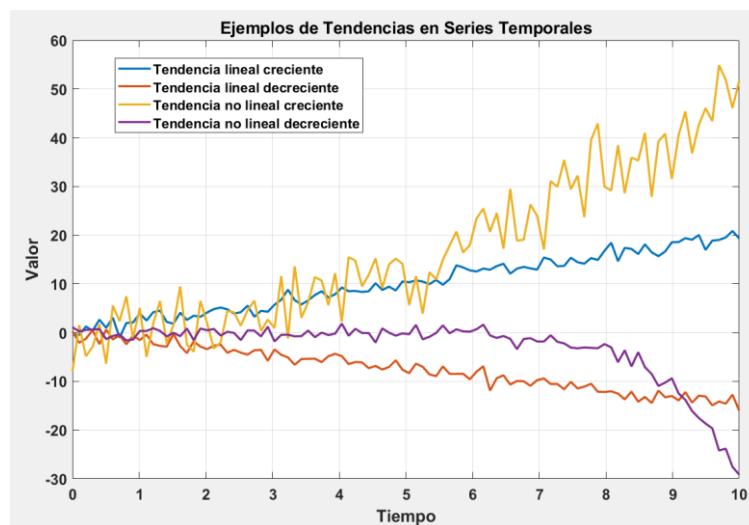


Figura 1. Diferentes tipos de tendencia a largo plazo en series temporales.

Estacionalidad

La estacionalidad es un patrón repetitivo y predecible que ocurre a intervalos regulares en una serie temporal. Estos patrones están vinculados con factores cíclicos o recurrentes que afectan el comportamiento de los datos a lo largo del tiempo, tales como estaciones del año, días de la semana, horarios del día, o ciclos económicos conocidos. La estacionalidad tiene una frecuencia fija o que tiende a ser constante. Puede ser del tipo aditiva (fluctuaciones constantes en magnitud) o multiplicativa (las fluctuaciones crecen o decrecen a medida que se avanza sobre la serie). En la predicción de demanda eléctrica, la estacionalidad es crucial. Por ejemplo:

- La demanda varía a lo largo del día (picos matutinos y vespertinos).
- También muestra variaciones semanales (menos demanda los fines de semana).
- E incluso presenta estacionalidad anual, influida por el clima (uso de aire acondicionado o calefacción).

La figura 2 muestra algunos tipos de estacionalidad que se pueden presentar en series temporales.

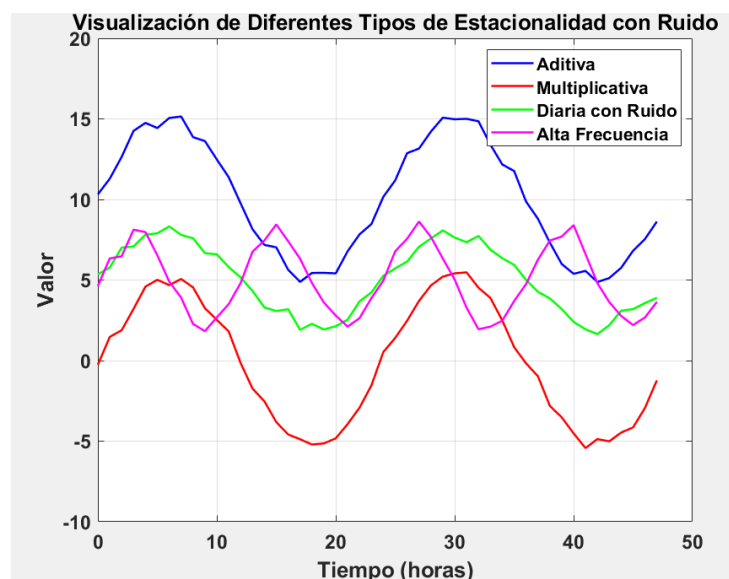


Figura 2. Diferentes tipos de estacionalidad en series temporales.

Promedios Móviles

Los promedios móviles son un método de pronóstico ampliamente utilizado en el análisis de series de tiempo. Su principio básico consiste en tomar un número determinado de datos consecutivos —conocido como ventana— y calcular su media aritmética para estimar un valor futuro. Este ancho de ventana se desplaza una posición a la vez, como una ventana deslizante, generando nuevos valores pronosticados hasta que ya no sea posible formar una nueva ventana con la cantidad de datos requerida.

El ancho de la ventana determina el grado de suavización del pronóstico. A mayor ancho hay más suavización y por lo tanto es recomendable para datos poco aleatorios, ya que la proyección resultante es constante y reacciona más lento a los cambios en la demanda. Es decir, su propósito principal es eliminar las fluctuaciones aleatorias o "ruido" de una serie de datos para resaltar la tendencia subyacente y los patrones cíclicos. Es una de las herramientas más simples pero efectivas en el análisis de series temporales.

Este tipo de técnica responde directamente al comportamiento reciente de los datos, por lo que su resultado puede verse influido por la presencia de una tendencia en los registros previos. En otras palabras, si existe una tendencia creciente o decreciente en los datos más recientes, el pronóstico tenderá a seguir esa misma dirección.

Por esta razón se debe ser cuidadoso cuando se emplea la técnica de promedios móviles, ya que estos funcionan estadísticamente muy bien, cuando la tendencia se mantiene en el largo plazo. En todos los casos de tendencia ya sea lineal o no línea, debe considerarse también el tamaño de la ventana ya que este además de la suavización provee una mayor precisión, desde el punto de vista del error cuadrático medio.

Primer Promedio Móvil (PPM).

En el PPM o promedio móvil simple, se propone un número fijo de elementos (ventana) que se moverán por todos los datos históricos que se están analizando, reemplazando los elementos más antiguos de la serie y aceptando los elementos nuevos que se van presentando. La cantidad fija de elementos lo establecerá el analista que los está estudiando, pero teniendo muy en cuenta que una vez establecidos no se pueden modificar; además, sigue en vigencia la colocación del mismo peso para cada elemento considerado. Es útil cuando se asume que cada observación dentro de la ventana tiene la misma importancia. El modelo está expresado de la manera siguiente:

$$PPM_{t+1} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_{t-n+1} = \frac{Y_t + Y_{t-1} + \dots + Y_{t-n+1}}{n} \quad (1)$$

Donde

PPM_{t+1} = Valor pronosticado para el siguiente periodo.

Y_t = Valor real u observado en el periodo t .

n = Números de términos en el promedio móvil.

periodo = intervalo de tiempo en el que se registra cada observación (horario, diario, anual, etc.).

Segundo Promedio Móvil

También conocido como promedio móvil de segundo orden, es una suavización adicional a los datos originalmente registrados. Como su nombre lo indica, se calcula como el promedio móvil simple del PPM, es decir:

$$SPM_{t+1} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n PPM_{t-n+1} \quad (2)$$

O en términos de las observaciones, si sustituimos la ecuación (1) en la dos se puede escribir:

$$SPM_{t+1} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n Y_{t-n+1-k} \right\} \quad (3)$$

Promedio Móvil Doble

Al igual que el SPM, El promedio móvil doble (PMD) es una extensión del promedio móvil simple que se aplica en dos etapas para mejorar el pronóstico de series temporales con tendencia lineal. A partir del PPM y el SPM se ajusta una línea recta que pretende capturar dicha tendencia. Es decir:

$$a_t = 2PPM_t - SPM_t \quad (4a)$$

$$b_t = \frac{n}{n-1} (PPM_t - SPM_t) \quad (4b)$$

$$PMD_{t+m} = a_t + b_t m \quad (5)$$

Donde

a_t es el factor de ajuste

b_t es la pendiente de la tendencia

SPM_{t+m} es el pronóstico para m periodos en el futuro

El PMD representa una mejora sobre el PPM para el pronóstico en series con tendencia lineal, ya que incorpora una corrección para dicha tendencia mediante la pendiente b_t . Reduce el desfase temporal entre el pronóstico y los datos reales que se presenta en el promedio móvil simple, lo que permite reaccionar mejor a cambios en la dirección de la serie, además de que tiene bajo costo computacional.

Promedio Móvil Ponderado (PMP)

El PMP posee una característica que lo diferencia de los anteriores: asigna pesos diferentes a cada uno de los datos considerados. Estos pesos que se le ponderen a cada elemento están definidos de tal manera que su suma total sea igual a la unidad. De esta manera, el analista tiene la posibilidad de incorporar cierto grado de subjetividad al pronóstico ajustándolo según el comportamiento histórico observado en la demanda.

La expresión general para el cálculo del PMP se define como:

$$PMP_t = w_1 Y_{t-1} + w_2 Y_{t-2} + \dots + w_n Y_{t-n} = \sum_{k=1}^n w_k Y_{t-k}, \quad t = 1, 2, \dots \quad (6)$$

$$w_t = \frac{t}{\sum_{k=1}^n k} \quad t = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

Donde:

PMP_t = pronóstico para el periodo t .

w_i = peso asignado al dato del periodo $t-i$.

$\sum_{i=1}^n w_i = 1$: suma total de todos los pesos.

La elección de los valores de los pesos es subjetiva, aunque se pueden adoptarse criterios formales orientados a su optimización. La expresión (7) representa una forma de formalizar esta asignación y se justifica por otorgar mayor importancia a los registros más recientes, criterio adoptado en este trabajo.

Promedio Móvil Exponencial (PME)

El PME también llamado suavización exponencial (SE) es una forma particular de promedio móvil ponderado donde los pesos disminuyen exponencialmente a medida que los datos se alejan en el tiempo. Esto significa que los datos más recientes tienen un peso significativamente mayor que los datos más antiguos. Es una de las técnicas de pronóstico más utilizadas debido a su simplicidad y efectividad. El pronóstico viene dado por la expresión (8), [4].

$$SE_t = \alpha Y_{t-1} + (1 - \alpha) SE_{t-1} \quad (8)$$

Donde

SE_t es el pronóstico para el periodo t .

SE_{t-1} es el pronóstico para el periodo $t-1$.

α es el coeficiente de suavización y toma un valor entre 0 y 1.

La expresión (8) es recursiva; el pronóstico actual es una combinación lineal del valor observado mas reciente y el pronóstico anterior. Esto elimina la necesidad de almacenar un gran número de observaciones históricas. Si α es cercano al pronóstico reacciona rápidamente a los cambios en la serie; mientras que si α es cercano a 0, el pronóstico es suave, dando mayor importancia al pronóstico anterior. La selección de α es crucial y a menudo se optimiza para minimizar el EAM y el ECM.

Atenuación Exponencial Ajustada a la Tendencia: Método de Holt.

Otra técnica que se usa con frecuencia para manejar una tendencia lineal se denomina Método de dos parámetros de Holt o suavización exponencial doble (SED). La técnica de Holt atenúa en forma directa la tendencia y la pendiente empleando diferentes constantes de atenuación para cada una de ellas. En el enfoque de Brown, solo se usaba una constante de atenuación y los valores estimados de la tendencia serán muy sensibles a variaciones aleatorias. La técnica de Holt proporciona mayor flexibilidad al seleccionar las proporciones a las que se rastrearán la tendencia y la pendiente.

Las tres ecuaciones que se utilizan en esta técnica son [4]:

$$A_t = \alpha Y_t + (1 - \alpha)(A_{t-1} + T_{t-1}) \quad (9)$$

$$T_t = \beta(A_{t-1} + T_{t-1}) + (1 - \beta)T_{t-1} \quad (10)$$

$$SED_{t+h} = A_t + hT_t \quad (11)$$

Donde

A_t es el nuevo valor atenuado.

α es la constante de atenuación para el nivel.

β es la constante de atenuación para la tendencia.

T_t es la estimación de la tendencia.

h es el número de periodos a pronosticar en el futuro.

SED_{t+h} es el pronóstico de h periodos en el futuro,

Métricas de desempeño para los métodos de pronóstico

La medida de comparación para definir la precisión de los métodos de pronóstico analizados son como ya se definieron anteriormente el error medio (EAM) y el error cuadrático medio (ECM), los cuales se definen como:

$$EAM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{Y}_i - Y_i| \quad (12)$$

$$ECM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2 \quad (13)$$

Diseño del simulador

La herramienta de pronóstico de consumo energético en el presente trabajo fue construida en el programa de Matlab® específicamente con la herramienta GUIDE. El diseño pretende ser intuitivo para el usuario. Está dividido en cinco secciones principales cuyo objetivo es facilitar su uso tomando en cuenta un conocimiento mínimo general del pronóstico de la demanda en un sistema eléctrico dado.

1. Parámetros de control (selección de parámetros que involucran las fórmulas)
2. Sección de datos (datos simulados o reales diarios, semanales o anuales)
3. Sección selección de método (en base a 1 y 2)
4. Sección de resultados numéricos (comparación de los errores medio y cuadrático medio)

5. Sección de resultados gráficos (comparación entre los datos reales y el pronóstico)
6. Sección para borrar resultados ante la obtención de nuevos

Después de diferentes ensayos se definió el diseño definitivo mostrado en la figura 3. Como puede apreciarse, la interfaz cuenta con botones para seleccionar archivos con los datos históricos de una red para hacer el pronóstico.

Además, 7 botones para usar un determinado modelo de método de pronóstico. Cuenta con una casilla para ingresar el ancho de ventana para realizar el análisis. Un espacio para graficar la serie de datos registrado y compararse contra el pronóstico y dos ejes adicionales donde se muestran los valores del error medio y del error cuadrático medio.

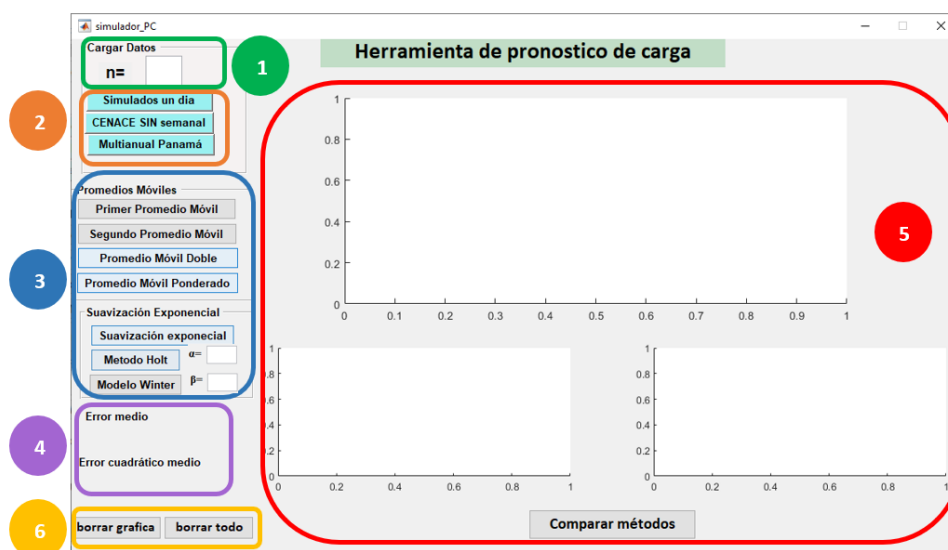


Figura 3. Diferentes tipos de estacionalidad en series temporales.

Datos utilizados para las simulaciones

Por la forma en que se desarrolló la herramienta y el proceso de puesta a punto de los algoritmos los datos están divididos de la siguiente forma:

- A. Datos sintéticos, es decir creados a partir de una simulación tratando de reproducir el comportamiento diario y minuto a minuto de un sistema hipotético y con datos normalizados en p.u. Estos fueron los datos con los que se probaron inicialmente los algoritmos, incluyen un nivel de ruido blanco (media cero) para probar la robustez de los algoritmos.
- B. Datos reales de una semana. Corresponden a los datos del sistema interconectado nacional de México (SIN), los cuales el centro nacional de control de energía (CENACE) hace públicos a través de su plataforma web, [20]. La idea de probar los algoritmos con estos datos es su utilidad ya que son reales.
- C. Datos reales de varios años. Corresponden de la red eléctrica nacional de Panamá los cuales se obtuvieron a través de un repositorio especializado en bases de datos de gran tamaño disponible en [21]. Estos corresponden a los datos necesarios para el pronóstico semanal de ese país. La base de datos usada selecciona dos años (2018 y 2019) aunque en total contiene información de 5 años (2015-2020); los datos están muestreados hora por hora y la intención de utilizarlos es para probar la característica de estacionalidad muy marcada debido al espacio de tiempo muestreado.

RESULTADOS

Primer Promedio Móvil

La figura 4 muestra los resultados cuando se ajusta utilizando el *PPM* para $n=20$. Los datos corresponden a un día, con registros cada minuto, por lo que el total de observaciones son 1440 y se considera que no existe estacionalidad. Se puede observar que el ajuste es adecuado, no hay mucha diferencia entre la línea azul que son los valores medidos y el primer promedio móvil representado por la línea naranja. Ya que 20 es una cantidad pequeña comparada con 1440 datos, este ancho de ventana “sigue” de manera fiel y con poca variabilidad el comportamiento de los datos reales.

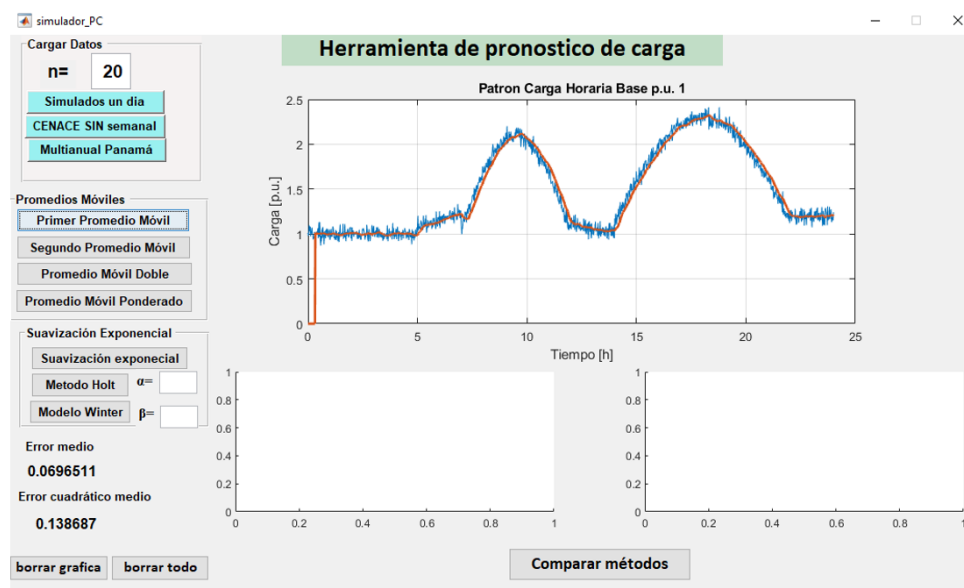


Figura 4. Ajuste para datos simulados usando el *PPM* y $n = 20$.

En la figura 5, se repite la simulación anterior, pero ahora se selecciona $n=50$, al incrementar el ancho de ventana la simulación presenta un suavizamiento ligeramente mayor, las curvas no presentan variabilidad apreciable y se observa un mayor desfase entre los datos medidos y el ajuste calculado en estas circunstancias. Note que ambos, *EAM* y *ECM*, se incrementan. Esto pudiera explicarse porque al tomar una muestra mayor, la variabilidad evidentemente será mayor.

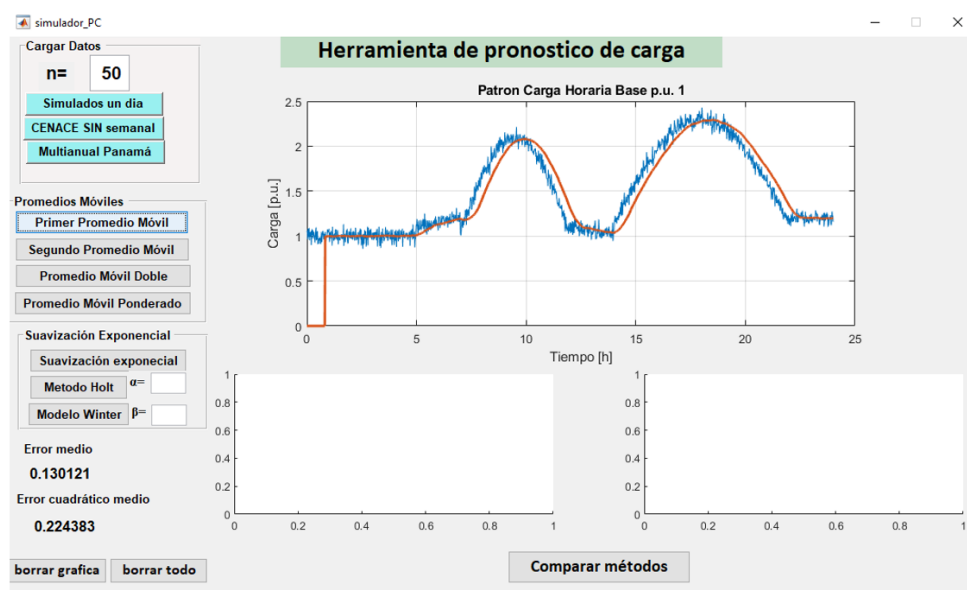


Figura 5. Ajuste para datos simulados usando el PPM y $n = 50$.

Segundo Promedio Móvil

Como ya se estableció, el *SPM*, genera una curva más suave y con mayor desfase que la del *PPM* (considerando el mismo ancho de ventana), ya que es una doble suavización directa. Esto se aprecia con claridad en la figura 6. Como se observa, se produce una curva muy suave incluso con valores ligeramente mayores en algunas secciones del intervalo de tiempo muestreado.

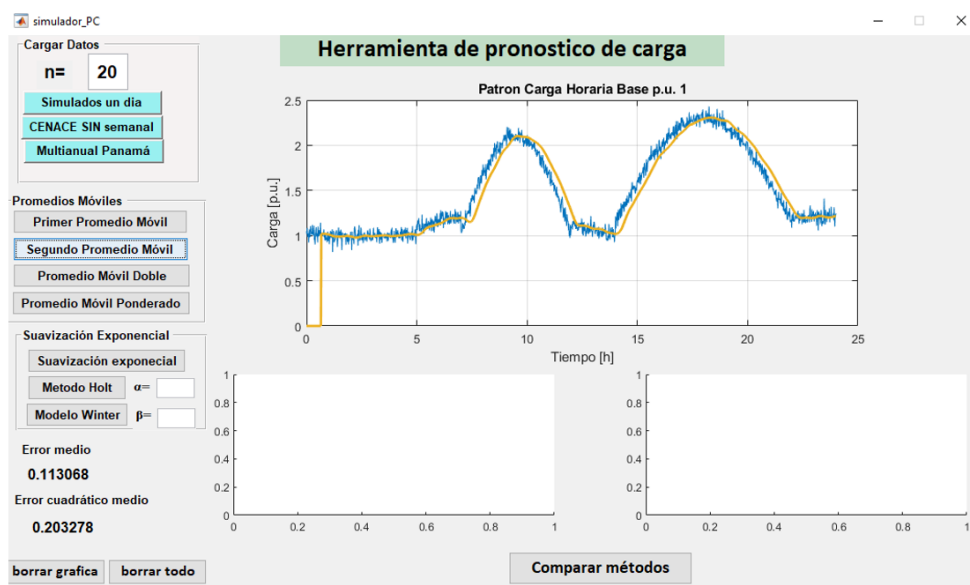


Figura 6. Ajuste para datos simulados usando el SPM y $n = 20$.

Promedio Móvil Doble

La figura 7, muestra la simulación para el *PMD*. Es notorio que es ligeramente menos suave, esto podría interpretarse a que el pronóstico sigue con mayor fidelidad a los datos registrados, aunque numéricamente es muy similar a los modelos revisados anteriormente.

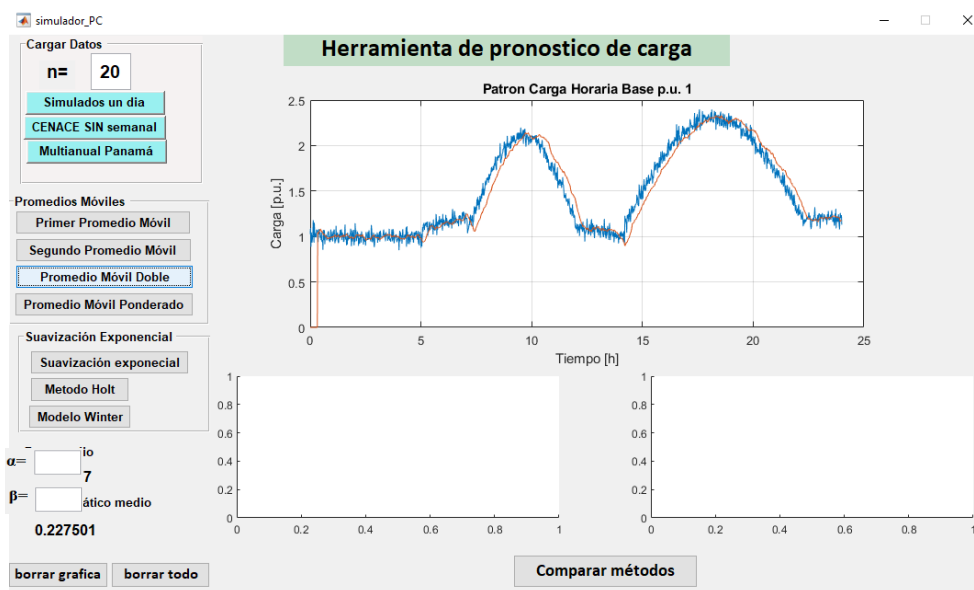


Figura 7. Ajuste utilizando el PMD para $n=20$ y datos simulados.

Promedio móvil ponderado

Al igual que en los métodos anteriores, se aplica ahora el *PMP* al mismo conjunto de datos, obteniéndose una adecuada aproximación a la serie original. En este caso, la ponderación se realiza según el esquema definido en la ecuación (7), en el cual los pesos asignados a cada muestra crecen linealmente, dando mayor relevancia a los datos más recientes dentro de la ventana deslizante.

Debido a esta distribución de pesos, el desfase temporal resulta menos pronunciado respecto del PPM. Esto se traduce en una mejor capacidad de respuesta ante variaciones recientes en la demanda energética. Para propósitos ilustrativos, se presenta únicamente la simulación para $n=20$ en la figura 8, aunque en todos los casos evaluados se observó una mejora en el seguimiento de la tendencia real.

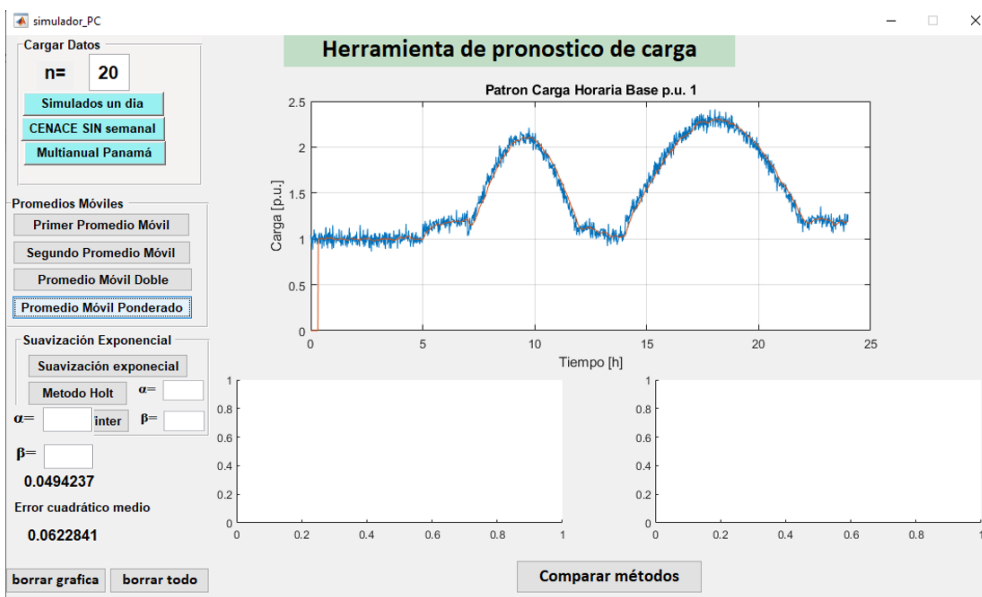


Figura 8. Ajuste utilizando el PMP para $n=20$ y datos simulados.

Análisis de Desempeño para los métodos de pronósticos basados en promedios móviles

Aplicando las ecuaciones (12) y (13) a los datos simulados para el consumo de un día obtenemos los resultados de la tabla 1.

Tabla 1. *EAM* y *ECM* para datos simulados consumo eléctrico 24 horas.

	<i>EAM</i>		<i>ECM</i>	
<i>n</i>	20	50	20	50
<i>PPM</i>	0.0691	0.1304	0.1362	0.2242
<i>SPM</i>	0.1112	0.2381	0.1986	0.3465
<i>PMD</i>	0.1582	0.3517	0.2264	0.4626
<i>PMP</i>	0.0483	0.0724	0.0612	0.0932

A partir de los hallazgos de la tabla 1 se observa que consistentemente el *PMP* es el método que proporciona el mejor ajuste ya sea para anchos de ventana de 20 o 50 datos.

Hasta este punto, únicamente se han expuesto los resultados obtenidos con datos de consumo simulados correspondientes a un día. No obstante, como se indicó previamente en la sección de diseño del simulador, los métodos de pronóstico también fueron evaluados utilizando bases de datos reales: una del Sistema Interconectado de México (con 168 registros correspondientes a una semana) y otra de la red eléctrica de Panamá (con 17,520 registros que abarcan dos años). Dado que ambas bases de datos están estructuradas con un registro por hora, y considerando la duración total de las ventanas analizadas, se propusieron las siguientes longitudes para las ventanas de análisis: $n_m=1$ y $n_p=24$, así como $n_m=2$ y $n_p=48$ respectivamente. A continuación, se presentan los resultados obtenidos con dichas configuraciones.

Las Tablas 2 y 3 confirman el comportamiento observado previamente en la Tabla 1: el *PMP* continúa siendo el método con mejor desempeño, según lo indican de manera consistente las métricas de comparación utilizadas, el *EAM* y el *ECM*.

Tabla 2. *EAM* y *ECM* para consumo semanal del SIN mexicano.

	<i>EAM</i>		<i>ECM</i>	
<i>n</i>	1	2	1	2
<i>PPM</i>	0.0293	0.0440	0.0957	0.1297
<i>SPM</i>	0.0548	0.0802	0.1338	0.1804
<i>PMD</i>	----	0.1016	----	0.1564
<i>PMP</i>	0.0227	0.0281	0.0287	0.0341

* ---- = no se puede calcular el ajuste porque se necesita por lo menos $n=2$

Tabla 3. *EAM* y *ECM* para consumo multianual de la red eléctrica nacional de Panamá.

	<i>EAM</i>		<i>ECM</i>	
	24	48	24	48
<i>PPM</i>	0.1311	0.1362	0.1583	0.1668
<i>SPM</i>	0.1382	0.1485	0.1699	0.1843
<i>PMD</i>	0.1587	0.1644	0.1935	0.2018
<i>PMP</i>	0.1361	0.1329	0.1618	0.1592

Suavización exponencial simple

Como ya se estableció el método de la suavización exponencial difiere de los métodos basados en promedios en que se tiene la capacidad de decidir que tanto “recuerda” con respecto a la variación inmediata mediante el ajuste del parámetro α cercano a 1 y viceversa si se aleja de este límite en la ecuación (8). Las figuras 9 y

10 dejan en claro esta situación, el ajuste del pronóstico a los datos reales es mucho mejor para $\alpha = 0.6$. Es notorio como en la figura 10, con $\alpha = 0.15$, la diferencia en el pronóstico no solo afecta el valor numérico sino el desfase temporal, el cual se hace evidente. Este comportamiento se repite para los datos de la red del sistema eléctrico de Panamá. Por el número de datos es más complicado seguir el ajuste, pero se incluye la simulación para $n=24$.

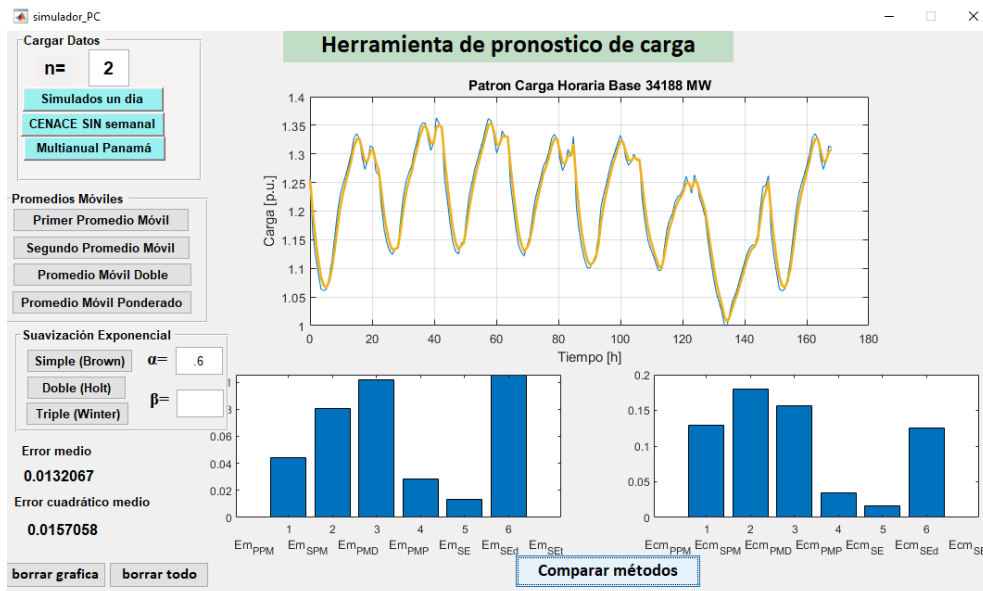


Figura 9. Ajuste mediante SE y $\alpha=0.6$ para datos del SIN mexicano.

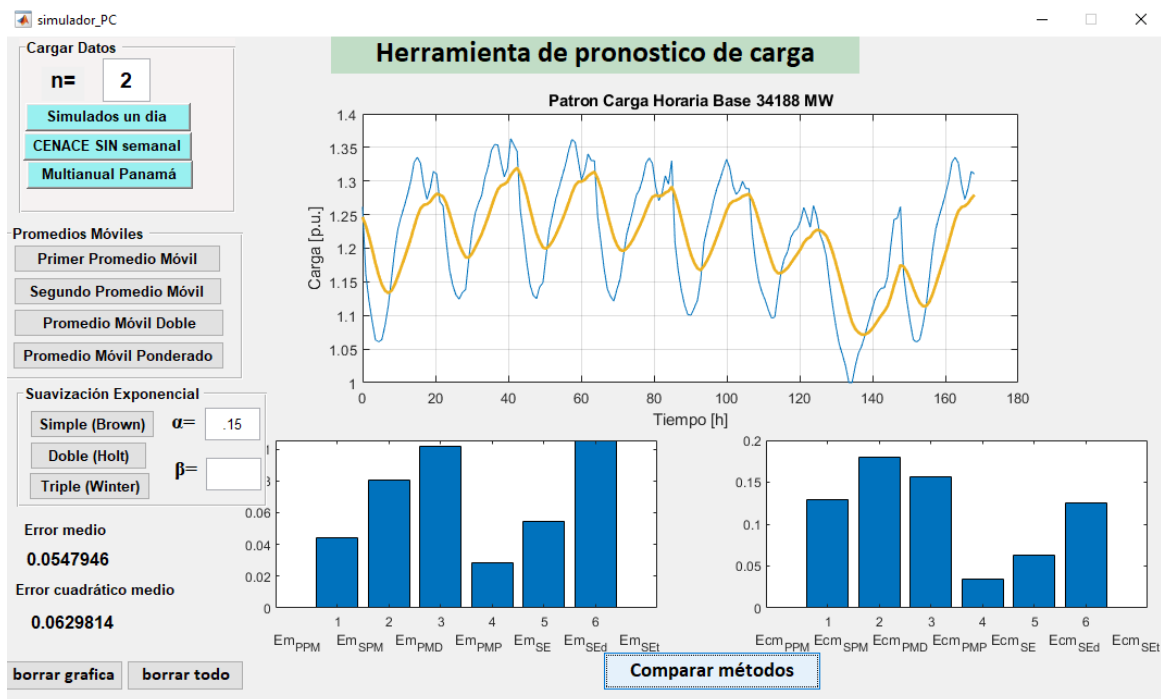


Figura 10. Ajuste mediante SE y $\alpha=0.15$ para datos del SIN mexicano.

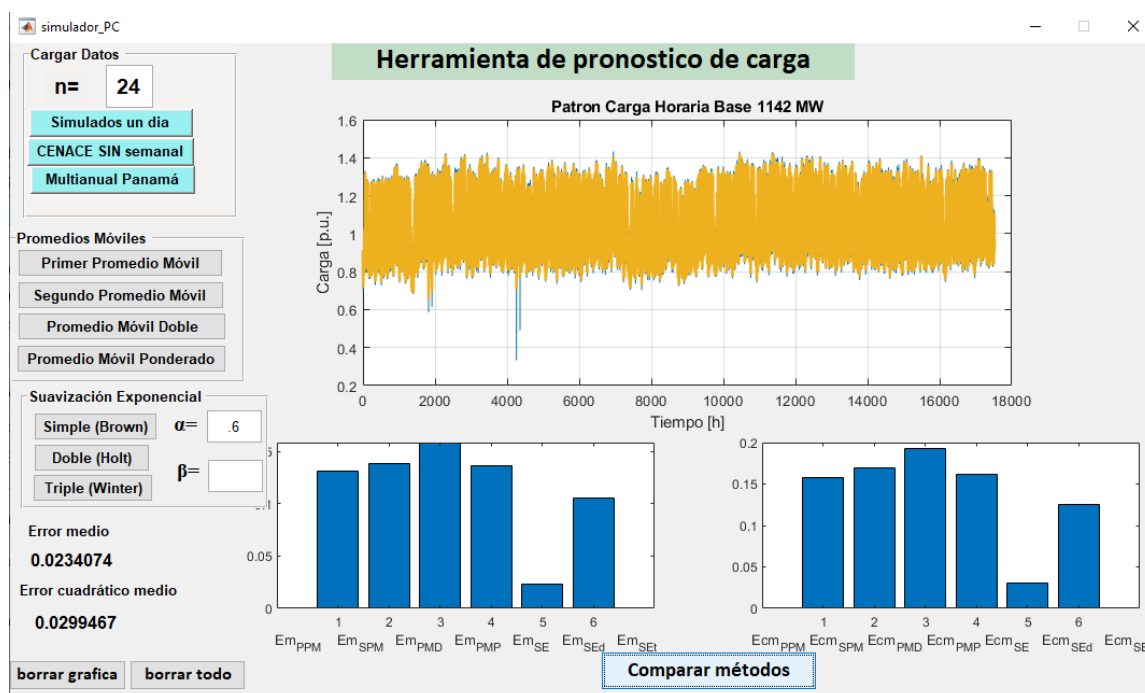


Figura 11. Ajuste mediante SE y $\alpha=0.6$ para datos de la red eléctrica de Panamá.

Dado que la serie correspondiente a la red de Panamá contiene más de 17,000 registros, las gráficas de ajuste tienden a volverse poco legibles, dificultando el seguimiento visual del comportamiento de los distintos métodos. Por esta razón, se presenta únicamente la figura general mostrada en esta sección y se omiten las representaciones individuales de los demás enfoques de suavización exponencial.

Análisis de desempeño de los métodos de ajuste basado en suavización exponencial

A partir de los resultados obtenidos, se puede señalar que la determinación de los valores adecuados para los parámetros α y β en la SED conlleva un proceso inherentemente heurístico, sobre todo cuando no se tiene un conocimiento previo claro de la naturaleza de los datos. Aunque existen diversas metodologías formales para este ajuste en la literatura especializada, en este trabajo se ha optado por un enfoque práctico: la exploración sistemática de distintos valores de α y β a través de simulación, con el objetivo de minimizar los errores de ajuste.

Este procedimiento heurístico se resume en las tablas 4, 5 y 6, donde se reportan los errores correspondientes a diferentes combinaciones de parámetros.

Tabla 4. EAM y ECM de SE y SED para datos simulados.

α	β	Modelo	EAM	ECM
0.15		SE	0.0422	0.0535
	0.35	SED	0.0488	0.0669
	0.5	SED	0.0481	0.0625
	0.6	SED	0.0478	0.0609
0.5		SE	0.0235	0.0293
	0.35	SED	0.0504	0.0634
	0.5	SED	0.0513	0.0635
	0.6	SED	0.0523	0.0648

A partir de los hallazgos de la tabla 4 se observa que consistentemente el SE es el método que proporciona el mejor ajuste; y que entre mayor sea el valor de α se obtiene un mejor ajuste. Para el método SED el

comportamiento del error respecto a α se mantiene, pero el efecto de doble suavización al aumentar β el error también tiende a aumentar como se observa en las tablas 5 y 6.

Tabla 5. EAM y ECM para datos del SIN México.

α	β	Modelo	EAM	ECM
0.15		SE	0.0548	0.0630
	0.35	SED	0.0656	0.0883
	0.5	SED	0.0595	0.0714
	0.6	SED	0.0569	0.0660
0.5		SE	0.0187	0.0220
	0.35	SED	0.0335	0.0511
	0.5	SED	0.0293	0.0431
	0.6	SED	0.0281	0.0449

Tabla 6. EAM y ECM para datos del Red Panamá.

α	β	Modelo	EAM	ECM
0.15		SE	0.1006	0.1189
	0.35	SED	0.1084	0.1282
	0.5	SED	0.1055	0.1247
	0.6	SED	0.1043	0.1233
0.5		SE	0.0334	0.0421
	0.35	SED	0.0522	0.0692
	0.5	SED	0.0474	0.0631
	0.6	SED	0.0451	0.0602

La figuras 12, 13 y 14 muestran el rango de variación para estos parámetros. El eje horizontal muestra la variación de β mientras que en el vertical el ECM. Para cada valor de β se consideran cinco valores de α y el dato consignado se obtiene mediante el cálculo que proporciona el simulador.

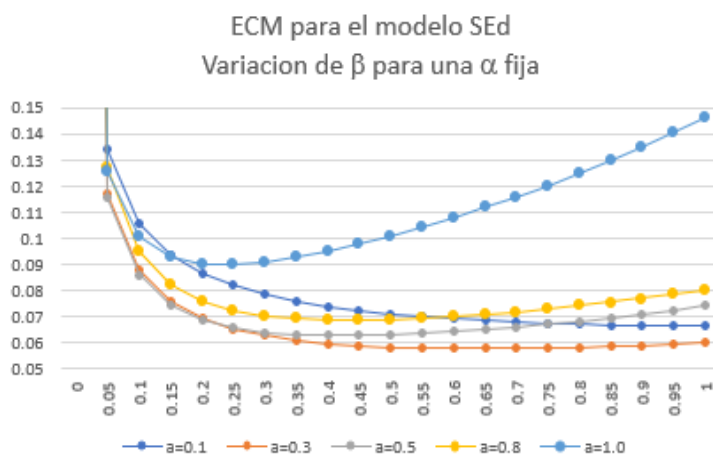


Figura 12. Comportamiento del ECM para diferentes combinaciones α y β en el SED.

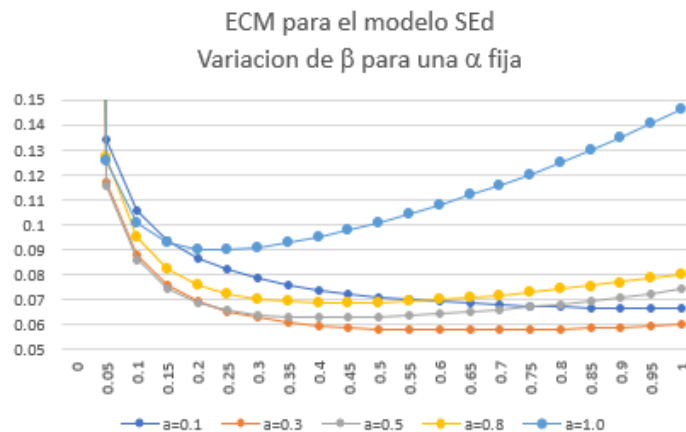


Figura 13. Comportamiento del ECM para diferentes combinaciones α y β en el SED para datos del SIN mexicano.

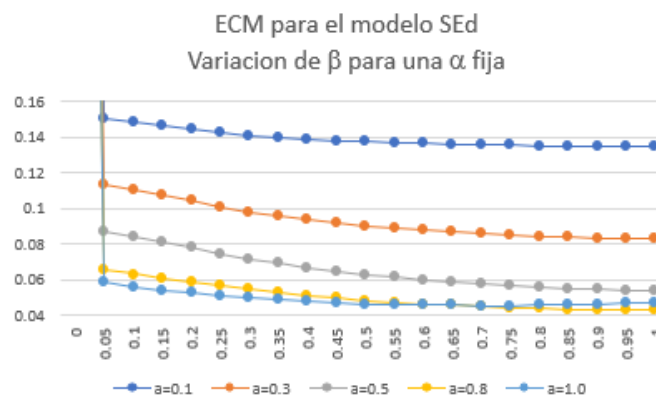


Figura 14. Comportamiento del ECM para diferentes combinaciones α y β en el SED para datos de la red eléctrica de Panamá.

Las gráficas 12 a 14 revelan que para cada valor fijo de α , existe un valor de β que minimiza el ECM, lo cual indica que el desempeño del modelo no mejora de manera monótonica con β , sino que existe un punto óptimo (no necesariamente el mismo para todas las α). Es notable como los valores de α intermedios (como 0.3 y 0.5) muestran un ECM más bajo en su conjunto respecto a $\alpha=0.1$ o $\alpha=1.0$, lo que sugiere que estos valores intermedios logran un mejor balance entre sensibilidad a los cambios recientes y estabilidad; además para estos extremos el ECM crece considerablemente, lo cual puede deberse a sobreajuste o subajuste del modelo.

Finalmente, la forma de las curvas evidencia que si β es demasiado bajo o demasiado alto, se introduce error adicional. Esto podría deberse a que con un β muy bajo, el componente de tendencia se ajusta muy lentamente y que con β muy alto, el modelo reacciona demasiado rápido a cambios aleatorios y no a la tendencia real.

CONCLUSIONES

Este trabajo permitió analizar y comparar el desempeño de distintos métodos estadísticos de pronóstico, particularmente promedios móviles y suavización exponencial, aplicados a datos simulados y a series reales de demanda energética. Para ello, se desarrolló una herramienta en MATLAB® que facilita la visualización del ajuste y la evaluación del error mediante métricas como el EAM y el ECM.

El PMP se destacó como el método más preciso de forma consistente, mostrando el mejor desempeño en capacidad de seguimiento de la serie real, debido al enfoque usado en este trabajo de asignación de pesos decreciente. En cuanto a los modelos de suavización exponencial, se confirmó que el ajuste de los parámetros

α y β requiere una exploración cuidadosa, especialmente cuando no se tiene un conocimiento previo de la dinámica de la serie. Este ajuste, basado en simulación iterativa, permitió encontrar combinaciones efectivas para minimizar el error, validando así un enfoque heurístico.

Además de los resultados obtenidos, una de las principales aportaciones es la propia herramienta, que permite al usuario evaluar distintos escenarios de ajuste de manera intuitiva. Gracias a su estructura modular, su aplicación no se limita al análisis de carga eléctrica, sino que puede extenderse a múltiples campos donde se requiera pronóstico o interpolación de datos.

Finalmente, se plantea como línea futura de trabajo la incorporación de modelos más complejos como ARIMA y sus variantes, así como el uso de técnicas de aprendizaje automático, con el objetivo de enriquecer esta herramienta y ampliar sus capacidades predictivas.

REFERENCIAS

- [1] Weron, R. (2014). Electricity price forecasting: *A review of the state-of-the-art with a look into the future*. International Journal of Forecasting, 30(4), 1030–1081. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2014.08.008>
- [2] Hong, T., Pinson, P., Fan, S., Zareipour, H., Troccoli, A., & Hyndman, R. J. (2016). Probabilistic energy forecasting: *Global Energy Forecasting Competition 2014 and beyond*. International Journal of Forecasting, 32(3), 896–913. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2016.02.001>
- [3] Willis, H. L., & Scott, W. G. (2000). *Distributed power generation: Planning and evaluation*. Marcel Dekker.
- [4] Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2018). *Forecasting: Principles and practice (2nd ed.)*. OTexts. Recuperado de <https://otexts.com/fpp2/>
- [5] Luo, X., Wang, J., Dooner, M., & Clarke, J. (2015). *Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation*. Applied Energy, 137, 511–536. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081>
- [6] Haes Alhelou, H., Hamedani-Golshan, M., Njenda, T., & Siano, P. (2019). *A Survey on Power System Blackout and Cascading Events: Research Motivations and Challenges*. Energies, 12(4), 682. Recuperado de <https://doi.org/10.3390/en12040682>
- [7] Macías, E., Hernández, J., & Álvarez, R. (2020). *Uso de simuladores digitales como herramienta de apoyo para la enseñanza de predicción de demanda energética*. Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje, 15(2), 95–102. Recuperado de <https://doi.org/10.1109/RITA.2020.2994562>
- [8] Hammad, M. A., Borut., J, Bojan, R., & Dejan D. (febrero 2020). *Methods and Models for Electric Load Forecasting: A Comprehensive Review*. Logistics, Supply Chain, Sustainability and Global Challenges, 11(1), 51-76. Recuperado de <https://sciendo.com/pdf/10.2478/jlst-2020-0004>
- [9] Holt, C. C. (2004). *Forecasting seasonals and trends by exponentially weighted moving averages*. International Journal of Forecasting, 20(1), 5–10. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2003.09.015>
- [10] Nti, I., K., (2020). *Electricity load forecasting: a systematic review*. Journal of Electric System and Information Technology, 7 (13), 1-19.
- [11] Valencia, A. L., Lozano, C. A. y Moreno, C. A. *Modelo de promedios móviles para el pronóstico horario de potencia y energía eléctrica*. El hombre y la máquina, 29(1), 99-105. Recuperado de https://www.redalyc.org/pdf/478/47802911.pdf?fbclid=IwAR1J_gt8PVWJ_D-YsACZGxvKhv5YreoTnwoUI7c3Jf9qrgMaFcflej-afl
- [12] Blaconá, M. T., & Abril, J. C. (2000). *Modelo Estructural de Espacio de Estado para la demanda diaria promedio de energía eléctrica en la República Argentina*. ITAE, Argentina. Recuperado de https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/78362/CONICET_Digital_Nro.ae526d77-dd5b-4b86-ada2-36d66ca7a5ed_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y&fbclid=IwAR3Ne3FqzQ8_E1mqtOR3HTNg1Y0HemPQzxDXrNoE9aupHiyYxVaLISPiZOM
- [13] Rueda, V. M, Velásquez., J & Franco, C. (2011). *Avances recientes en la predicción de la demanda de electricidad usando modelos no lineales*. Dyna 78 (167), 36-43. Recuperado de

https://www.redalyc.org/pdf/496/49622358004.pdf?fbclid=IwAR32B_Ginxe3XtE9hRns1DwV0KoA5gYFEm9F2i3K3aCiL4RtlQRBm5iWCo

- [14] Fierro Torres, C. Á., Castillo Pérez, V. H., & Torres Saucedo, C. I. (2022). *Análisis comparativo de modelos tradicionales y modernos para pronóstico de la demanda: enfoques y características*. RIDE. Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo, 12(24). Recuperado de <https://doi.org/10.23913/ride.v12i24.1203>
- [15] Abd Jalil, N. A., Ahmad, M. H., & Mohamed, N. (2013). *Electricity load demand forecasting using exponential smoothing methods*. World Applied Sciences Journal, 22(11), 1540-1543. Recuperado de https://www.academia.edu/88962606/Electricity_load_demand_forecasting_using_exponential_smoothing_methods
- [16] Uayan, C. J., & Uayan, C. J. (2024). *Energy demand forecasting using auto regression, moving average and exponential smoothing in mindanao grid*. Recuperado de www.researchgate.net/profile/Christian-Jay-Uayan/publication/378148324_Energy_Demand_Forecasting_Using_Auto_Regression_Moving_Average_and_Exponential_Smoothing_in_Mindanao_Grid
- [17] Ariza, A. (2013). *Métodos utilizados para el pronóstico de demanda de energía eléctrica en sistemas de distribución*. [Tesis de licenciatura de la universidad tecnológica de Pereira]. Recuperado de https://core.ac.uk/download/pdf/71397537.pdf?fbclid=IwAR3jnKIM__U__f7YckVikWAs3it9IPsIMtcpXNKzXNr7XBai-QuEIJAZANQ
- [18] Morales., D & Luyando, J. (2014). *Análisis del consumo de energía eléctrica residencial en el área metropolitana de Monterrey, N. L., México*. Estudios Económicos 31 (62), 27-48. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5602375>
- [19] Gil, V. (2016). Pronóstico de la demanda mensual de electricidad con series de tiempo. Revista EIA, 13 (26), 111-120. Recuperado de <https://revistabme.eia.edu.co/index.php/reveia/article/view/749/994?fbclid=IwAR0pZnBbRZe09sojRhEiyGciUtX1EWjqs-LYOiURW1lqwKYodPGatzJhPag>
- [20] CENACE (s. f.). *Centro Nacional de Energía, Grafica de demanda* Recuperado de <https://www.cenace.gob.mx/graficademanda.aspx>
- [21] Aguilar, E. J. (s.f.). *Short-term electricity load forecasting - Panama [Conjunto de datos]*. Kaggle. <https://www.kaggle.com/datasets/ernestojaguilar/shortterm-electricity-load-forecasting-panama>

Modelado de la histéresis pulmonar a partir de señales fisiológicas empleando identificación de parámetros basada en datos

Modeling pulmonary hysteresis from physiological signals using data-driven parameter identification

Joaquín Stella^{1,2}, Carolina A. Evangelista¹, Diego A. Riva¹ y Paul F. Puleston¹

¹ GECEP, Instituto de Investigaciones en Electrónica, Control y Procesamiento de Señales – LEICI (UNLP-CONICET), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Argentina.

² Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CICpBA), La Plata, Argentina.

joaquin.stella@alu.ing.unlp.edu.ar, cae@ing.unlp.edu.ar, diego.riva@ing.unlp.edu.ar, puleston@ing.unlp.edu.ar

CientiFICA Nº2

Año: 2025

pp. 93 - 101

Historial del Artículo

Recibido:

27/06/2025

Enviado revisión:

9/07/2025

Aceptado:

23/08/2025

ARK CAICYT:

<https://id.caicyt.gov.ar/ark:/s30089042/7ax3ciz82>

Área temática:

Electricidad/Electrónica

Resumen: La histéresis respiratoria es un fenómeno que se produce durante el ciclo respiratorio, y que puede identificarse en las curvas de presión-volumen (P-V) como una diferencia de recorrido entre la inspiración y la espiración. Si bien esto ocurre por las características propias del sistema respiratorio, se ve acentuado considerablemente en enfermedades como asma, bronquitis y COVID19. Sin embargo, los modelos propuestos suelen tratar la compliance pulmonar como constante, omitiendo este aspecto relevante de la fisiología respiratoria. Este trabajo propone modelar la histéresis respiratoria, ajustando parámetros a datos reales para describir la presión pulmonar con mayor precisión. A partir de un modelo general analítico de histéresis, se buscó ajustar la curva P-V a partir de las señales de volumen y flujo de pacientes reales. Pudieron conseguirse modelos con errores menores al 5%, así como detectar los parámetros de mayor relevancia.

Además, a partir de una variante simplificada del modelo, se desarrolló una red neuronal multicapa capaz de identificar los parámetros del mismo por medio de su entrenamiento con los datos de cada paciente. Particionando los datos según semiciclos inspiratorios y espiratorios, se entrenó la red usando la técnica de retropropagación de errores y se logró estimar valores de parámetros con un ajuste similar.

Se concluye que el empleo de técnicas de modelado analítico en conjunto con técnicas basadas en datos puede mejorar la precisión y generalización de modelos de histéresis respiratoria.

Palabras Claves:

histéresis respiratoria, modelado analítico y basado en datos, perceptrón multicapa (MLP).

Keywords:

respiratory hysteresis, analytical and data-driven modeling, multi-layer perceptron (MLP).

Abstract: Respiratory hysteresis is a phenomenon that occurs during the respiratory cycle, and can be identified on pressure-volume (P-V) curves as a difference in the path between inspiration and expiration. Although this occurs due to the characteristics of the respiratory system, it is considerably accentuated in diseases such as asthma, bronchitis and COVID19. However, the proposed models usually treat pulmonary compliance as a constant, omitting this relevant aspect of respiratory physiology. This work proposes to model respiratory hysteresis, fitting parameters to real data to describe pulmonary pressure more accurately. Based on a general analytical model of hysteresis, the P-V curve was adjusted using the volume and flow signals of real patients. Models with fit errors of less than 5% were obtained, and the most relevant parameters were detected as well.

In addition, a multilayer neural network was developed from a simplified variant of the model, capable of identifying the model parameters by training it with data from each patient. Working separately with data from inspiratory and expiratory half-cycles, the network was trained using the error backpropagation technique and parameters were estimates with similar fit.

In conclusion, the use of analytical modeling techniques along with data-driven techniques can improve the accuracy and generalization of respiratory hysteresis models.

INTRODUCCIÓN

La ventilación asistida es una medida terapéutica que se emplea con aquellos pacientes cuyo sistema respiratorio no puede asumir las demandas metabólicas de su organismo parcial o completamente. La motivación para aplicar esta medida puede deberse tanto a un proceso patológico que afecte al intercambio gaseoso como al efecto de la anestesia general en los sistemas de control respiratorio, que generalmente inicia con una fase de ventilación controlada [1]. Para poder analizar, interpretar y controlar los procesos fisiológicos dinámicos que ocurren en el sistema respiratorio, es necesario disponer de modelos lo suficientemente flexibles como para representar estos fenómenos, pero con parámetros interpretables, de forma tal que se puedan identificar con las características del paciente [1], [2]. El aumento en la disponibilidad de bancos de datos médicos y el desarrollo de nuevos algoritmos de aprendizaje automático ha propiciado que se extienda el uso de técnicas basadas en datos para modelado, diagnóstico y control en el campo de la ingeniería biomédica [3].

Analizando relaciones entre el volumen, las presiones y el flujo de aire que circula por las vías respiratorias se pueden conocer detalles sobre el sistema respiratorio de un paciente y sus afecciones respiratorias. Para ello nos basamos en un modelo equivalente eléctrico del sistema respiratorio como el esquematizado en la Figura 1 y en la ecuación de movimiento del sistema respiratorio:

$$P_B = P_{cl}(V) + P_{ccw}(V) + F R_{aw} - P_{musc} \quad (1)$$

Donde

V es el volumen de aire en el sistema

F es el flujo en las vías respiratorias

P_B representa la presión en la boca

P_{cl} la presión en los pulmones

P_{ccw} la presión en la caja torácica

P_{musc} la presión muscular

R_{aw} la resistencia en las vías aéreas.

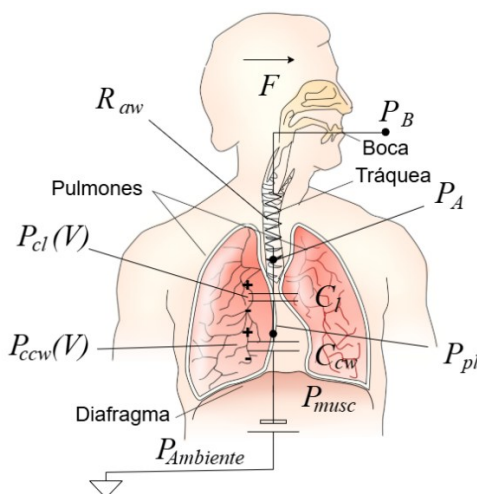


Figura 1. Esquema del circuito equivalente del sistema respiratorio.

Cuando el paciente respira naturalmente, el proceso se denomina *respiración espontánea*, y es automático e inconsciente, gracias a los músculos respiratorios (diafragma, músculos intercostales, abdominales y accesorios de la respiración). En este caso, la presión en la boca P_B es igual a la presión ambiente, y el proceso consta de dos semiciclos de distinta duración, inspiratorio y espiratorio. Para el primero, los músculos respiratorios se contraen aumentando el espacio interno y generando internamente una presión negativa que provoca el ingreso de aire y oxígeno a los pulmones, así como un aumento de la presión interna por encima del valor ambiente. Luego, los músculos se relajan para que el aire y el dióxido de carbono salgan al ambiente de manera pasiva, por gradiente de presión. En caso de conectarse a un equipo

de ventilación asistida, P_B quedará determinada por éste, según la estrategia de ventilación configurada. Por otra parte, cuando el paciente se encuentra anestesiado, P_{musc} se vuelve despreciable.

La presión alveolar, P_A puede definirse como:

$$P_A = P_{cl}(V) + P_{ccw}(V) - P_{musc} \quad (2)$$

y, suponiendo que el paciente está anestesiado, puede calcularse como:

$$P_A = P_B(V) - F R_{aw} \quad (3)$$

Durante el proceso respiratorio, la relación entre el volumen y la presión del aire en los pulmones presenta un fenómeno de histéresis. La histéresis respiratoria es la diferencia de recorrido entre la inspiración y la espiración del ciclo respiratorio en el gráfico de presión y volumen (P-V), y se suele tomar de referencia para diagnóstico y para implementar estrategias de ventilación. Enfermedades respiratorias como el asma, la bronquitis, COVID19 y otras infecciones respiratorias agudas provocan que la histéresis sea más notoria.

Se ha propuesto el uso de algunos modelos de histéresis, tanto generales como especializados, para abordar esta problemática [4]. En la bibliografía existen tanto modelos basados en expresiones analíticas algebraicas y como también diferenciales, que logran representar los distintos caminos durante el ciclo respiratorio generados por la histéresis. Recientemente, se han adoptado los modelos basados en datos, que consisten en entrenar modelos estadísticos con datos experimentales, hasta que estos se ajusten a las características de una señal de referencia.

En este trabajo se propone utilizar los modelos analíticos desarrollados por Vaiana y Rosati para el modelado de la histéresis respiratoria en distintos pacientes de COVID19. En una primera etapa, se realizan ajustes de forma manual, buscando el conjunto de parámetros que logre el modelo con menor error para cada paciente, contrastando con los datos reales medidos. Adicionalmente, se analizan los valores de los distintos parámetros y sus variaciones entre pacientes, para establecer cuáles son los más relevantes. Luego, en una segunda etapa, se emplea una versión más simple del modelo que permite su ajuste mediante el uso de una red neuronal diseñada para tal fin, en la cual cada uno de sus pesos se corresponde con un parámetro de dicho modelo. La red se entrena con una parte de los datos disponibles de pacientes, y la porción restante de cada uno de estos se emplea para evaluar la performance del método propuesto.

Finalmente, se presentan los resultados obtenidos en ambas etapas, y se discute su aplicabilidad para representar y describir pacientes con otras patologías respiratorias.

METODOLOGÍA

El modelo de histéresis Vaiana-Rosati es un modelo desarrollado con la finalidad de poder representar comportamientos histeréticos complejos observados en el análisis de estructuras de sistemas mecánicos y ciertos materiales [5]. En su formulación analítica [6], el modelo está descrito como una función a trozos, cuya expresión depende del signo de la derivada de la entrada u . En el caso bajo estudio, u corresponde al volumen de aire que se intercambia en el sistema respiratorio durante la respiración normal, V , y la salida a la presión alveolar, $f = P_A$.

Modelo completo

Cuando la derivada de u es positiva, la curva tiene la forma dada por $f^+(u, u_j^+)$ en (4), y tiene la expresión dada por $f^-(u, u_j^-)$ cuando la derivada de u es negativa. En el sistema bajo estudio, la derivada del volumen corresponde al flujo de aire, y por lo tanto f^+ y f^- describen, respectivamente, el comportamiento del sistema durante los semiciclos inspiratorio y espiratorio [5]:

$$f(u, \dot{u}) = \begin{cases} f^+(u, u_j^+) = \begin{cases} c^+(u, u_j^+) & , u < u_j^+ \\ c_u(u) & , u > u_j^+ \end{cases} & , \dot{u} > 0 \\ f^-(u, u_j^-) = \begin{cases} c^-(u, u_j^-) & , u > u_j^- \\ c_l(u) & , u < u_j^- \end{cases} & , \dot{u} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Donde

c^+ y c^- son las curvas de carga y de descarga, respectivamente;

c_u y c_l son la curva límite superior e inferior, respectivamente;

u_j^+ y u_j^- son las abscisas de los puntos de intersección entre c^+ y c_u , y entre c^- y c_l , respectivamente.

Las funciones c^- , c^+ , c_u y c_l son no lineales en u , y dependen en total de un conjunto de 16 parámetros ajustables, 8 por la curva de cada semiciclo: k_b^+ , k_b^- , f_0^+ , f_0^- , α^+ , α^- , β_1^+ , β_1^- , β_2^+ , β_2^- , γ_1^+ , γ_1^- , γ_2^+ , γ_2^- , γ_3^+ , γ_3^- . Dado un punto inicial genérico (u_p, f_p) , las expresiones analíticas que dan forma al semiciclo inspiratorio, c^+ y c_u están dadas por (5)-(8):

$$c^+(u, u_p, f_p) = f_e^+(u) + k_b^+ u + f_0^+ - \frac{1}{\alpha^+} \left[\alpha^+ \left(f_e^+(u_p) + k_b^+ u_p + f_0^+ + \frac{\delta_k^+}{\alpha^+} - f_p \right) e^{-\alpha^+(u-u_p)} - \delta_k^+ \right] \quad (5)$$

$$c_u(u, u_p, f_p) = f_e^+(u) + k_b^+ u + f_0^+ - (f_e^+(u_p) + k_b^+ u_p + f_0^+) e^{-\alpha^+(u-u_p)} \quad (6)$$

$$f_e^+(u) = \beta_1^+ e^{\beta_2^+ u} - \beta_1^+ + \frac{4 \gamma_1^+}{1 + e^{-\gamma_2^+(u-\gamma_3^+)}} - 2 \gamma_1^+ \quad (7)$$

$$u_j^+ = -\frac{1}{\alpha^+} \ln(\delta_k^+) \quad (8)$$

mientras que (9)-(12) lo hacen con el semiciclo espiratorio, siendo δ_k^+ y δ_k^- parámetros internos utilizados para calcular u_j^+ y u_j^- , respectivamente.

$$c^-(u, u_p, f_p) = f_e^-(u) + k_b^- u - f_0^- + \frac{1}{\alpha^-} \left[\alpha^- \left(f_e^-(u_p) + k_b^- u_p - f_0^- + \frac{\delta_k^-}{\alpha^-} - f_p \right) e^{\alpha^-(u-u_p)} - \delta_k^- \right] \quad (9)$$

$$c_l(u, u_p, f_p) = f_e^-(u) + k_b^- u - f_0^- + (f_e^-(u_p) + k_b^- u_p - f_0^-) e^{\alpha^-(u-u_p)} \quad (10)$$

$$f_e^-(u) = \beta_1^- e^{\beta_2^- u} - \beta_1^- + \frac{4 \gamma_1^-}{1 + e^{-\gamma_2^-(u-\gamma_3^-)}} - 2 \gamma_1^- \quad (11)$$

$$u_j^- = -\frac{1}{\alpha^-} \ln(\delta_k^-) \quad (12)$$

Modelo simplificado

Si se toma el punto $(0,0)$ como el punto de equilibrio respiratorio del paciente (determinado por el volumen correspondiente a la capacidad funcional residual y la presión de equilibrio [7]), desde el cual se definen el volumen y los cambios de la presión alveolar de cada ciclo respiratorio, las curvas de subida y de bajada atravesarán dicho punto. Considerando esto y asignando un valor despreciable $\delta_k^+ = 10^{-20}$ (según simplificación propuesta por los mismos Vaiana y Rosati en [6]), y además haciendo $\gamma_3^+ = 0$ (dado que este parámetro agrega un punto de inflexión que no es necesario para las características de la histeresis respiratoria), la curva de subida descrita según dos trozos en (4) puede simplificarse a una única expresión:

$$f^+(u) = \beta_1^+ (e^{\beta_2^+ u} - 1) + \gamma_1^+ \left(\frac{4}{1 + e^{-\gamma_2^+ u}} - 2 \right) + k_b^+ u + f_0^+ (1 - e^{-\alpha^+ u}) \quad (13)$$

Análogamente, con justificaciones similares, si se asigna $\delta_k^- = 10^{-20}$ y $\gamma_3^- = 0$, se simplifica también a una única expresión la curva de bajada, $f^-(u)$:

$$f^-(u) = \beta_1^- (e^{\beta_2^- u} - 1) + \gamma_1^- \left(\frac{4}{1 + e^{-\gamma_2^- u}} - 2 \right) + k_b^- u + f_0^- (e^{\alpha^- u} - 1) \quad (14)$$

Identificación de parámetros

A modo de análisis iniciales, la obtención de los modelos completos para cada paciente se realizó manualmente, mediante pruebas iterativas, buscando reducir el error de ajuste a los datos.

Luego, se trabajó con el modelo simplificado y, para realizar la identificación de sus parámetros de una manera sistemática, se hizo uso de una red neuronal *feedforward* con arquitectura *Multi-Layer Perceptron* (MLP) [8].

En primer lugar, se propuso una red neuronal que recibía como entrada la señal de volumen y devolvía como salida la presión. Sin embargo, luego de algunas pruebas y observación de resultados, se decidió optar por una red formada por dos estructuras similares en paralelo, tal que una trabajara con los datos del semiciclo inspiratorio y la otra con los del espiratorio.

Por lo tanto, previo procesamiento de las señales del paciente, la red neuronal propuesta recibe como entradas las señales de volumen durante la inspiración (V^+ , igual a V durante la inspiración y nula durante la espiración) y de volumen durante la espiración (V^- , nula durante el semiciclo inspiratorio e igual a V durante la espiración). Agregándose un factor de escalado G_s , se obtiene como salida la presión \widehat{P}_B , que se utiliza para calcular una aproximación de P_A a partir de (3). La estructura de la red implementada, que puede verse en la Figura 2, se corresponde con la expresión del modelo Vaiana-Rosati simplificado, con:

$$\widehat{P}_B = G_s (f_{net}^+(V^+) + f_{net}^-(V^-)) \quad (15)$$

$$f_{net}^+(V^+) = \beta_1^+ \sigma_1(\beta_2^+ V^+) + \gamma_1^+ \sigma_2(\gamma_2^+ V^+) + k_b^+ V^+ + f_0^+ \sigma_3(\alpha^+ V^+) \quad (16)$$

$$f_{net}^-(V^-) = \beta_1^- \sigma_1(\beta_2^- V^-) + \gamma_1^- \sigma_2(\gamma_2^- V^-) + k_b^- V^- + f_0^- \sigma_3(\alpha^- V^-) \quad (17)$$

Y donde σ_1 , σ_2 y σ_3 , funciones de activación de las neuronas, tendrán las expresiones dadas en (19) para una entrada genérica x , para corresponderse con el modelo propuesto:

$$\sigma_1(x) = e^x - 1; \quad \sigma_2(x) = 4 \left(\frac{1}{1 + e^x} - \frac{1}{2} \right); \quad \sigma_3(x) = 1 - e^{-x} \quad (19)$$

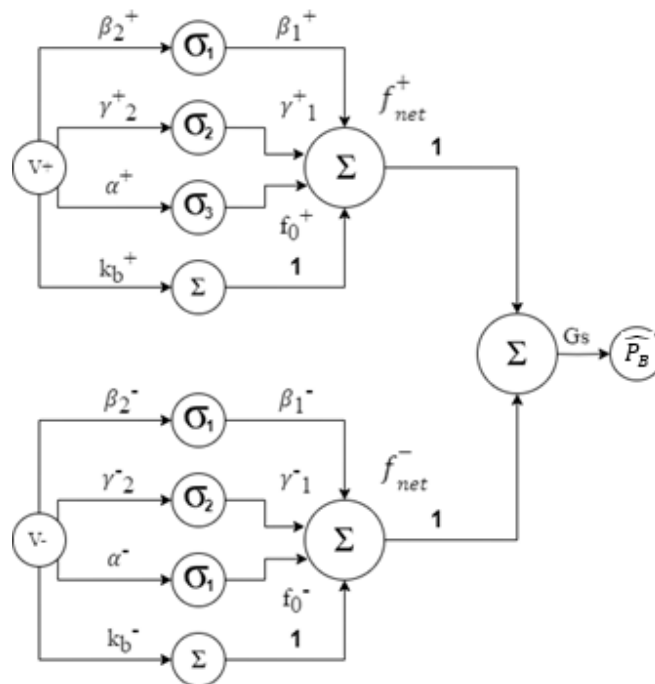


Figura 2. Estructura de la red neuronal propuesta para la estimación de los parámetros del modelo de histéresis respiratoria.

Conjunto de datos respiratorios de pacientes

El conjunto de datos utilizado fue obtenido de pacientes de COVID19, en unidades de terapia intensiva del Hospital San Juan de Dios de La Plata (Buenos Aires, Argentina). Se utilizaron los datos de 7 pacientes que fueron obtenidos haciendo uso del dispositivo de monitoreo respiratorio FluxMed, capaz de medir la presión y el flujo en vías aéreas de un paciente anestesiado de forma no invasiva. Las señales fisiológicas medidas se registran con una frecuencia de muestreo de 256 Hz [9].

Así, se dispuso de las señales P_B (cmH₂O), V (ml) y F (ml/s). Como ejemplo, se muestran en la Figura 3 cuatro ciclos de cada una, correspondientes al paciente N°1. Para entrenar la red neuronal, se empleó el 75% de la señal, utilizando el 25% restante para validar el desempeño del ajuste.

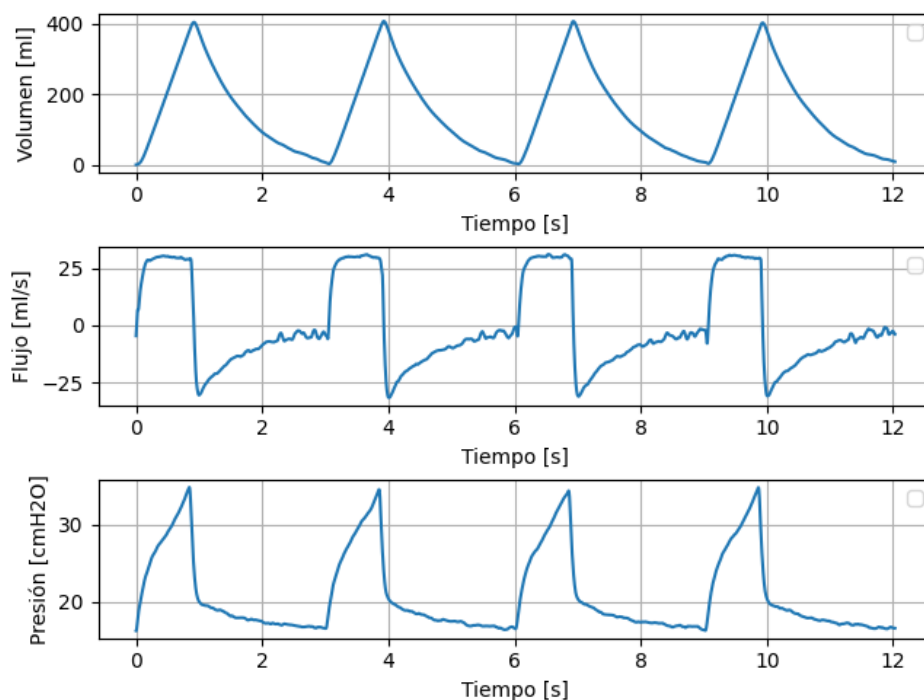


Figura 3. Señales de volumen (arriba) y flujo (centro) en las vías aéreas, y de presión en la boca (abajo) del paciente N°1.

RESULTADOS

En una primera instancia, se ajustó el modelo completo de Vaiana-Rosati a los datos de un conjunto de pacientes con COVID19 de forma manual. Para llevar a cabo los ajustes y obtener el modelo de cada paciente, se tomó como entradas el volumen V y su derivada (el flujo F), se fijó una $R_{aw} = 0,02 \text{ cmH}_2\text{O} \cdot \text{s/ml}$ (valor en el rango de resistencias de vías aéreas medidas en distintas pruebas clínicas [10]) y se simuló el modelo completo con juegos de parámetros que se fueron ajustando hasta obtener una señal de salida de presión P_A similar a la del paciente real, obtenida a partir de P_B y (3).

Se hicieron pruebas variadas, buscando disminuir el error de raíz del error cuadrático medio normalizado (NRMSE) y, además, determinar la sensibilidad del ajuste ante variaciones de los distintos parámetros del modelo. Establecer cuáles de los parámetros resultan significativos en el ajuste de las curvas de histéresis respiratorias, permite disminuir los tiempos necesarios para el ajuste de nuevos pacientes, así como el costo computacional de un proceso de identificación. Los resultados obtenidos para cinco pacientes se presentan en la Tabla 1. En todos los casos, los parámetros β_2 se mantuvieron en 0,0035, y los parámetros γ en cero.

Tabla 2. Valores de parámetros del modelo Vaiana-Rosati que ajustan a cada paciente y el error cuadrático medio normalizado.

Nº Paciente	f_0^+	$-f_0^-$	k_b^+	$-k_b^-$	α^+	α^-	β_1^+	β_1^-	NRMSE
1	2691,71	1987,32	4,49	0,13	0,9	0,36	-100	280	4,2%
2	1987,88	1547,52	3,14	0,23	0,25	0,53	100	350	3,7%
3	2667,66	987,04	1,05	0,23	0,07	0,42	-100	280	4%
4	2338,77	1036,64	2,24	0,11	0,06	0,42	-100	280	4,3%
5	4565,57	2960,67	2,72	0,11	0,1	0,39	-100	280	4%

En la Figura 4 pueden verse los gráficos de las curvas P-V de cuatro de los pacientes con los que se trabajó, cada cual comparada con las curvas obtenidas empleando el modelo con los parámetros ajustados.

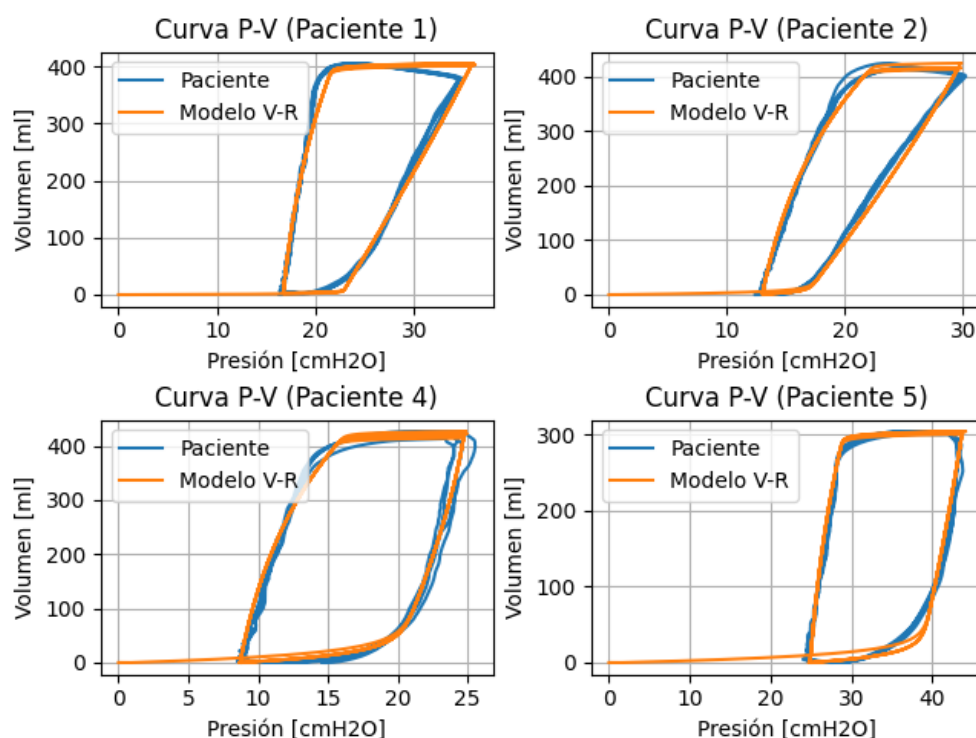


Figura 4. Curvas P-V de los pacientes reales (azul) y obtenidas por el modelo (naranja), para los pacientes 1 (a), 2 (b), 4 (c) y 5 (d).

Como puede observarse en la Tabla 1, los parámetros β_1^+ y β_1^- se mantuvieron constantes para todos los casos excepto para el paciente Nº 2, para quien se observó una histéresis más cercana a la de un paciente sano, es decir, una histéresis poco apreciable, que suele aproximarse como una única función lineal de *compliance* constante [4].

Por su parte, los parámetros f_0^+ y f_0^- provocan el desplazamiento en presión de los recorridos de subida y bajada respectivamente, por lo que sus valores se ven influenciados cuando se usan sobre el paciente algunas técnicas de ventilación mecánica como el establecimiento de un nivel de PEEP (Positive End-Expiratory Pressure), el cual genera un aumento de la presión en los pulmones al final del ciclo respiratorio [1].

Como puede verificarse en la última columna de la Tabla 1, para los pacientes ajustados se obtuvieron errores de alrededor del 4%, obtenidos luego de un arduo trabajo de prueba y error.

Como segunda instancia, se trabajó con el modelo simplificado y la red neuronal diseñada para identificar los parámetros del mismo. Para entrenar la red neuronal, se utilizaron datos obtenidos de pacientes reales de COVID19, de los cuales se dispone de 4 ciclos respiratorios por cada uno (ver Figura 3).

Los datos de flujo fueron procesados con un filtro de media móvil con una ventana de 10 muestras, y los datos de volumen y presión normalizados por medio de la técnica MinMax antes de ser ingresados, para así disminuir el tiempo de convergencia. Se utilizó una función de pérdida MSE, y el algoritmo de descenso de gradiente Adam [11], con una tasa de aprendizaje de 0,001 por cada paso de entrenamiento. Tras analizar el desempeño de la red con distintas combinaciones de hiperparámetros, se decidió emplear *batches* de 64 muestras y 400 *epochs* durante el entrenamiento. Para calcular P_A se utilizó la señal de presión medida en boca del paciente P_B , (3) y el mismo valor típico de R_{aw} que en los ajustes manuales previos.

En la Figura 5 pueden observarse las curvas P-V de los pacientes N°2 y N°3, cada una junto a la obtenida con el modelo ajustado por la red, y en la Tabla 2 se presentan los errores de ajuste obtenidos, similares a los obtenidos luego de los procesos de ajuste manual.

Tabla 2. Error NRMSE de los ajustes obtenidos con los parámetros de la red MLP.

Nº Paciente	1	2	3	4	5
NRMSE (%)	5	3,3	4,2	5,9	6

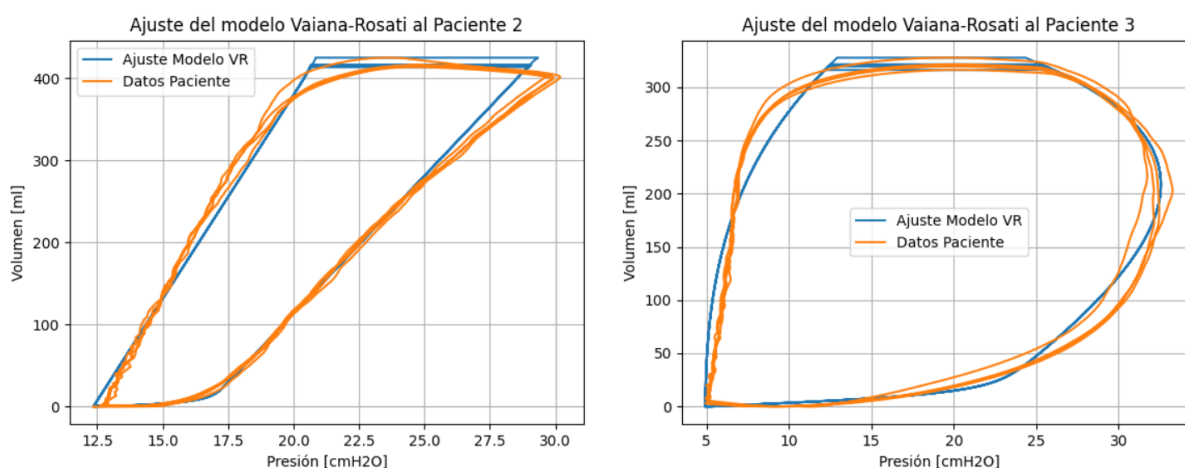


Figura 5: Curvas P-V de los pacientes N°2 (izq.) y N°3 (der.), junto con las curvas ajustadas por el modelo.

CONCLUSIONES

Los resultados de las pruebas realizadas con los modelos analíticos de histéresis de Vaiana-Rosati, originalmente propuestos para otros campos de estudio, muestran que los mismos son adecuados para el modelado de la histéresis respiratoria. Sin embargo, el ajuste de sus parámetros puede suponer una dificultad dada su gran cantidad y variabilidad en los órdenes de magnitud de sus valores. Esto ha motivado la propuesta de uso de modelos híbridos, que buscan integrar las ventajas de los abordajes paramétricos y de los modelos basados en datos [12].

Así, buscando obtener un modelo tanto fácil de interpretar como rápido de ajustar, se desarrolló una red neuronal capaz de estimar los parámetros más relevantes del modelo Vaiana-Rosati en su versión simplificada y se obtuvieron muy buenos resultados preliminares.

Esta línea de investigación pretende seguir explorando el uso de modelos de aprendizaje profundo para estimar otros parámetros propios de la histéresis respiratoria, como el valor de R_{aw} , el cual puede modelarse como una función no lineal del flujo [13], alcanzando así un modelado más completo del sistema respiratorio humano.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento y apoyo de la Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de La Plata, CONICET, CICpBA y ANCyT.

REFERENCIAS

- [1] Bates, J. H. T. (2009). *Lung Mechanics: An Inverse Modeling Approach*. Cambridge University Press.
- [2] Tobin, M. J. (2013). *Principles and practice of mechanical ventilation*. McGraw Hill Professional.
- [3] Binson VA, Thomas S, Subramoniam M, Arun J, Naveen S, Madhu S. A (2024) *Review of Machine Learning Algorithms for Biomedical Applications*. Ann Biomed Eng. 2024 May;52(5):1159-1183. doi: 10.1007/s10439-024-03459-3. Epub 2024 Feb 21. PMID: 38383870.
- [4] Flynn, D. (2016). *A survey of hysteresis models of mammalian lungs*. Reportes del Seminario Matematico Università e Politecnico di Torino. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:53866593>
- [5] Vaiana, N.; Rosati, L. (2023). *Classification and unified phenomenological modeling of complex uniaxial rate-independent hysteretic responses*. Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 182, 109539.
- [6] Vaiana, N.; Rosati, L. (2023). *Analytical and differential reformulations of the Vaiana – Rosati model for complex rate-independent mechanical hysteresis phenomena*. Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 199, 110448.
- [7] Riva, D.A.; Evangelista, C.A.; Puleston, P.F.; Corsiglia L.; Dargains N. (2024). *Nonlinear identification algorithm for online and offline study of pulmonary mechanical ventilation*. Simulation: Trans. of the Society for Modeling and Simulation International, vol. 100(11), pp. 1071-1083.
- [8] Goodfellow, I.; Bengio, Y.; Courville, A. (2016). *Deep Learning*. The MIT Press.
- [9] MBMed. *Creating Medical Solutions. FluxMed GrE description*. www.mbmed.com/fluxmed-gre
- [10] Dubois, A.B.; Botelho, S.Y.; Comroe, J.H. Jr. (1956). *A new method for measuring airway resistance in man using a body plethysmograph: values in normal subjects and in patients with respiratory disease*. J Clin Invest. 35(3):327-335.
- [11] Kingma, D.P.; Ba, J. (2014). *Adam: A Method for Stochastic Optimization*. Proc. of the 3rd International Conference on Learning Representations (ICLR), Banff, 14-16 April 2014.
- [12] Wang, T.; Noori, M.; Altabey, W.A.; Wu, Z.; Ghiasi, R.; Kuok, S.-C.; Silik, A.; Farhan, N.S.; Sarhosis, V.; Farsangi, E.N. (2023). *From model-driven to data-driven: A review of hysteresis modeling in structural and mechanical systems*. Mechanical Systems and Signal Processing, 204, 110785.
- [13] Lumb, A.B.; Thomas, C.R. (2020). *Nunn's Applied Respiratory Physiology*. eBook. Elsevier Health Sciences, Amsterdam.

FICA

Facultad de
Ingeniería y Ciencias
Agropecuarias

www.fica.unsl.edu.ar



/FICA.UNSL



@fica.unsl



@FICAUNSL



SOMOSFICA



@INFOFICA



2657-239060

Ruta Provincial N° 55 (Extremo. Norte) Villa Mercedes (San Luis) Tel 02657 531000



Universidad
Nacional de
San Luis