



Efecto de la concentración de imidacloprid en la germinación de semillas de tomate (*Solanum lycopersicum*)

Effect of imidacloprid concentration on tomato seed germination (*Solanum lycopersicum*)

Aymer Fabian-Urbina¹, Carlos Isique-Robles¹, Cielo Ponce-Bustamante¹, Joseline Pereda-Benites¹

Richard Rodríguez-Saavedra¹, Roberto Chuquilín-Goicochea^{1*}

RESUMEN

El tomate (*Solanum lycopersicum*) es un cultivo de alta relevancia económica en el Perú; sin embargo, la exposición temprana a pesticidas como los neonicotinoides puede comprometer su germinación. El objetivo del estudio fue evaluar el efecto del imidacloprid en la germinación y el crecimiento inicial de semillas de tomate mediante un bioensayo con cuatro concentraciones (0.025, 0.05, 0.10 y 0.75 g/L) y un control. Se cuantificaron el porcentaje de germinación relativa (GRS), el crecimiento relativo de la radícula (CRR) y el índice de germinación (IG), y se aplicó análisis Probit para estimar la concentración letal media (CL50). Los resultados evidenciaron un efecto fitotóxico progresivo y dosis-dependiente. Las concentraciones superiores redujeron significativamente la longitud radicular (hasta valores promedio de 1.0 mm) y el número de semillas germinadas, disminuyendo los valores de GRS y CRR. El IG presentó el mejor ajuste para el modelo Probit ($R^2 = 0.9962$; EAM = 0.031; ECM = 0.0014), por lo que fue seleccionado para la estimación de toxicidad. A partir de este modelo se determinó una CL50 de 0.0287 g/L, confirmando que incluso concentraciones bajas de imidacloprid generan inhibición significativa del desarrollo temprano. Se concluye que el imidacloprid afecta negativamente la germinación y el crecimiento radicular del tomate, lo que sugiere que su uso debe manejarse con cautela en etapas iniciales del cultivo. Futuras investigaciones deberían evaluar efectos subletales en fases posteriores de desarrollo y explorar alternativas menos tóxicas para el manejo de plagas.

Palabras clave: neonicotinoides, germinación, imidacloprid, mortalidad, radícula.

ABSTRACT

Tomatoes (*Solanum lycopersicum*) are a high-value crop in Peru; however, early exposure to pesticides such as neonicotinoids can compromise their germination. The objective of the study was to evaluate the effect of imidacloprid on the germination and initial growth of tomato seeds using a bioassay with four concentrations (0.025, 0.05, 0.10, and 0.75 g/L) and a control. The relative germination percentage (RGP), relative radicle growth (RRG), and germination index (GI) were quantified, and Probit analysis was applied to estimate the median lethal concentration (LC50). The results showed a progressive and dose-dependent phytotoxic effect. Higher concentrations significantly reduced root length (to an average value of 1.0 mm) and the number of germinated seeds, resulting in decreased RGR and RGR values. The GI presented the best fit for the Probit model ($R^2 = 0.9962$; EAM = 0.031; ECM = 0.0014), so it was selected for toxicity estimation. Based on this model, an LC50 of 0.0287 g/L was determined, confirming that even low concentrations of imidacloprid cause significant inhibition of early development. It is concluded that imidacloprid negatively affects tomato germination and root growth, suggesting that its use should be handled with caution in the early stages of cultivation. Future research should evaluate sublethal effects in later stages of development and explore less toxic alternatives for pest management.

Keywords: neonicotinoids, germination, imidacloprid, mortality, radicle.

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Privada del Norte, Los Olivos, Lima - Perú.

*Autor de correspondencia. E-mail: roberto.chuquilin@upn.edu.pe

I. INTRODUCCIÓN

El tomate (*Solanum lycopersicum*) constituye uno de los cultivos hortícolas más relevantes a nivel global, no solo por su importancia económica sino también por su valor alimentario y su amplia presencia en sistemas agrícolas de pequeña y gran escala. Representa aproximadamente el 16 % de la producción mundial de hortalizas, con más de 180 millones de toneladas cultivadas en 161 países (Azeez et al., 2019; FAOSTAT, 2022). Su adaptabilidad, demanda constante y papel clave en cadenas agroindustriales hacen que su productividad sea un indicador trascendental para la seguridad alimentaria en diversas regiones. En el Perú, este cultivo posee una presencia significativa en zonas como Lima, La Libertad, Ica y Arequipa, alcanzando cerca de 4837 ha en 2020 (Mejía-Olivas, 2022), con un fuerte protagonismo de pequeños y medianos productores. Dada su importancia estratégica, el manejo fitosanitario constituye un componente indispensable para asegurar rendimientos estables y mitigar pérdidas generadas por plagas persistentes. Dentro de las estrategias de control, el uso de insecticidas neonicotinoides ha adquirido una relevancia notable durante las últimas décadas. Estos compuestos sistémicos se han consolidado como una de las clases de pesticidas más utilizadas a nivel mundial debido a su eficacia contra plagas de alto impacto agronómico, como áfidos, trips y mosca blanca (Simon-Delso et al., 2015). Los neonicotinoides actúan como agonistas de los receptores nicotínicos de acetilcolina (nAChR), provocando hiperestimulación neuronal y, en última instancia, la muerte de los insectos. Aunque fueron diseñados con una selectividad teórica para insectos, un cuerpo creciente de evidencia ha demostrado que sus efectos pueden manifestarse en organismos no objetivo, incluidas plantas, microorganismos edáficos y polinizadores (Bonmatin et al., 2015; Goulson, 2013). Esta problemática ha suscitado un debate internacional respecto a su impacto real dentro de los agroecosistemas y la necesidad de regulaciones más estrictas.

El incremento sostenido del uso de neonicotinoides, especialmente a través de tratamientos de semillas y aplicaciones al suelo, ha generado preocupación debido a su persistencia y movilidad en matrices ambientales. Se estima que alrededor del 60 % de su aplicación global corresponde al tratamiento de semillas, modalidad que implica un estrecho contacto entre el pesticida y los procesos fisiológicos iniciales de la germinación (Jeschke et al., 2011). Adicionalmente, diversos estudios han detectado residuos en aguas superficiales y subterráneas, lo que evidencia su estabilidad y capacidad de transporte desde los puntos de aplicación hacia otros compartimentos ambientales (Morrissey et al., 2015). Aunque estas aguas no siempre constituyen el medio primario donde germinan las semillas agrícolas, estos hallazgos refuerzan la posibilidad de exposición involuntaria durante las primeras fases del desarrollo vegetal.

El comportamiento de los neonicotinoides en el suelo está influenciado por sus propiedades fisicoquímicas como solubilidad, coeficiente de partición y vida media, así como por factores edáficos como pH, contenido de materia orgánica, textura y actividad microbiana (Cycoń & Piotrowska-Seget, 2015). Estas variables determinan su adsorción, degradación y disponibilidad en la zona donde ocurre la imbibición, la activación metabólica y la emergencia de estructuras embrionarias. En consecuencia, la persistencia del compuesto en el sustrato puede interferir con procesos esenciales de la germinación y el establecimiento inicial del cultivo.

Los neonicotinoides se clasifican en dos generaciones: la primera, denominada cloronicotinilos, incluye compuestos como imidacloprid, acetamiprid, nitenpyram y thiacloprid; la segunda, o tianicotinilos, comprende thiamethoxam, clothianidin y dinotefuran (Benkenstein, 2009). Aunque esta clasificación es principalmente cronológica, resulta pertinente debido a diferencias en su movilidad, persistencia y afinidad por tejidos vegetales. Entre ellos, el

imidacloprid destaca por ser uno de los más utilizados en tratamientos de semillas y aplicaciones al suelo, lo que incrementa la probabilidad de contacto directo con las semillas durante la germinación y las etapas iniciales de crecimiento.

El imidacloprid ha sido señalado por diversos estudios como un compuesto potencialmente capaz de alterar procesos fisiológicos en plantas, especialmente durante fases sensibles como la germinación y el desarrollo temprano. Aunque su mecanismo de acción está dirigido al sistema nervioso de insectos, su presencia en tejidos vegetales puede afectar procesos metabólicos vinculados al balance oxidativo, la respiración celular, la síntesis de proteínas, la permeabilidad de membranas y la elongación celular (Elbert et al., 2008; Goulson, 2013). En la etapa de germinación, estos efectos pueden manifestarse como disminución del porcentaje de emergencia, retraso en la velocidad de germinación, reducción del crecimiento radicular e hipocotilar o pérdida de vigor en plántulas, afectando la capacidad de establecimiento y, en consecuencia, el rendimiento final del cultivo.

La germinación constituye una fase crítica del ciclo vegetativo, caracterizada por procesos como la imbibición, la activación de enzimas hidrolíticas incluyendo amilasas y proteasas y la movilización de reservas hacia el embrión (Bewley et al., 2013). Estos procesos requieren una alta integridad fisiológica y bioquímica, por lo que la presencia de sustancias tóxicas en el sustrato puede generar interferencias que comprometan la emergencia y crecimiento inicial de la plántula. La sensibilidad de esta etapa convierte a la germinación en un indicador eficiente para evaluar toxicidad aguda y subletal de compuestos químicos en plantas.

A pesar del amplio uso del imidacloprid y del creciente debate sobre su impacto ambiental, existe un vacío de investigación respecto a sus efectos directos sobre la germinación del tomate, un cultivo de alta importancia global y estratégica para la

agricultura peruana. Las investigaciones disponibles se han centrado mayormente en impactos sobre insectos, polinizadores o ecosistemas acuáticos, dejando una brecha respecto a los efectos específicos en el desarrollo temprano de especies hortícolas.

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar el efecto de diferentes concentraciones de imidacloprid en la germinación y el crecimiento inicial de *Solanum lycopersicum*, con el fin de generar evidencia científica que contribuya a una gestión más segura y sostenible del uso de insecticidas en sistemas agrícolas intensivos. Los resultados permitirán comprender mejor las posibles repercusiones fisiológicas del pesticida en esta etapa crítica del cultivo y podrán orientar decisiones agronómicas orientadas a mitigar riesgos y optimizar el establecimiento del cultivo.

II. MATERIAL Y MÉTODOS

Materiales

Se utilizaron semillas de tomate (*Solanum lycopersicum*), proporcionadas por la Universidad Nacional Agraria de La Molina. Las semillas fueron seleccionadas manualmente para asegurar uniformidad y calidad en tamaño, forma y la ausencia de daños visibles, de tal manera que su germinación no se encuentre en riesgo (Hatamleh et al., 2022). El imidacloprid es un insecticida sistémico perteneciente al grupo de los neonicotinoides se usó imidacloprid (SC) de la marca SERTMIN, con 350 g/L de ingrediente activo. La evaluación se realizó durante 7 días.

Preparación de soluciones

Las soluciones de imidacloprid se prepararon en agua destilada mediante diluciones seriadas a partir de la concentración comercial (350 g/L). Las concentraciones de trabajo seleccionadas para la evaluación fueron: 0.025, 0.05, 0.10 y 0.75 g/L (Goulson, 2013; Bonmatin et al., 2015).

Preparación de muestras

El estudio se basó en un diseño completamente al azar con cinco tratamientos (cuatro concentraciones

de imidacloprid y un control) y cinco réplicas por tratamiento, totalizando 25 unidades experimentales. Cada unidad experimental consistió en una placa Petri estéril de 9 cm de diámetro, en cuyo interior se colocaron 10 semillas viables de tomate sobre papel filtro Whatman N°6. Para la imbibición, se añadieron 5 mL de la solución correspondiente a cada placa. El control negativo consistió únicamente en agua destilada (sin plaguicida) para la comparación objetiva los efectos fitotóxicos. Las placas se incubaron en condiciones de oscuridad (cubiertas con papel Kraft) durante siete días consecutivos para favorecer la germinación. Esta metodología se implementó bajo condiciones controladas, de acuerdo con las recomendaciones de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2006).

Variables de evaluación y cálculos

Se midieron tres índices para cuantificar el efecto del imidacloprid en la germinación y el desarrollo temprano de la radícula.

Germinación relativa de semillas

Se consideró un evento de germinación exitosa cuando la radícula emergente alcanzó una longitud igual o superior a 1 mm, un criterio estándar en estudios de toxicidad genotóxica (Rodríguez et al., 2014). Se calculó como porcentaje de GRS y se calculó de acuerdo con la fórmula 1:

$$GRS(\%) = \frac{\text{Número de semillas germinadas en el tratamiento}}{\text{Número de semillas germinadas en el testigo}} \times 100$$

Crecimiento relativo de la radícula

El crecimiento relativo de la radícula (CRR) se obtiene dividiendo la longitud promedio de la muestra problema con la muestra testigo, ambas en mm (García-Esteva et al., 2014), se calculó con la siguiente fórmula 2:

$$CRR(\%) = \frac{\text{Longitud promedio de la radícula del tratamiento (mm)}}{\text{Longitud promedio de la radícula del testigo (mm)}} \times 100$$

Índice de germinación

El Índice de Germinación (IG) se utilizó para evaluar de forma integral el desarrollo de las raíces en cultivos, combinando el efecto de la germinación y la longitud de radícula lograda durante esta etapa (García-Esteva et al., 2014), se calculó con la siguiente fórmula:

$$IG(\%) = \frac{GRS * CRR}{100}$$

Donde:

IG: Índice de germinación

GRS: Germinación relativa de semillas

CRR: Crecimiento relativo de la radícula

Estos tres índices permiten evaluar la distribución y adaptación de las semillas (Rodríguez et al., 2014, p. 310).

Determinación de la concentración letal media (CL₅₀)

Para la determinación de la Concentración Letal Media (CL₅₀), se relacionaron los datos de la concentración de imidacloprid (mg/L) y el índice de germinación (IG). Los datos fueron ajustados a un modelo lineal mediante la conversión de las concentraciones a logaritmo en base 10 y los IG a la escala de unidades Probit (Gad, 2024; Qari, 2023).

Análisis de datos

Se usó el software estadístico SPSS 26 y el análisis estadístico Probit (Akçay, 2013; Finney & Stevens, 1948) para obtener los resultados de la prueba. Esta última se realizó con una confiabilidad del 95% y empleando un modelo matemático que establece una conexión entre la dosis y la respuesta. Para calcular la CL₅₀ y sus límites de confianza, se desarrolló el protocolo denominado: Análisis Probit y Análisis de regresión. Se obtuvo una ecuación lineal tipo $y = Bx + A$. Además, se calculó el coeficiente de determinación (R²), el error absoluto medio (EAM) y el error cuadrático medio (ECM), con la finalidad de comprobar el poder predictivo de las ecuaciones halladas.

III. RESULTADOS

La Tabla 1 presenta los datos obtenidos respecto a la germinación relativa de semillas y el crecimiento de la radícula de semillas de tomate germinadas bajo diferentes concentraciones del imidacloprid. Este parámetro es uno de los indicadores fisiológicos clave para evaluar la fitotoxicidad de agroquímicos durante la germinación.

Se puede observar que la longitud de la radícula disminuyó conforme se incrementó la dosis de

imidacloprid, y de la misma forma, se redujo el número de semillas germinadas. Como consecuencia, los valores de GRR y CRR mostraron una relación negativa con el aumento de la dosis de neonicotinoide. Sin embargo, para observar una relación lineal fue necesario realizar una transformación de datos.

Por otro lado, es preciso señalar que el objetivo de esta sección es establecer una tabla de recolección de datos clara y concisa para evitar confusiones a los futuros investigadores.

Tabla 1. Germinación relativa de semillas y crecimiento relativo de radícula por tratamiento.

Concentra- ción/Repeti- ción	Resultados de longitud de muestras (mm)										GRR	CRR	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	(%)		
Control	1	4	3	3	3,2	2,8	3,1	3	3	X	X	80	3,138
	2	3	3	3,4	3,8	3,7	3	4	3,6	X	X	80	3,438
	3	3	3,4	3,4	3,6	3	3,9	4	3,8	X	X	80	3,513
	4	2,9	3,4	3,6	3,9	3	3	3,8	3,7	X	X	80	3,413
	5	3	3	3	3,6	3,8	4	4	X	X	X	70	3,486
0.025 g/L	1	2,5	2,3	2	2	2,1	2	X	X	X	X	60	2,150
	2	3	3,2	3	2,6	2,4	2	X	X	X	X	60	2,700
	3	3	3	2,2	2	2,1	2	X	X	X	X	60	2,383
	4	2,3	2,5	2,8	2	2	X	X	X	X	X	50	2,320
	5	2,1	2	2	2,2	2,8	2	X	X	X	X	60	5,483
0.05 g/L	1	2,1	2	2,1	2	1,9	1	X	X	X	X	60	1,850
	2	2	1,8	1,7	1,6	2	X	X	X	X	X	50	1,820
	3	1	1,6	1,6	1,8	2	X	X	X	X	X	50	1,600
	4	3	2,7	3	2	1,8	1,7	X	X	X	X	60	2,367
	5	2	2	2	3,1	2,8	1,8	X	X	X	X	60	2,283
0.1 g/L	1	1,3	1,5	1,2	1	1	X	X	X	X	X	100	1,200
	2	1,8	1,8	1,9	1,5	X	X	X	X	X	X	50	1,700
	3	1,3	1	1	2	1,7	X	X	X	X	X	40	1,400
	4	2	1,7	2	1,9	X	X	X	X	X	X	50	1,900
	5	2	2	1,6	1	1,3	X	X	X	X	X	40	1,580
0.75 g/L	1	1	X	1	X	X	X	X	X	X	X	50	1
	2	1,1	1	1,2	X	X	X	X	X	X	X	30	1,1
	3	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	40	1
	4	1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	30	1
	5	X	1	X	X	X	X	X	X	X	X	30	1

Nota: "X" significa que la semilla presentó menos de 1 mm de radícula.

Para verificar gráficamente esta información (Figura 1) y con base en la Tabla 1, se elaboró un gráfico de dosis-respuesta, ya que el análisis Probit y el gráfico de dosis-respuesta posibilitan usar una curva sigmoideal de respuesta como en la investigación actual o transformarla a través de regresión lineal (Figura 2). La Figura 1 mostró claramente el comportamiento no lineal (sigmoide) de los índices de fitotoxicidad (GRS, CRR e IG), a medida que aumentó la concentración de imidacloprid. Esta relación no lineal es típica en estudios de toxicología y dificulta la determinación precisa de umbrales de efecto utilizando regresión simple. Por lo que fue necesario linealizar los datos para poder calcular el CL_{50} , y de esta manera tener una idea más clara de su efecto tóxico en la germinación de la semilla de tomate. Es preciso señalar que es recomendable usar el IG porque mide el efecto combinado de la germinación y la longitud. De esta manera, se puede calcular el CL_{50} con mayor precisión y exactitud.

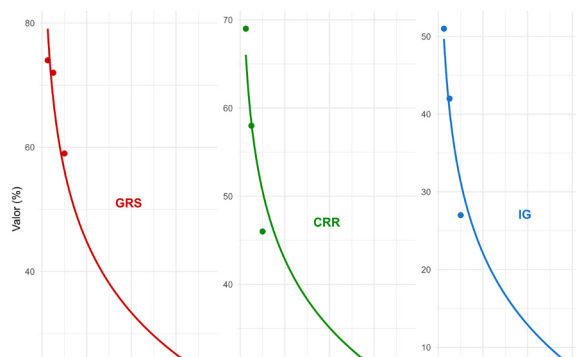


Figura 1. Concentración de imidacloprid vs GRR, GRS e IG.

En la siguiente figura (Figura 2) muestra el comportamiento los datos de estudio transformados, para poder calcular el CL_{50} , mostrando una tendencia lineal con un coeficiente de determinación (R^2) cercano a 1.

Tabla 2. Ecuaciones generadas por regresión lineal a partir de las medias de GRS, CRR e IG a diferentes tratamientos, durante 7 días.

Variable	Ecuación generada por regresión lineal
GRS	$y = 4,35 - 0,669x$ ($R = -0.9797$; $R^2 = 0.9599$; $EAM = 0.066$; $ECM = 0.0057$)
CRR	$y = 4,12 - 1,040x$ ($R = -0.9847$; $R^2 = 0.9696$; $EAM = 0.096$; $ECM = 0.0010$)
IG	$y = 3,32 + 1,090x$ ($R = -0.9981$; $R^2 = 0.9962$; $EAM = 0.031$; $ECM = 0.0014$)

$y = \text{Probit}$; $x = \log_{10}$ Concentración; R = coeficiente de correlación; R^2 = coeficiente de determinación; EAM = error absoluto medio; ECM = error cuadrático medio.

Se puede observar que el R^2 más alto le corresponde a la ecuación del índice de germinación (IG), con eso se pretende establecer un antecedente de la utilidad del IG para determinar el CL_{50} , pues en algunos antecedentes solo toman el GRS y/o el CRR.

Por otro lado, el error absoluto medio (EAM) de cada variable fue: 0,066, 0,096 y 0,031; y el error cuadrático medio (ECM) de cada variable fue: 0,0057, 0,010 y 0,0014, respectivamente, para GRS, CRR e IG. Estos resultados respaldan lo que se desea establecer con este trabajo, pues el modelo para el índice de germinación (IG) tuvo el menor EAM y el menos ECM. Por lo tanto, se recomienda que, en trabajo futuros se emplee solo el IG como variable para determinar la concentración letal media en germinados.

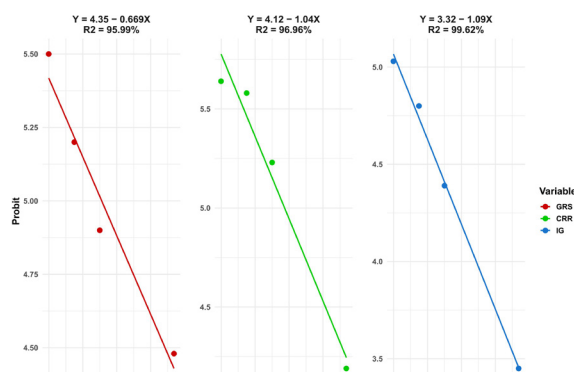


Figura 2. Logaritmo de la concentración de imidacloprid vs. los probit GRS, CRR y IG.

El modelo del índice de germinación se usó para hallar el CL_{50} del imidacloprid en semillas de tomates. Para este fin se reemplazó el 50% de inhibición de la germinación por su número probit correspondiente (5), para obtener el logaritmo en base 10 de la concentración de imidacloprid, con el antilogaritmo de este resultado se obtuvo una concentración CL_{50} de 0,0287 g/L o 28,7 mg/L.

IV. DISCUSIÓN

En el medio agrícola, los neonicotinoides, incluyendo el imidacloprid, constituyen un peligro constante, pues son los plaguicidas más empleados en todo el mundo. En muestras ambientales y agrícolas, muchos estudios han hallado una elevada proporción de detección de insecticidas neonicotinoides y sus metabolitos. No obstante, solo unos pocos estudios han examinado su impacto en la fenología de las plantas, específicamente en la germinación de semillas bajo la influencia de un entorno expuesto a neonicotinoides. Uno de los puntos centrales del análisis es que, aunque estos compuestos están diseñados para atacar el sistema nervioso de los insectos, su acumulación ambiental conlleva efectos colaterales. Afectan no solo a los insectos polinizadores, sino también al microbiota edáfico, alterando la dinámica de nutrientes esenciales para el desarrollo vegetal. Específicamente, el imidacloprid puede afectar la absorción radicular del agua y nutrientes, e incluso alterar la actividad enzimática de las semillas y causar fitotoxicidad indirecta al dañar la salud microbiana del suelo (Bonmatin et al., 2015; Goulson, 2013).

Las concentraciones de imidacloprid (0.025, 0.05, 0.10 y 0.75 g/L) se tomaron en base a estudios previos que indican que incluso bajas dosis de este neonicotinoide pueden alterar procesos fisiológicos clave en las semillas, como la absorción de agua, la actividad enzimática y la elongación de radícula durante la germinación (Bonmatin et al., 2015; Goulson, 2013). La elección de este rango de

diluciones permitió observar respuestas graduales sobre el vigor, velocidad de germinación y crecimiento temprano de plántulas, evitando la letalidad inmediata para establecer umbrales de toxicidad inicial (Elbert et al., 2008; Li et al., 2019). Este diseño aportó evidencia comparativa esencial frente al control (agua destilada), fundamentando la determinación de la concentración letal.

Los resultados de esta investigación demuestran un impacto negativo del uso de neonicotinoides en la germinación y el desarrollo temprano de las semillas de tomate. Los descubrimientos de Siddiqui & Alrumman (2022) brindaron apoyo empírico a estos hallazgos. Ellos observaron que en *Pisum sativum*, cuando se incrementó la concentración de imidacloprid (de 0,1% a 0,5%), la germinación de la semilla se redujo significativamente a las 24, 48 y 72 horas. Además, pudieron verificar una disminución del proceso de división celular en las raíces de *P. sativum* tratadas con imidacloprid: pasó del 49% en el control al menos del 20% en concentraciones del 0,5%. Esto sugiere que el incremento de la concentración de imidacloprid, incluso en dosis bajas, impacta tanto la germinación como el desarrollo de la radícula.

De manera similar, en la investigación de expusieron semillas de *Solanum lycopersicum* a concentraciones de imidacloprid (0, 25, 50, 75, 100, 150 y 200 $\mu\text{g}/\text{mL}$), observando que, el porcentaje de germinación fue menor al 40% con la más alta concentración. En este caso, no se aplicó el índice de germinación (IG) y no se tomaron en cuenta las radículas; sin embargo, se pesó la biomasa seca de las raíces y demostraron que la biomasa disminuye con el aumento de imidacloprid, confirmando el efecto negativo de este neonicotinoide sobre las radículas.

En otra prueba de germinación con trigo, la tasa de germinación fue del 92 % en el grupo testigo tras 5 días de exposición, disminuyó significativamente al 25 % en el tratamiento con imidacloprid (Zhao et al., 2024).

Para describir este efecto perjudicial, es relevante indicar que el primer mecanismo de acción del neonicotinoide es la adsorción, que tiene lugar cuando los sitios activos del suelo se saturan gradualmente a medida que la concentración del soluto crece (Rodríguez-Liébaná et al., 2018). La sorción ocurre bajo condiciones de adsorción favorables de manera análoga en la superficie de la semilla de tomate. Posteriormente, por absorción debido al gradiente de concentración, la semilla incorpora al neonicotinoide a su interior. Se ha observado una mayor absorción de compuestos como la atrazina en la radícula que en el brote (Wu et al., 2021). Una vez incorporado el neonicotinoide, desencadena la producción excesiva de especies reactivas al oxígeno, que en las plantas causa peroxidación lipídica y daño en la permeabilidad de la membrana celular, lo que finalmente provoca la muerte de las plantas (Silva et al., 2019).

Las plantas, por lo general, metabolizan y convierten los contaminantes sintéticos en compuestos inofensivos mediante cuatro etapas metabólicas: etapa I (oxidorreductasa/hidrolítica), etapa II (bioconjugación), etapa III (transporte) y etapa IV (reciclaje metabólico) (Edwards et al., 2011). El metabolismo biológico de los neonicotinoides, como el de otros xenobióticos, también está dividido en dos fases: la primera fase (que incluye desaturación, sulfoxidación, desalquilación, hidroxilación y reducción de nitrógeno) y la segunda fase (que incluye metilación, acetilación y formación de conjugados derivados de glucurónido/glucósido/aminoácido y sulfato y glutatión) (Casida, 2011; Ford & Casida, 2008).

Por otro lado, las mitocondrias, por su rol esencial en la respiración, la biosíntesis y otros procedimientos fisiológicos, tienen un papel crucial en cómo responde una célula vegetal a los estreses abióticos (Suzuki, 2023). La sensibilidad de la cadena de transporte de electrones mitocondrial a los compuestos analizados depende del órgano vegetal; en el caso del imidacloprid, fue más alta en los tejidos radiculares

(Shahid et al., 2024), que como se observó en este trabajo, la semilla de tomate no cuenta con el vigor para aplacar la biotoxicidad del neonicotinoide.

Con estos resultados se espera llamar la atención de la comunidad científica peruana, para que se restrinja su uso a través de las autoridades competentes y se apoyen investigaciones sobre métodos alternativos seguros, como el desarrollo de biopesticidas comparativamente más económicos y seguros para el medioambiente, puesto que en el Perú la comercialización de neonicotinoides no está adecuadamente regulada. Además, siendo una realidad inevitable, se están desarrollando experimentos que aportan una nueva perspectiva sobre la remediación del agua contaminada mediante la reacción tipo Fenton (Zhao et al., 2024).

V. CONCLUSIONES

El experimento demostró que la exposición al imidacloprid ejerce un efecto negativo y dosis-dependiente en las etapas de germinación y desarrollo temprano de la radícula de semillas de tomate (*Solanum lycopersicum*). Los índices Porcentaje de la Germinación Relativa de Semillas GRS, el (Crecimiento Relativo de la Radícula (CRR) y el Índice de Germinación (IG) evidenciaron una relación inversa y proporcional con el aumento de la concentración de neonicotinoides. El CRR resultó ser el parámetro más sensible a las bajas concentraciones, indicando que el impacto principal se centra en la inhibición del desarrollo radicular.

Se logró obtener un modelo de regresión lineal Probit altamente predictivo a partir del Índice de Germinación (IG), el cual mostró un alto coeficiente de determinación ($R^2 = 99,62\%$) y errores muy bajos ($EAM = 0,031$ y $ECM = 0,0014$). Este modelo estadísticamente robusto permitió determinar con precisión la Concentración Letal Media (CL_{50}) del imidacloprid para la germinación de semillas de tomate, cuyo valor se estableció en $0,0287$ g/L.

VI. CONFLICTO DE INTERES

Los autores declaran que no tienen conflictos de interés que puedan haber influido en el desarrollo de la investigación.

VII. CONTRIBUCIÓN DE AUTORES

Conceptualización, Metodología, Investigación, Recursos, Escritura – Borrador original: A.F.U.; C.I.R; J.P.B; C.P.B.; R.R.S.; Curación de datos, Supervisión, Validación, Análisis formal, Escritura – Revisión y edición: A.F.U.; R.C.G.

VII. REFERENCIAS

- Akçay, A. (2013). The Calculation of LD50 Using Probit Analysis. *The FASEB Journal*, 27(S1). https://doi.org/10.1096/fasebj.27.1_supplement.1217.28
- Bonmatin, J.-M., Giorio, C., Girolami, V., Goulson, D., Kreutzweiser, D. P., Krupke, C., Liess, M., Long, E., Marzaro, M., Mitchell, E. A. D., Noome, D. A., Simon-Delso, N., & Tapparo, A. (2015). Environmental fate and exposure; neonicotinoids and fipronil. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(1), 35–67. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-3332-7>
- Casida, J. E. (2011). Neonicotinoid Metabolism: Compounds, Substituents, Pathways, Enzymes, Organisms, and Relevance. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(7), 2923–2931. <https://doi.org/10.1021/jf102438c>
- Edwards, R., Dixon, D. P., Cummins, I., Brazier-Hicks, M., & Skipsey, M. (2011). *New Perspectives on the Metabolism and Detoxification of Synthetic Compounds in Plants* (pp. 125–148). https://doi.org/10.1007/978-90-481-9852-8_7
- Elbert, A., Haas, M., Springer, B., Thielert, W., & Nauen, R. (2008). Applied aspects of neonicotinoid uses in crop protection. *Pest Management Science*, 64(11), 1099–1105. <https://doi.org/10.1002/ps.1616>
- Finney, D. J., & Stevens, W. L. (1948). A table for the calculation of working probits and weights in probit analysis. *Biometrika*, 35(1), 191–201.
- Ford, K. A., & Casida, J. E. (2008). Comparative Metabolism and Pharmacokinetics of Seven Neonicotinoid Insecticides in Spinach. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(21), 10168–10175. <https://doi.org/10.1021/jf8020909>
- Gad, S. C. (2024). LD50/LC50 (lethal dosage 50/ lethal concentration 50). In *Encyclopedia of Toxicology* (pp. 803–806). Elsevier.
- Goulson, D. (2013). Review: An overview of the environmental risks posed by neonicotinoid insecticides. *Journal of Applied Ecology*, 50(4), 977–987. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12111>
- Hatamleh, A. A., Danish, M., Al-Dosary, M. A., El-Zaidy, M., & Ali, S. (2022). Physiological and oxidative stress responses of *Solanum lycopersicum* (L.) (tomato) when exposed to different chemical pesticides. *RSC Advances*, 12(12), 7237–7252. <https://doi.org/10.1039/D1RA09440H>
- Li, Y., Long, L., Ge, J., Li, H., Zhang, M., Wan, Q., & Yu, X. (2019). Effect of Imidacloprid Uptake from Contaminated Soils on Vegetable Growth. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 67(26), 7232–7242. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b00747>
- Qari, S. H. (2023). Evaluation of the antioxidant activity, genotoxic, and cytotoxic effects of the ethanolic leaves extract of *Abutilon hirtum* (Lam.) Sweet using in vitro assays. *Heliyon*, 9(8), e18617. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18617>
- Rodríguez-Liébana, J. A., Mingorance, M. D., & Peña, A. (2018). Thiacloprid adsorption and leaching in soil: Effect of the composition

- of irrigation solutions. *Science of The Total Environment*, 610–611, 367–376. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.028>
- Shahid, M., Singh, U. B., Farah, M. A., & Al-Anazi, K. M. (2024). Phyto-toxicological effect of fipronil to plant seedlings: Assessing germination attributes, root-tip morphology, oxidative stress, and cellular respiration indices. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 205, 106135. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2024.106135>
- Siddiqui, S., & Alrumman, S. A. (2022). Exposure of *Pisum sativum* L. Seeds to Methomyl and Imidacloprid Cause Genotoxic Effects in Pollen-Mother Cells. *Biology*, 11(11), 1549. <https://doi.org/10.3390/biology11111549>
- Silva, S., Ferreira de Oliveira, J. M. P., Dias, M. C., Silva, A. M. S., & Santos, C. (2019). Antioxidant mechanisms to counteract TiO₂-nanoparticles toxicity in wheat leaves and roots are organ dependent. *Journal of Hazardous Materials*, 380, 120889. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120889>
- Suzuki, N. (2023). Fine Tuning of ROS, Redox and Energy Regulatory Systems Associated with the Functions of Chloroplasts and Mitochondria in Plants under Heat Stress. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(2), 1356. <https://doi.org/10.3390/ijms24021356>
- Wu, J., Zhai, Y., Monikh, F. A., Arenas-Lago, D., Grillo, R., Vijver, M. G., & Peijnenburg, W. J. G. M. (2021). The Differences between the Effects of a Nanoformulation and a Conventional Form of Atrazine to Lettuce: Physiological Responses, Defense Mechanisms, and Nutrient Displacement. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 69(42), 12527–12540. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.1c01382>
- Zhao, R., Chen, D., Liu, H., Tian, H., Li, R., & Huang, Y. (2024). FePO₄/WB as an efficient heterogeneous Fenton-like catalyst for rapid removal of neonicotinoid insecticides: ROS quantification, mechanistic insights and degradation pathways. *Journal of Hazardous Materials*, 476, 135068. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.135068>