

Evaluación toxicológica de aguas residuales de arrozceras en el proceso germinativo de *zea mays*

Toxicological evaluation of rice paddy wastewater on the germination of *zea mays*

María Del Pilar Gutiérrez Orejuela¹   César Darío Peñaranda Medina¹  Nelson Alfonso Vega Contreras¹ 

¹ Universidad Francisco de paula Santander, Facultad Ciencias agrarias y del ambiente, Cúcuta, Norte de Santander, Colombia

¿Cómo citar?

Gutiérrez MP, Peñaranda CD, Vega NA. Evaluación toxicológica de aguas residuales de arrozceras en el proceso germinativo de *zea mays*. Ingeniería y Competitividad, 2026, 28(2) e-20315621

<https://doi.org/10.25100/iyv.v28i2.15621>

Recibido: 4/02/26

Revisado: 6/04/26

Aceptado: 14/05/26

Online: 22/06/26

Correspondencia

mariadelpilarguor@ufps.edu.co

Resumen

Objetivo: Evaluar el efecto de toxicidad de las aguas de riego provenientes de cultivos de arroz en el proceso germinativo de semillas de *Zea mays*.

Metodología: Se empleó un enfoque cuantitativo con diseño descriptivo y experimental. Las muestras de agua fueron recolectadas en dos sistemas de cultivo de arroz del departamento de Norte de Santander y sometidas a análisis fisicoquímicos. Además, se realizaron ensayos de germinación en campo y bioensayos in vitro para evaluar efectos fitotóxicos.

Resultados: Los análisis fisicoquímicos evidenciaron diferencias en la calidad del agua entre los sistemas evaluados, sugiriendo distintos niveles de biodegradabilidad y presencia de compuestos orgánicos persistentes. En los ensayos de germinación en campo no se detectaron efectos fitotóxicos agudos, alcanzándose una tasa de germinación del 100 % en los tratamientos con aguas residuales, mientras que el control positivo presentó inhibición total. En los bioensayos in vitro se observaron respuestas diferenciadas, con efectos bioestimulantes en un sistema y efectos inhibitorios en el otro. El análisis estadístico mostró diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

Conclusiones: Las aguas residuales de sistemas arrozceros pueden generar efectos fisiológicos subletales en condiciones controladas. Su uso como alternativa de riego para cultivos como el maíz podría ser viable a corto plazo, siempre que provengan de sistemas con baja carga de agroquímicos.

Palabras clave: Aguas residuales agrícolas, fitotoxicidad, germinación, *Zea mays*.

Abstract

Objective: To evaluate the toxicity effect of irrigation water from rice crops on the germination process of *Zea mays* seeds.

Methodology: A quantitative approach with a descriptive and experimental design was used. Water samples were collected from two rice cultivation systems in the department of Norte de Santander and subjected to physicochemical analysis. Field germination tests and in vitro bioassays were also conducted to evaluate phytotoxic effects.

Results: The physicochemical analyses revealed differences in water quality between the evaluated systems, suggesting varying levels of biodegradability and the presence of persistent organic compounds. No acute phytotoxic effects were detected in the field germination tests, with a 100% germination rate achieved in the wastewater treatments, while the positive control showed total inhibition. Differential responses were observed in the in vitro bioassays, with biostimulatory effects in one system and inhibitory effects in the other. Statistical analysis showed significant differences between treatments ($p < 0,05$).

Conclusions: Wastewater from rice farming systems can produce sublethal physiological effects under controlled conditions. Its use as an irrigation alternative for crops such as maize could be viable in the short term, provided it comes from systems with low agrochemical loads.

Keywords: agricultural wastewater, phytotoxicity, germination, *Zea mays*.



Contribución a la literatura

Este estudio proporciona datos toxicológicos sobre los efectos de los herbicidas en los procesos de germinación del maíz. Mediante bioensayos, permite monitorear los posibles impactos de los herbicidas utilizados en el cultivo de arroz sobre la germinación del maíz.

Los resultados más relevantes incluyen:

Los hallazgos más significativos de la investigación resaltan los efectos toxicológicos sobre la germinación del maíz causados por altas concentraciones de herbicidas utilizados en los arrozales, que son arrastrados por las aguas residuales generadas y posteriormente utilizadas para el riego, lo que podría tener un efecto toxicológico en los procesos de germinación de diversos cultivos.

Estos resultados contribuyen a lo siguiente:

Esta investigación aporta contribuciones en los campos científico, ambiental y metodológico. Desde una perspectiva científica, explica cómo los agroquímicos disueltos en el agua de los arrozales alteran los procesos de germinación de las semillas de *Zea mays*. Desde una perspectiva ambiental, ayuda a determinar si el agua de riego de los arrozales es apta para el riego o, por el contrario, podría tener un efecto negativo en los cultivos, lo que permite predecir y prevenir pérdidas de rendimiento en los cultivos de maíz. Desde una perspectiva metodológica, los bioensayos ayudan a establecer el uso de la germinación del maíz como indicador para calcular el Índice de Germinación y el Porcentaje de Fitotoxicidad.

Graphical Abstract



Introducción

El agua es un recurso esencial para la agricultura, y su disponibilidad es crucial en sistemas intensivos de riego, como el cultivo de arroz. Sin embargo, la agricultura se enfrenta a desafíos cada vez más complejos, como la escasez de agua y el deterioro de la calidad del agua. Estos problemas están relacionados con la sobreexplotación de acuíferos, el cambio climático y el uso intensivo de agroquímicos (1). Esta situación ha llevado a buscar alternativas que optimicen el uso del agua, como la reutilización de aguas residuales para riego agrícola. Aunque esta práctica ofrece beneficios en términos de disponibilidad y coste, también conlleva riesgos medioambientales y para la salud (2). El cultivo de arroz (*Oryza sativa*) se caracteriza por una alta demanda de agua y el uso rutinario de fertilizantes, herbicidas y otros productos químicos. Como resultado, se generan efluentes agrícolas que pueden contener altas concentraciones de sales, materia orgánica, metales y residuos agroquímicos. Estos elementos pueden alterar las propiedades fisicoquímicas del suelo y de los cuerpos de agua en los que se vierten (3). La acumulación de estos contaminantes no solo perjudica la productividad agrícola, sino que también supone un riesgo para los ecosistemas acuáticos y la sostenibilidad de los sistemas de riego. En este contexto, la germinación es una etapa crucial en el ciclo vital de las plantas. No solo marca el inicio del cultivo, sino que también influye en su crecimiento y rendimiento a lo largo del tiempo. La exposición de semillas a agua de riego contaminada puede afectar procesos fisiológicos clave, causar estrés osmótico y oxidativo, y provocar cambios en el crecimiento tanto de las raíces como de las partes superficiales de las plántulas. Esto se debe a una pérdida de turgencia, lo que resulta en una reducción del volumen celular y un aumento de solutos, lo que provoca un crecimiento atrofiado (4). Estudios recientes han revelado que las aguas residuales pueden afectar negativamente las tasas de germinación, interferir con la elongación radicular y aumentar los indicadores de estrés celular, como la producción de peróxido de hidrógeno y la fuga de electrolitos. Todo esto puede conducir a un desarrollo anormal de las plantas e incluso a la muerte de las plantas (5), (6). *Zea mays* (maíz) es ampliamente reconocido como bioindicador en estudios de toxicidad ambiental, especialmente para evaluar herbicidas y la calidad del agua. Esto se debe principalmente a su alta sensibilidad durante las primeras etapas del desarrollo (7). Esta característica permite identificar efectos subletales de contaminantes en el agua reutilizada, que podrían no detectarse en análisis que se centran únicamente en aspectos fisicoquímicos (8-9). Además, se ha documentado que la respuesta del maíz a factores como la salinidad y la presencia de compuestos tóxicos refleja de forma fiable alteraciones en los mecanismos fisiológicos y bioquímicos de las plantas. Aunque el uso de aguas residuales en la agricultura ha aumentado, todavía existen pocos estudios que combinen la caracterización fisicoquímica de esta agua con evaluaciones biológicas del proceso de germinación, tanto bajo condiciones de laboratorio controladas como en entornos agrícolas reales. Esta falta de conocimiento dificulta nuestra comprensión de cómo los contaminantes en el agua de riego afectan al crecimiento temprano de las plantas. Esto, a su vez, dificulta la capacidad de tomar decisiones informadas para una gestión sostenible del agua. Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar cómo las aguas residuales de los cultivos de arroz afectan a la germinación de *Zea mays*.

Materiales y métodos

Diseño del estudio

La fase experimental se centró en evaluar el efecto toxicológico de las aguas residuales de arrozales sobre la germinación y el crecimiento temprano de *Zea mays* mediante experimentos controlados. Se recogieron muestras de aguas residuales de dos sistemas de cultivo de arroz situados en los municipios de El Zulia (Granja de Arroz A; 7°55'22"N, 72°35'43"O) y Santiago (Granja de Arroz B; 7°53'46.1"N, 72°41'59.8"O), en el departamento de Norte de Santander, Colombia. El muestreo se realizó durante la temporada activa de fumigación, que se considera el momento de mayor carga contaminante en la columna de agua. En cada sistema, se realizó muestreo compuesto recogiendo alicotas en cinco puntos diferentes de la columna de agua, que luego se combinaron para formar una muestra representativa. El arrozal A fue tratado con el herbicida atrazina, mientras que el arrozal B fue tratado con el herbicida propanilo.

Preservación de muestras

Las muestras se recogieron de acuerdo con las directrices establecidas en *Métodos Estándar para el Examen de Agua y Aguas Residuales*. Se almacenaban en recipientes de polietileno prepreparados y se mantenían a 4 °C hasta su análisis en laboratorio, que se realizaba en seis horas tras la recogida.

Caracterización fisicoquímica

Se determinaron los siguientes parámetros de calidad del agua: demanda química de oxígeno (COD), demanda bioquímica de oxígeno (BOD₅), oxígeno disuelto, pH, conductividad eléctrica, turbidez, alcalinidad, acidez, dureza total y de calcio, cloruros y sólidos totales en suspensión. Todas las determinaciones se realizaron de acuerdo con los métodos estandarizados descritos en los Métodos Estándar, utilizando técnicas volumétricas, potenciométricas y gravimétricas, dependiendo del parámetro evaluado.

Área de estudio y muestreo de suelos

Se recogieron muestras de suelo de dos parcelas experimentales situadas en las aldeas de Las Violetas (parcela 1; 7°55'58"N, 72°47'26"O) y Boyacá (parcela 2; 7°55'13"N, 72°48'08"O), en el municipio de Gramalote, Norte de Santander, Colombia. El muestreo se realizó de forma aleatoria dentro del área designada para la siembra. En cada sitio se recogieron diez muestras a una profundidad de 20 cm, correspondiente a la zona donde la actividad radicular del cultivo de maíz es más intensa y donde hay mayor interacción con el agua de riego. Las muestras se mezclaron para crear una muestra representativa de cada lugar.

Caracterización fisicoquímica del suelo

Las muestras de suelo se analizaron tanto antes como después del periodo de riego, con el objetivo de establecer condiciones de referencia y evaluar cualquier cambio que pudiera resultar del uso de aguas residuales. Los análisis se realizaron en duplicado e incluyeron mediciones de materia orgánica, textura, pH y conductividad eléctrica. La materia orgánica se determinó mediante el



método de Walkley y Black. Para evaluar la textura, se aplicó el método del hidrómetro Bouyoucos. Además, se midieron el pH y la conductividad eléctrica en una suspensión suelo-agua 1:1.

Siembra de semillas de *Zea mays* (maíz)

Se usaron semillas de *Zea May* de la variedad Puyita; Esta variedad es conocida por su adaptación a climas templados. Todas las semillas procedían del mismo lote comercial certificado, lo que aseguraba que sean genética y fisiológicamente homogéneas. Estas semillas fueron seleccionadas por su tamaño uniforme, con un diámetro medio de 8 a 10 mm por semilla. Además, son mayormente de forma ovalada, aunque algunas están ligeramente aplanadas. La siembra se realizó en dos parcelas experimentales, cada una de 1 × 4 m (superficie individual de 4 m²), ubicadas en las aldeas de Las Violetas y Boyacá, en el municipio de Gramalote, Norte de Santander, Colombia. Se utilizó el método de siembra directa, colocando las semillas a una profundidad de aproximadamente 4 cm y asegurando un espaciamiento uniforme entre plantas y hileras, como sugiere (10).

Aplicación de tratamientos de riego

El experimento se llevó a cabo utilizando un diseño completamente aleatorizado (CRD), centrado en un único factor de estudio: el tipo de agua utilizada para el riego. Se evaluaron cuatro tratamientos: (I) aguas residuales del Molino de Arroz A, (II) aguas residuales del Molino de Arroz B, (III) un control negativo usando agua limpia y (IV) un control positivo que consistía en la aplicación de glifosato a una concentración de 480 g/L (11). Los tratamientos se asignaron aleatoriamente a surcos separados dentro de cada parcela experimental y evaluados en dos ubicaciones (las aldeas de Las Violetas y Boyacá), que se consideraron sitios experimentales independientes. En cada ubicación se plantaban cinco plántulas por tratamiento, y estas se consideraban unidades experimentales individuales. No se implementaron réplicas en cada ubicación; Sin embargo, al considerar ambas localizaciones conjuntamente, se obtuvieron un total de diez plántulas por tratamiento ($n = 10$), para un total total de 40 plántulas en el experimento. Cada plántula recibió 5 mL del tratamiento correspondiente, aplicado dos veces al día durante un periodo de 20 días, directamente en la base de la planta para simular la exposición localizada. Durante el periodo experimental se monitorizó el crecimiento y la condición general de las plántulas. Las variables analizadas incluyeron la tasa de germinación, la longitud de las plántulas y los cambios fisiológicos.

Bioensayos de toxicidad aguda con *Zea mays* (Preparación de soluciones herbicidas)

Las muestras de aguas residuales se diluyeron en agua destilada siguiendo un esquema de dilución volumen-volumen (% v/v), con concentraciones de acuerdo con la metodología propuesta por (12): 75, 50, 25, 10 y 1%, con un volumen final de 100 mL por cada dilución. Todas las soluciones se prepararon en matraces volumétricos y se mezclaron manualmente durante un minuto. A continuación, se prepararon diluciones de los herbicidas propanil y atrazina. El propanil (480 g/L, formulación comercial) se diluyó inicialmente en un rango del 1 al 75%. Sin embargo, a la concentración del 1%, se produjo una inhibición completa, por lo que las concentraciones se ajustaron a un rango entre el 0,2 y el 1%. Para el cálculo de la dilución, se aseguró un volumen final de 50 mL para cada dilución. La atrazina (800 g/kg, formulación sólida) se preparó a partir de una solución estándar de 25 g/L, equivalente a la dosis utilizada en agricultura (5 kg en 200 L). A partir



de esta solución, se prepararon diluciones al 75%, 50%, 25%, 10% y 1%, con un volumen final de 100 mL, utilizando agua destilada como disolvente.

Bioensayo de germinación

El bioensayo de germinación se basó en la metodología descrita por (13), con algunas modificaciones, en la que se colocaron 5 mL de cada dilución en placas de Petri utilizando algodón estéril como sustrato. Se distribuyeron veinte semillas de *Zea Mays* en cada plato. Los platos se incubaron durante 5 días en la oscuridad a una temperatura de 22 ± 2 °C, y el riego de mantenimiento se realizó el tercer día. Se usaron un control negativo (agua destilada) y un control de inhibición positiva (aguas residuales sin diluir (100% v/v) y herbicidas en su concentración máxima). Una vez completado el periodo de incubación, se midió la longitud de la radícula en milímetros, y el porcentaje de crecimiento y el porcentaje de inhibición se calcularon usando las Ecuaciones 1 y 2.

Ec (1)
$$\% \text{ growth} = \frac{\text{average dilution ratios}}{\text{average negative control lengths}}$$

Ec (2)
$$\% \text{ inhibition} = 100\% - \% \text{ growth}$$

Análisis citogenético

Para evaluar el daño celular, se siguió la metodología descrita por (14). Se usaron las puntas de raíz de *Zea Mays*; Estos se sumergieron en ácido clorhídrico durante 20 minutos para ayudar a descomponer el tejido. Luego se lavaban con agua destilada y se teñían con acetato de orceína durante 45 minutos. Las muestras teñidas se colocaron en portaobjetos de microscopio y posteriormente se observaron al microscopio para identificar posibles alteraciones en la división celular.

Análisis estadístico

Los datos sobre la longitud de la raíz obtenidos en cada réplica experimental se organizaron y procesaron en hojas de cálculo. Para ello, se utilizó un diseño factorial de 2k, con dos tratamientos diferentes de aguas residuales y tres réplicas de cada uno; se aplicó un análisis unidireccional de la varianza (ANOVA), con un nivel de significación de $\alpha = 0,05$, para analizar las diferencias entre los tratamientos (diluciones de aguas residuales, control negativo y control positivo).

Resultados y discusión

Caracterización fisicoquímica del agua de riego

La siguiente Tabla 1 muestra los parámetros fisicoquímicos medidos en las aguas residuales de dos sistemas de cultivo de arroz. Estos parámetros son clave para evaluar la calidad del agua y su impacto en los procesos agrícolas, especialmente durante la germinación.



Tabla 1. Resultados de la caracterización fisicoquímica de aguas residuales de molinos de arroz.

Variables	Unidades	Arroz A (El Zulia)	Arrozalera B (Santiago)
Oxígeno químico	mg/L O2	64.0	76.8
Demanda (COD)			
Demanda bioquímica de oxígeno (DBD ₅)	mg/L O2	60.0	22.0
Oxígeno disuelto	mg OD/l	6.8	5.2
pH	Unidades de pH	7.0	7.2
Conductividad	mS	0.70	0.1
Turbidez	NTU	16.5	699
Alcalinidad	mg/L CaCO ₃	34.0	26.0
Acidez total	mg/L CaCO ₃	9.5	4.5
Dureza del calcio	mg/L CaCO ₃	85.0	50.0
Dureza total	mg/L CaCO ₃	123.0	126.0
Cloruros	mg/L Cl	16.8	23.3
Sólidos totales en suspensión	mg SST/L	0.025	0.0

La proporción COD/BOD₅ en el Molino de Arroz A era de 1,06, lo que sugiere que la materia orgánica es altamente biodegradable. Cuando los valores son inferiores a 2, esto suele indicar que las aguas residuales contienen principalmente compuestos que se degradan fácilmente y tienen una baja concentración de sustancias refractarias (15). Este comportamiento es coherente con un pH neutro de 7,0 y un nivel de oxígeno disuelto de 6,8 mg/L, ambos dentro de los rangos recomendados para uso agrícola (16). En contraste, el campo de arroz B mostró una relación COD/DBD₅ de 3,49, lo que indica la presencia de materia orgánica poco biodegradable, posiblemente relacionada con compuestos que tienden a persistir (17). Aunque no se midieron herbicidas ni sus metabolitos, este comportamiento se asemeja al observado en los sistemas de cultivo de arroz durante etapas avanzadas de cultivo. Durante estas fases, se utilizan herbicidas postemergentes como propanil; Sus productos de transformación, como la 3,4-dicloranilina, tienden a ser más persistentes en el entorno (18). La alta turbidez observada en el Arrozal B (699 NTU) apoya esta interpretación, ya que sugiere una alta concentración de partículas finas y materia orgánica en el agua. Estos sólidos ayudan a que los agroquímicos y la materia orgánica se adhieran a los coloides, lo que reduce su biodisponibilidad y retrasa su degradación (19). Aunque la conductividad eléctrica y los niveles de cloruro no superaron los límites críticos para el riego, la combinación de alta turbidez y baja biodegradabilidad podría aumentar el riesgo de efectos subletales durante la germinación. Las diferencias observadas entre ambos sistemas no se deben únicamente a la calidad de las aguas residuales, sino también a cómo se gestiona la agricultura y a la etapa del ciclo de cultivos. El agua procedente de tierras en preparación suele ser más biodegradable, mientras que el agua generada durante el crecimiento activo de cultivos tiende a tener una mayor carga de compuestos persistentes y sólidos en suspensión.

Caracterización fisicoquímica del suelo antes y después del riego (tabla 2)

Tabla 2. muestra los resultados de la caracterización fisicoquímica del suelo antes y después del riego con agua de los arrozales.

Iniciales				
Variables	Unidades	Lot 1 (vereda las violetas)	Lote 2 (vereda Boyacá)	Muestra de glifosato
Materia orgánica	mg O2/L	4.4	3.8	
Textura	-	Tierra arenosa	Tierra arenosa	
pH	Unidos de pH	3.1	5.4	
Conductividad	mS	0.1	0.3	
Finales				
Materia orgánica	mg O2/L	10.2%	4.6%	5.1%
Textura	-	Tierra arenosa	Tierra arenosa	Tierra arenosa
pH	Unidos de pH	3.7	5.4	5.3
Conductividad	mS	0.31	1.5	1.6

Antes del riego, ambos tipos de suelo presentaban texturas de tierra arenosa y arcillosa arenosa, con niveles moderados de materia orgánica, características comunes en suelos agrícolas. Tras aplicar los tratamientos, se observó un aumento de materia orgánica, especialmente en la Parcela 1, que registró un incremento del 10,25%, y en menor medida en la Parcela 2, con un incremento del 4,95%. Este aumento indica el transporte de compuestos orgánicos—tanto disueltos como particulados—asociados con la escorrentía y los residuos vegetales. Este fenómeno ya se había reportado anteriormente en sistemas de riego por inundación (20). El pH del suelo mostró un aumento moderado en ambas parcelas, lo que sugiere una ligera tendencia hacia condiciones menos ácidas. Este comportamiento es coherente con estudios que indican que el riego constante y las inundaciones favorecen procesos redox y la incorporación de cationes básicos, que ayudan a neutralizar parcialmente la acidez del suelo (21); La magnitud del cambio también indica que el suelo tiene una alta capacidad de amortiguamiento, lo que ayuda a prevenir cambios bruscos en la acidez. La conductividad mostró un ligero aumento en los suelos irrigados con agua superficial procedente de sistemas de cultivo de arroz, lo que sugiere una incorporación moderada de sales y nutrientes, sin riesgo de salinización. En contraste, el tratamiento con glifosato mostró los niveles de conductividad más altos, lo que indica una acumulación localizada del herbicida. Esto es coherente con su capacidad para adsorbirse sobre partículas minerales y materia orgánica (22). Una comparación entre las descripciones inicial y final del suelo reveló diferencias en las proporciones de arena, limo y arcilla. Sin embargo, estos cambios no indican una alteración real en la textura del suelo, sino más bien una redistribución superficial de las fracciones más finas, principalmente debido al efecto del riego. Por lo tanto, en general, la textura del suelo se mantuvo constante durante todo el estudio.



Efecto de los tratamientos de riego en *Zea mays* (Field)

En ambas parcelas, los tratamientos de riego con aguas residuales de cultivos de arroz (Arrozales A y Arrozales B) alcanzaron una tasa de germinación del 100%, comparable a la del control negativo. En cambio, el control positivo con glifosato inhibió completamente la germinación, confirmando la sensibilidad del ensayo y la validez del diseño experimental. La ausencia de efectos fitotóxicos agudos durante la germinación indica que el uso de estas aguas residuales no afecta el establecimiento inicial del cultivo en condiciones de campo. Este comportamiento podría estar relacionado con un efecto bioestimulante del agua de riego, debido a la presencia de materia orgánica y nutrientes —como nitrógeno y fósforo— disponibles en formas que las plantas pueden asimilar fácilmente (23). Las longitudes medias de las plántulas fueron similares entre los tratamientos con agua de arroz y el control negativo. En el Gráfico 1, los valores oscilaban entre 23 y 24 cm, mientras que en el Gráfico 2 oscilaban entre 32 y 34 cm. Las diferencias observadas no fueron estadísticamente significativas e indican una respuesta uniforme del cultivo, lo que sugiere que las condiciones del suelo no afectaron al crecimiento inicial. Esto es coherente con la notable adaptabilidad del maíz durante la etapa de germinación (24). La ausencia de efectos adversos en el campo, a pesar de las diferencias fisicoquímicas previamente reportadas en el agua, puede explicarse por los procesos naturales de atenuación del suelo. Estos incluyen la sorción, la retención física, la biodegradación y la dilución, que ayudan a reducir la biodisponibilidad de compuestos potencialmente tóxicos (25). En este contexto, el suelo actúa como un amortiguador que protege a las plántulas de la exposición directa durante las primeras etapas de su desarrollo. Sin embargo, la diferencia entre estos resultados y los de las pruebas de laboratorio —donde el agua de Arrocería B mostró efectos inhibitorios— sugiere que pueden existir efectos subletales o crónicos que no se manifiestan durante cortos periodos de exposición en el campo. Estudios recientes sugieren que la exposición prolongada a mezclas de agroquímicos puede causar estrés oxidativo, daño genético y cambios en la microbiota del suelo. Estos efectos no siempre se manifiestan durante la germinación, pero pueden influir en las etapas posteriores del crecimiento de la planta (26). Los hallazgos indican que el uso de aguas residuales de cultivos de arroz podría ser una alternativa viable para el riego a corto plazo de *Zea mays*, ya que no causa efectos fitotóxicos inmediatos y además aporta nutrientes al sistema. Sin embargo, es esencial enfatizar la importancia de evaluar los efectos a largo plazo. Esto implica considerar los ciclos completos de cultivo, la acumulación

Toxicidad de las aguas residuales del cultivo de arroz a los mayos de *Zea* (ensayos *in vitro*)

Los resultados de los bioensayos de toxicidad realizados con aguas residuales de dos sistemas de cultivo de arroz se muestran en la Figura 1. Para los arrozales A y B, la Tabla 3 describe el porcentaje de crecimiento y el porcentaje de inhibición en las semillas de *Zea mays*. Las diferentes diluciones afectan la longitud de la radícula.

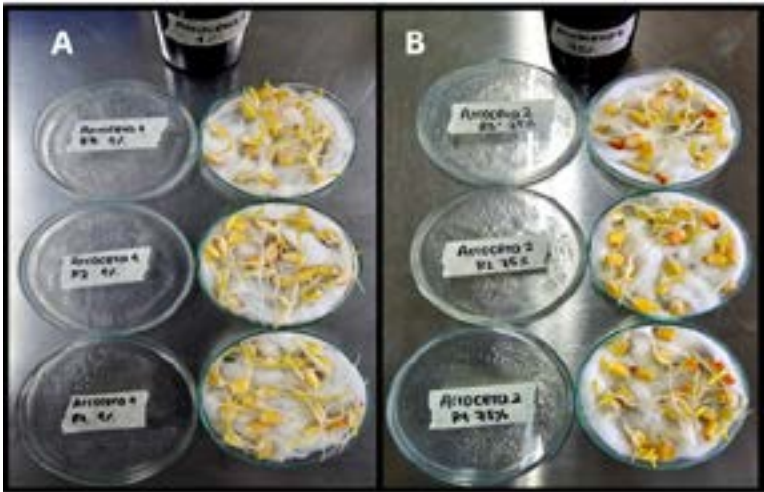


Figura 1. Germinación in vitro final en agua de los arrozales A y B.

Tabla 3. Resultados de la prueba de toxicidad en aguas residuales de los molinos de arroz A y B

Tratamiento	Repeticiones	Longitud media (cm)	DMS en cm	% Crecimiento	% inhibición	Tratamiento	Repeticiones
1%	5.8	6.57	0.78	162.22	-62.22	1%	5.1
	6.8						5.5
	6.9						5.0
10%	5.8	6.42		158.44	-58.44	10%	5.0
	6.7						5.3
	6.8						5.0
25%	5.7	6.29		155.35	-55.35	25%	4.8
	6.4						4.9
	6.7						5.1
50%	5.4	5.53		136.63	-36.63	50%	4.7
	5.5						4.8
	5.7						4.7
75%	4.6	4.73		116.67	-16.67	75%	4.4
	4.7						4.5
	4.8						4.4
Control negativo	6.4	6.95		-	-	Control negativo	6.0
	7.1						6.3
	7.2						6.1
Control positivo	3.8	4.05		-	-	Control positivo	3.9
	4.0						4.7
	4.0						4.4

Longitud media (cm)	DMS en cm	% Crecimiento	% inhibición
5.23		85.53	14.47
5.15		118.48	-18.48
	0.28		
4.96		81.14	18.86
4.78		78.20	21.80
4.55		74.33	25.67
6.115			-
4.35			

La variabilidad media de las raíces se muestra en la Figura 2, que muestra el crecimiento del arrozal A tratado con aguas residuales y los diferentes tratamientos herbicidas aplicados. La figura muestra un mayor crecimiento radicular en los tratamientos aplicados al arrozal, A en comparación con el arrozal, B, con una diferencia mínima significativa (MSD) de 0,78 cm en el primer tratamiento, en contraste con el arrozal, que tenía un MSD de 0,28 cm, como se muestra en la Tabla 1.

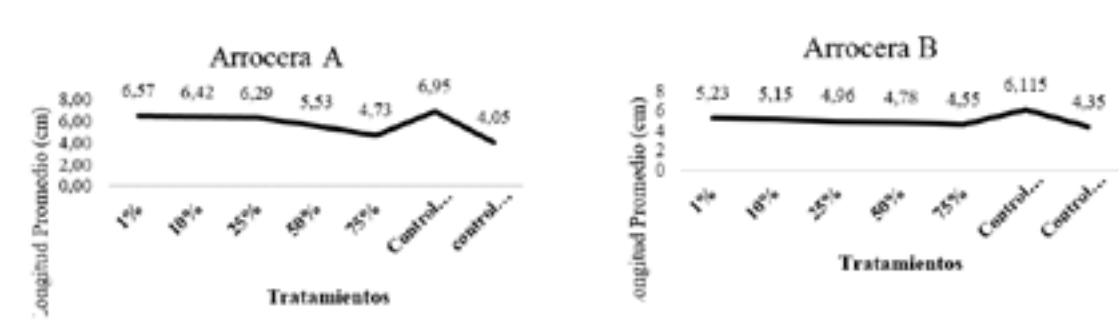


Figura 2. Longitud media de las radículas en semillas expuestas a aguas residuales de los arrozales A y B



En las muestras de la planta de arroz A, se observó un aumento en la longitud media de las radicales en todas las diluciones evaluadas (1–75%) en comparación con el control negativo. Las tasas de crecimiento superiores al 100% y valores negativos de inhibición indican una respuesta hormética, caracterizada por estimulación biológica a bajas concentraciones de un factor estresante (27), (28). Este efecto suele estar relacionado con la presencia de nutrientes residuales y compuestos orgánicos fácilmente biodegradables. Estos elementos pueden impulsar procesos metabólicos relacionados con la respiración celular y el crecimiento radicular. Estudios recientes han demostrado que los cultivos expuestos a agua agrícola con niveles moderados de materia orgánica y bajas concentraciones de pesticidas presentan comportamientos similares, lo que indica un efecto bioestimulador durante las primeras etapas del desarrollo de la planta (29). En contraste, los bioensayos realizados con aguas residuales del Arrozador B mostraron un patrón de inhibición dependiente de la concentración. La Figura 3 muestra reducciones progresivas en la longitud de las radículas a medida que aumentaba la proporción de aguas residuales. Las diluciones del 50% y 75% mostraron los niveles más altos de inhibición, lo que sugiere que los compuestos tóxicos permanecen en el entorno. Este comportamiento es coherente con el uso de herbicidas postemergentes como el propanilo. Su metabolito, 3,4-dicloranoanilina (3,4-DCA), es más persistente y tóxico que la molécula original (30), (31). Estudios como los de (32) han demostrado que, en sistemas de cultivo de arroz inundados, una porción considerable de 3,4-DCA puede quedar atrapada en el suelo como un residuo que no puede ser extraído, lo que podría prolongar su persistencia en el entorno y aumentar su toxicidad. Cabe destacar que estos compuestos pueden acumularse en cuerpos de agua agrícolas debido a las diversas formas en que se degradan, que dependen de procesos microbianos y fotoquímicos que ocurren a diferentes ritmos (33). El patrón inhibitorio observado en *Zea mays* es coherente con los efectos fisiológicos reportados para propanil y sus metabolitos. Estos compuestos afectan la respiración mitocondrial, el transporte de electrones y la división celular en tejidos meristemáticos (34). Las diferencias entre los dos sistemas de cultivo del arroz muestran que, incluso dentro del mismo modelo de producción, la composición química de las aguas residuales puede variar considerablemente, lo que a su vez conduce a respuestas fisiológicas muy distintas. Mientras que el agua de la Granja de Arroz A mostró un efecto bioestimulador a bajas concentraciones, el agua de la Granja de Arroz B reveló efectos inhibitorios que podrían manifestarse como impactos subletales o crónicos, que no siempre son evidentes en ensayos de germinación de campo a corto plazo.

Toxicidad de los herbicidas de referencia (Atrazina y Propanil) en *Zea Mays*

Para contextualizar los efectos observados en aguas residuales de cultivos de arroz, se realizaron bioensayos utilizando herbicidas comúnmente aplicados a cultivos de arroz, como la atrazina y el propanilo, que indujeron con éxito la germinación, como se muestra en la Figura 3 a continuación.

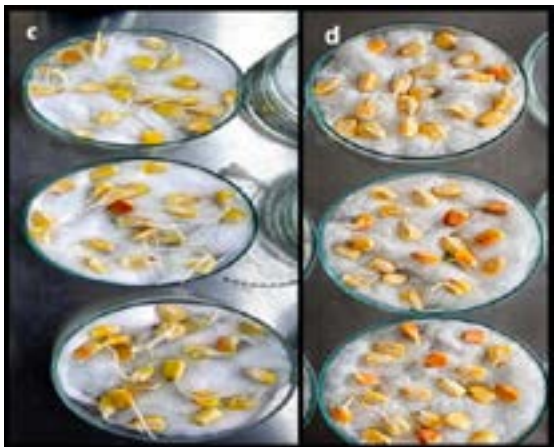


Figura 3. Tasas finales de germinación in vitro para los herbicidas atrazina (c) y propanil (d).

Sin embargo, los resultados respecto al impacto en el proceso de germinación difirieron para cada herbicida según los distintos tratamientos, como se muestra en la Tabla 4 a continuación, lo que revela una diferencia significativa de 0,5 cm entre los dos arrozales, siendo este herbicida quien tuvo un mayor impacto en el segundo arrozal.

Tabla 4. Resultados de la prueba de toxicidad para los herbicidas atrazina y propanil

Tratamiento	Repeticiones	Longitud media (cm)	DMS en cm	% Crecimiento	% inhibición	Tratamiento
1%	5.8	6.57	0.78	162.22	-62.22	1%
	6.8					
	6.9					
10%	5.8	6.42		158.44	-58.44	10%
	6.7					
	6.8					
25%	5.7	6.29		155.35	-55.35	25%
	6.4					
	6.7					
50%	5.4	5.53		136.63	-36.63	50%
	5.5					
	5.7					
75%	4.6	4.73		116.67	-16.67	75%
	4.7					
	4.8					
Control negativo	6.4	6.95		-	-	Control negativo
	7.1					
	7.2					
Control positivo	3.8	4.05		-	-	Control positivo
	4.0					
	4.0					

Repeticiones	Longitud media (cm)	DMS en cm	% Crecimiento	% inhibición
5.1	5.23	0.28	85.53	14.47
5.5				
5.0				
5.0	5.15		118.48	-18.48
5.3				
5.0				
4.8	4.96		81.14	18.86
4.9				
5.1				
4.7	4.78		78.20	21.80
4.8				
4.7				
4.4	4.55		74.33	25.67
4.5				
4.4				
6.0	6.115			-
6.3				
6.1				
3.9	4.35			
4.7				
4.4				

La aplicación de estos dos herbicidas resultó en una reducción del crecimiento de las raíces, y la raíz tratada con atrazina mostró mayor longitud de crecimiento; Alcanzó un crecimiento de 3,0 cm con el tratamiento al 1%, en comparación con el propanilo, que alcanzó solo 2,4 cm con el mismo tratamiento. La Figura 4 muestra la variabilidad en la longitud de las raíces según los diferentes tratamientos aplicados a la semilla con los dos herbicidas, lo que indica que el antagonismo depende de la dosis utilizada durante el proceso (35).

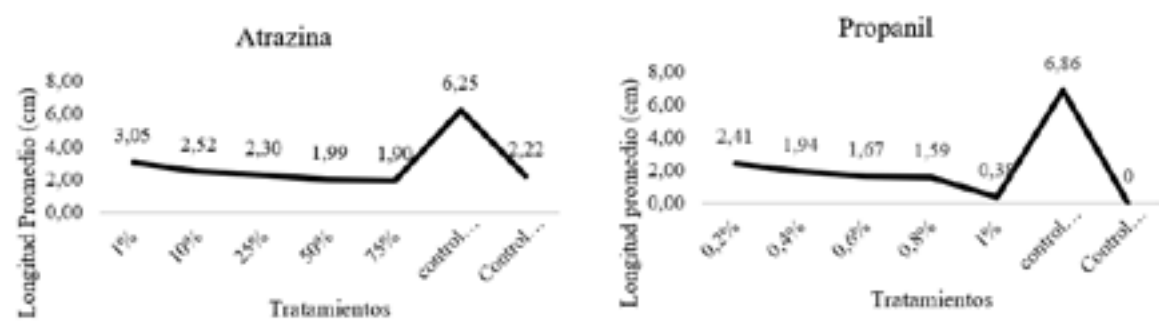


Figura 4. Longitud media de radícula en semillas expuestas a los herbicidas atrazina y propanil.

La atrazina mostró un efecto inhibitorio moderado pero constante sobre el crecimiento radicular de *Zea mays*, con porcentajes de inhibición que oscilaban entre el 51% y el 69% en las distintas concentraciones evaluadas. Este comportamiento es coherente con su papel como inhibidor del Fotosistema II, que reduce la energía disponible necesaria para el alargamiento celular y el crecimiento inicial de las plántulas. En contraste, propanil mostró un efecto altamente fitotóxico, con tasas de inhibición que alcanzaron casi el 94% incluso en concentraciones bajas, lo que indica una respuesta marcada en comparación con la atrazina. Este comportamiento es coherente con investigaciones previas que indican que propanil afecta a la respiración mitocondrial, la elongación celular y la síntesis de proteínas en los tejidos en crecimiento. Además, su efecto se intensifica por su metabolito principal, 3,4-dicloroanilina (3,4-DCA) (36). La figura 3 a continuación muestra el proceso *in vitro* que involucra estos herbicidas. Los estudios han demostrado que los metabolitos derivados de herbicidas pueden causar estrés oxidativo al generar especies reactivas de oxígeno (ROS), lo que afecta especialmente a los tejidos merismáticos durante la germinación (37), (38). Aunque las plantas tienen sus propios mecanismos de desintoxicación, como la glicosilación realizada por las UDP-glicosiltransferasas, estos mecanismos a veces son insuficientes. Esto ocurre cuando las concentraciones de toxinas son muy altas o cuando los compuestos se unen a partículas en el suelo o el agua, dificultando su eliminación (39), (40), (41). En conjunto, los resultados obtenidos con herbicidas puros permiten establecer un marco toxicológico que ayuda a interpretar los efectos observados en las aguas residuales de cultivos de arroz. En particular, el patrón inhibitorio detectado en el agua de Rice Farm B parece estar relacionado con la presencia de propanil o sus metabolitos. Por otro lado, los efectos menos graves observados en otras muestras se desvían del comportamiento típico de herbicidas altamente fitotóxicos, como el propanilo.

Análisis citogenético

La exposición de *Zea mays* a herbicidas no causó ninguna inhibición notable de la germinación ni del crecimiento temprano de las raíces. No se encontraron alteraciones citogenéticas visibles, como aberraciones cromosómicas, micronúcleos o puentes anafásicos; por lo tanto, se observó división mitótica, como se muestra en la Figura 5 más abajo.

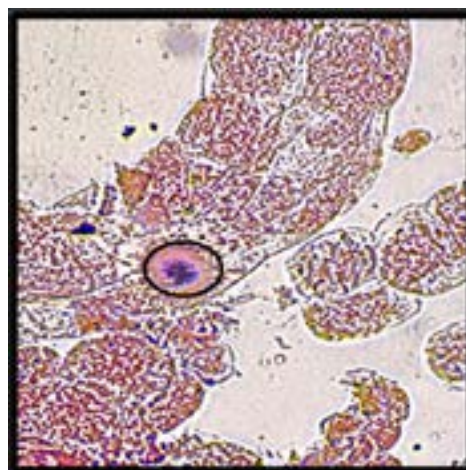


Figura 5. Células en división celular

Este resultado demuestra que existen efectos fisiológicos significativos, pero no se ha encontrado evidencia de daño genético detectable bajo las condiciones experimentales evaluadas. Por lo tanto, desde un punto de vista fisiológico, la inhibición del crecimiento puede estar relacionada con la interrupción de procesos metabólicos clave, como la elongación celular, la respiración mitocondrial y la producción de niveles moderados de especies reactivas de oxígeno (ROS), todas ellas pueden limitar la progresión hacia una actividad mitótica efectiva. Investigaciones previas han demostrado que propanil afecta la fotosíntesis, la captación de oxígeno en mitocondrias y la esterificación por fosfato en tejidos vegetales (42), (43). La ausencia de aberraciones cromosómicas sugiere que las células no alcanzaron un estado mitótico lo suficientemente activo como para mostrar daño genético visible, o que el herbicida actúa principalmente bloqueando los procesos que ocurren antes de que comience la mitosis. Este comportamiento es coherente con los informes que indican que una reducción del índice mitótico es un signo clásico de citotoxicidad. Según (44), la inhibición de la división celular puede producirse antes de que se detecte daño estructural al ADN.

La figura 5 muestra el proceso normal de división celular, indicando que los efectos de los herbicidas a estas concentraciones no fueron significativos; Sin embargo, esto puede variar de una población de semillas a otra o de un herbicida a otro, de acuerdo con (45), que sugiere que la toxicidad no ocurriría porque no hay impacto en el proceso de división celular. Estudios como los de (46) han demostrado que el propanil tiene efectos genotóxicos en especies como *Lens culinaris* y *Allium cepa*, en las que se observaron micronúcleos y aberraciones mitóticas tras exposiciones que iban de 2 a 12 mg/L. Estas diferencias ponen de manifiesto que factores como la especie de planta, la concentración de herbicidas, el tiempo de exposición y la sensibilidad del bioensayo influyen en los resultados.

Análisis estadístico

Tabla 6. Análisis de la varianza en la producción de arroz A y B.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media de los cuadrados medios	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Análisis de la varianza en la producción de arroz A						
Entre grupos	20.7	6	3.4	6.7	0.0	2.8
Dentro de los grupos	7.2	14	0.5			
Total	27.9	20				
Análisis de la varianza en la producción de arroz B						

Entre grupos	5.9	<u>6</u>	0.9	3.21	0.0	2.8
Dentro de los grupos	4.3	<u>14</u>	0.3			
Total	10.3	20				

El análisis de varianza (ANOVA) para la variedad A de arroz, con la presencia del herbicida atrazina, reveló diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($F(6,14) = 6,70$; $p = 0,0017$). Esto indica diferentes respuestas en la elongación de las raíces de Zea Mays dependiendo de las diversas diluciones y controles aplicados. Estos hallazgos son coherentes con investigaciones recientes que indican que la atrazina puede tener efectos subletales en el crecimiento radicular y otros procesos fisiológicos, incluso en concentraciones bajas. De manera similar, en el arrozal B, donde se observó la influencia del herbicida propanil, la ANOVA reveló diferencias significativas entre los tratamientos ($F(6,14) = 3,21$; $p = 0,0339$). Esto confirma que las respuestas biológicas no son homogéneas, como lo demuestran las diferentes respuestas en la elongación de las raíces de Zea mays. Este patrón es coherente con informes previos que indican que propanil puede causar efectos fisiológicos significativos sin necesariamente causar toxicidad detectable (47). En general, los resultados muestran que las aguas residuales de ambos molinos de arroz tienen un impacto en el crecimiento radicular de Zea mays. En concentraciones altas, el efecto era principalmente inhibitorio, probablemente debido a la presencia de herbicidas y otros agroquímicos. En cambio, concentraciones más bajas produjeron respuestas variadas, incluyendo ligeros aumentos en la longitud de la raíz. Los valores p , que son inferiores a 0,05 en ambos análisis estadísticos, confirman que las aguas residuales tienen efectos fisiológicos distintos sobre Zea mays, independientemente del tipo de herbicida que predomine en cada molino de arroz.

Conclusión

Las diferencias entre los ensayos de laboratorio y de campo realizados mostraron que la germinación por sí sola no es suficiente para evaluar la calidad de las aguas residuales, ya que podrían surgir efectos subletales a largo plazo, demostrando que la calidad del agua de los arrozales varía según la fase del cultivo y las prácticas de manejo, provocando diferentes respuestas fisiológicas en Zea mays y efectos variables sobre el suelo; Sin embargo, controlar la acumulación de este tipo de compuestos en las aguas residuales de los arrozales podría ser una opción viable para su reutilización, sin causar efectos fitotóxicos, ya que actúan como portadores de materia orgánica y sales sin alterar significativamente la estructura o textura del suelo, previniendo así también riesgos para la salud asociados a la acumulación de estos compuestos. y, a su vez, sirven como una alternativa sostenible en la agricultura.



Declaración de contribución de autoría de CreditT

Conceptualización - Ideas: María Del Pilar Gutiérrez Orejuela, César Darío Peñaranda Medina, Nelson Alfonso Vega Contreras. **Análisis formal:** María Del Pilar Gutiérrez Orejuela, César Darío Peñaranda Medina, Nelson Alfonso Vega Contreras. **Investigación:** María Del Pilar Gutiérrez Orejuela, César Darío Peñaranda Medina, Nelson Alfonso Vega Contreras. **Metodología:** María Del Pilar Gutiérrez Orejuela, César Darío Peñaranda Medina, Nelson Alfonso Vega Contreras. **Dirección de Proyecto:** Nelson Alfonso Vega Contreras. **Recursos:** María Del Pilar Gutiérrez Orejuela, César Darío Peñaranda Medina. **Software:** Yulia Ivanova, Julián David Castellanos. **Supervisión:** Nelson Alfonso Vega Contreras. **Validación:** Nelson Alfonso Vega Contreras. **Redacción - borrador original - Elaboración:** María Del Pilar Gutiérrez Orejuela, Nelson Alfonso Vega Contreras. **Redacción, revisión y edición - Preparación:** María Del Pilar Gutiérrez Orejuela, Nelson Alfonso Vega Contreras.

Financiación: No, los autores declaran no haber recibido financiación para la redacción ni la publicación de este artículo.

Conflicto de intereses: No declara. Aspectos éticos: No declara.

Referencias

1. Ofori S, Abebrese DK, Růžicková I, Wanner J. Reuse of treated wastewater for crop irrigation: Water suitability, fertilization potential, and impact on selected soil physicochemical properties. *Water (Basel)* (Internet). 2024;16(3):484. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3390/w16030484>
2. Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2017: Aguas residuales-el recurso desaprovechado. UNESCO. 2017; <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247647>
3. Impactos ambientales por agroquímicos en el cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.) en Casanare en el periodo. 2015. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/56222>
4. Lead toxicity-mediated growth and metabolic alterations at early seedling stages of maize (*Zea mays* L.). *Plants*. <https://doi.org/10.3390/plants12183335>
5. Medina Litardo RC, García Bendezú SJ, Carrillo Zenteno MD, Cobos Mora F, Parismoreno Rivas LL. Sistema de producción del cultivo de arroz en zonas con alta salinidad en suelos y agua. *Corpoica Cienc Tecnol Agropecu* (Internet). 2023;24(2). Disponible en: http://dx.doi.org/10.21930/rcta.vol24_num2_art:2812
6. Wastewater irrigation impacts on seed germination and seedling growth of rice (*Oryza sativa*), tomato (*Solanum lycopersicum*), and mustard (*Brassica napus*) crops. *Wastewater Irrigation Impacts*





on Seed Germination and Seedling Growth of Rice. En: *Solanum Lycopersicum*), and Mustard (*Brassica Napus*) Crops. Tomato; <https://doi.org/10.1039/D5EW00324E>

7. Anzalone, A., Ruíz, M., Zambrano, C., & Ortiz, A. Evaluación de *Zea mays* L. y *Phaseolus vulgaris* L. como bioindicadores de herbicidas imidazolinonas en suelo.

https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S1316-33612011000200007&script=sci_abstract

8. Kama R, Liu Y, Song J, Hamani AKM, Zhao S, Li S, Treated livestock wastewater irrigation is safe for maize (*Zea mays*) and soybean (*Glycine max*) intercropping system considering heavy metals migration in soil-plant system. *Int J Environ Res Public Health* (Internet). 2023;20(4):3345. Disponible en:

<http://dx.doi.org/10.3390/ijerph20043345>

9. Vega-Contreras NA, Villada-Castillo DC, Pabon-Mora C. Evaluación del aceite de *Attalea butyracea* una alternativa en la obtención de biodiesel. *Ing Compet* (Internet). 2022;25(1). Disponible en:

<http://dx.doi.org/10.25100/iyv.v25i1.12208>

10. Arcos, J. , Rojas, D. C. , Guerrero, C. , & Prado-Murcia, M. V. Recomendaciones para la producción de grano de maíz biofortificado en Colombia. *HervestPlus*, editor. 2020. <https://cgspace.cgiar.org/server/api/core/bitstreams/fb2848f3-6eb6-4fab-ba9c-9bbaa3976c82/content>

11. Mona JP, Cortés SB, Hincapié JA. Impactos ambientales y efectos en la salud humana generados a partir del uso de glifosato. 2018; https://revistas.ces.edu.co/index.php/ces_salud_publica/article/view/5764

12. Vega-Contreras NA, Arias Hurtado MC, Sánchez Márquez CY. Efectos de dos herbicidas orgánicos sobre la fisiología de la germinación en *Coffea arabica*. *Corpoica Cienc Tecnol Agropecu* (Internet). 2024;25(2). Disponible en: http://dx.doi.org/10.21930/rcta.vol25_num2_art:3305

13. Schmidt W, Redshaw CH. Evaluation of biological endpoints in crop plants after exposure to non-steroidal anti-inflammatory drugs (NSAIDs): implications for phytotoxicological assessment of novel contaminants. *Ecotoxicol Environ Saf* (Internet). 2015;112:212–22. Disponible en:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.11.008>

14. Use of *Lens culinaris* Med test as environmental bioindicator to identify the cytogenotoxic effect of paraquat pesticide.

<https://doi.org/10.1007/s11356-021-14352-0>

15. Sami M, Hedström A, Kvarnström E, Österlund H, Nordqvist K, Herrmann I. Treatment of greywater and presence of microplastics in on-site systems. *J Environ Manage* (Internet). 2024;366(121859):121859. Disponible en:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121859>





16. Ayers, RS, y Westcot Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage Paper 29. Food and Agriculture Organization. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/b1345105-e9e6-4704-81cc-577f8e187278/content>
17. Lacalamita D, Mongiovi C, Crini G. Chemical oxygen demand and biochemical oxygen demand analysis of discharge waters from laundry industry: monitoring, temporal variability, and biodegradability. *Frontiers in Environmental Science*. 2024; <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1387041>
18. Peter Lohstroh, 4-dichlorophenylpropanamide) Risk Characterization Document Occupational and Bystander Exposures Residential Bystanders: Spray drift, Dietary and Aggregate Exposures Workers: Occupational, Dietary and Aggregate Exposures. 3. https://www.cdpr.ca.gov/wp-content/uploads/2024/10/propanil_final_2019.pdf
19. Sahoo, D., & Anandhi, A. Conceptualizing turbidity for aquatic ecosystems in the context of sustainable development goals. *En: Environmental Science: Advances*. <https://doi.org/10.1039/d2va00327a>
20. Ruark MD, Linquist BA, Six J, van Kessel C, Greer CA, Muters RG, et al. Seasonal losses of dissolved organic carbon and total dissolved solids from rice production systems in northern California. *J Environ Qual (Internet)*. 2010;39(1):304–13. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.2134/jeq2009.0066>
21. Tian-fu, et., al Spatio-temporal evolution of soil pH and its driving factors in the main Chinese farmland during past 30 years. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*. 26(12):2137–49. <https://www.plantnutrifert.org/en/article/doi/10.11674/zwyf.20399>
22. Hottes Emanuel and Herbst Marcelo An overview of the adsorption of glyphosate by different materials, natural, hybrid and composite. *En: A LOOK AT DEVELOPMENT*. <https://doi.org/10.56238/alookdevelopv1-029>
23. Chen, Y., Ke, X., Xu, J., & Lu, T. Advances in Resources Research The nutrient recovery from agricultural wastewater and fertilizer production technology integration: Progress, challenges, and future prospects. https://doi.org/10.50908/arr.5.4_2344
24. Kolesnikov M, Gerasko T, Paschenko Y, Pokoptseva L, Onyschenko O, Kolesnikova A. Effect of water deficit on maize seeds (*Zea mays* L.) during germination. *Agronomy Research*. 2023;21(1):156–74. <https://doi.org/10.15159/AR.23.016>
25. Meffe R, de Santiago-Martín A, Teijón G, Martínez Hernández V, López-Heras I, Nozal L, et al. Pharmaceutical and transformation products during unplanned water reuse: Insights into natural attenuation, plant uptake and human health impact under field conditions. *Environ Int (Internet)*. 2021;157(106835):106835. Disponible en:



<http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2021.106835>

26. Muñoz-Bautista JM, Bernal-Mercado AT, Martínez-Cruz O, Burgos-Hernández A, López-Zavala AA, Ruiz-Cruz S, et al. Environmental and health impacts of pesticides and nanotechnology as an alternative in agriculture. *Agronomy (Basel)* (Internet). 2025;15(8):1878. Disponible en:

<http://dx.doi.org/10.3390/agronomy15081878>

27. Agathokleous E. The rise and fall of photosynthesis: hormetic dose response in plants. *J For Res* (Internet). 2021;32(2):889–98. Disponible en:

<http://dx.doi.org/10.1007/s11676-020-01252-1>

28. Jalal A, Oliveira Junior JC de, Ribeiro JS, Fernandes GC, Mariano GG, Trindade VDR, et al. Hormesis in plants: Physiological and biochemical responses. *Ecotoxicol Environ Saf* (Internet). 2021;207(111225):111225. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111225>

29. Dantas Á de OS, Rocha AC da, Cardoso VL, Vieira PA. A review of approaches to atrazine treatment employing advanced oxidation processes technologies. *Eng Sanit Ambient* (Internet). 2024;29. Disponible en:

<http://dx.doi.org/10.1590/s1413-415220230021>

30. Milan M, Vidotto F, Piano S, Negre M, Ferrero A. Dissipation of propanil and 3,4 dichloroaniline in three different rice management systems. *J Environ Qual* (Internet). 2012;41(5):1487–96. Disponible en:

<http://dx.doi.org/10.2134/jeq2012.0175>

31. Primel EG, Zanella R, Kurz MHS, Gonçalves FF, Martins ML, Machado SLO, et al. Risk assessment of surface water contamination by herbicide residues: monitoring of propanil degradation in irrigated rice field waters using HPLC-UV and confirmation by GC-MS. *J Braz Chem Soc* (Internet). 2007;18(3):585–9. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-50532007000300014>

32. Arena M, Auteri D, Barmaz S, Brancato A, Brocca D, et al European Food Safety Authority (EFSA),. Peer review of the pesticide risk assessment of the active substance propanil. *EFSA J* (Internet). 2018;16(12):e05418. Disponible en:

<http://dx.doi.org/10.2903/j.efsa.2018.5418>

33. Carena L, Minella M, Barsotti F, Brigante M, Milan M, Ferrero A, et al. Phototrans formation of the herbicide propanil in paddy field water. *Environ Sci Technol* (Internet). 2017;51(5):2695–704. Disponible en:

<http://dx.doi.org/10.1021/acs.est.6b05053>

34. Sule, RO, Condon, L., & Gomes, AV; A Common feature of pesticides: oxidative stress - the role of oxidative stress in pesticide-induced toxicity. En: *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*.

<https://doi.org/10.1155/2022/5563759>





35. Meyer CJ. Antagonismo en mezclas de glufosinato + glifosato y glufosinato + cletodim en gramíneas. *Weed Technology*. 2021;
<https://doi.org/10.1017/wet.2020.49>
36. Milan M, Vidotto F, Piano S, Negre M, Ferrero A. Disipación de propanil y 3,4-dicloroanilina en tres sistemas diferentes de manejo del arroz. *Journal of Environmental Quality*. 2012.
<https://doi.org/10.2134/jeq2012.0175>
37. Ibrahim MA, Zulkifli SZ, Azmai MNA, Mohamat-Yusuff F, Ismail A. Reproductive Toxicity of 3,4-dichloroaniline (3,4-DCA) on Javanese Medaka (*Oryzias javanicus*, Bleeker 1854). *Animals (Basel)* (Internet). 2021;11(3):798. Disponible en:
<http://dx.doi.org/10.3390/ani11030798>
38. Kaur G. Herbicides and its role in Induction of Oxidative Stress- A Review. *Int J Environ Agric Biotechnol* (Internet). 2019;4(4):995–1004. Disponible en:
<http://dx.doi.org/10.22161/ijeab.4416>
39. Gharabli, H., Della Gala, V., & Welner, D. H. The function of UDP-glycosyltransferases in plants and their possible use in crop protection. En: *Biotechnology Advances*.
<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2023.108182>
40. Carpio MJ, Sánchez-Martín MJ, Rodríguez-Cruz MS, Marín-Benito JM. Effect of organic residues on pesticide behavior in soils: A review of laboratory research. *Environments* (Internet). 2021;8(4):32. Disponible en:
<http://dx.doi.org/10.3390/environments8040032>
41. Reactive oxygen species and antioxidant defense in plants under abiotic stress: Revisiting the crucial role of a universal defense regulator. *Antioxidants*. 9(8).
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7465626/pdf/antioxidants-09-00681.pdf>
42. Hofstra B, Vv M-N, Galvez S, He B, Jurafsky D. La paradoja de la diversidad y la innovación en la ciencia. *Actas de la Academia Nacional de Ciencias*. 2020;117(17):9284–91. <https://doi.org/10.1073/pnas.1915378117>
43. Beltrán R, Urrea Reina DA. Fitotoxicidad del propanil en el cultivo de arroz. 2017. <https://repositorio.unillanos.edu.co/server/api/core/bitstreams/af139cb5-63bb-4aec-a114-617f7f99eeb4/content>
44. Nicuță D, Grosu L, Patriciu O-I, Voicu R-E, Alexa I-C. The *Allium cepa* model: A review of its application as a cytogenetic tool for evaluating the biosafety potential of plant extracts. *Methods Protoc* (Internet). 2025;8(4):88. Disponible en:
<http://dx.doi.org/10.3390/mps8040088>



45. Vieira C, Marcon C, Droste A. Phytotoxic and cytogenotoxic assessment of glyphosate on *Lactuca sativa* L. *Braz J Biol* (Internet). 2022;84:e257039. Disponible en:

<http://dx.doi.org/10.1590/1519-6984.257039>

46. Salazar Mercado SA, Quintero Caleño JD, Rojas Suárez JP. Cytogenotoxic effect of propanil using the *Lens culinaris* Med and *Allium cepa* L test. *Chemosphere* (Internet). 2020;249(126193):126193. Disponible en:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126193>

47. Gjata I, Tommasi F, De Leonardis S, Dipierro N, Paciolla C. Cytological alterations and oxidative stress induced by Cerium and Neodymium in lentil seedlings and onion bulbs. *Front Environ Sci* (Internet). 2022;10. Disponible en:

<http://dx.doi.org/10.3389/fenvs.2022.969162>