

Calidad y fitotoxicidad del agua en sistemas de producción de cebolla (*Allium cepa* L.)

Quality and phytotoxicity of the water used in onion (*Allium cepa* L.) production systems

Ángeles Calvario-Palma¹ , Javier Cruz-Hernández^{2*} , Dionicio Juárez-Ramón¹ , Primo Sánchez-Morales¹ , Enrique Sánchez-Mora³ 

¹Manejo Sostenible de Agroecosistemas-Centro de Agroecología del Instituto de Ciencias, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Carretera San Baltazar Tetela, Edificio Val 1 km 1.7, CP. 71960, San Pedro Zacachimalpa, Puebla, México.

²Colegio de Postgraduados-Campus Puebla. Boulevard Forjadores de Puebla, No. 205, CP. 72760, Santiago Momoxpan, San Pedro Cholula, Puebla, México.

³Instituto de Física, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Av. Autonomía entre andador universitario y calle de la educación, Cd Universitaria, CP. 72592, Heroica Puebla de Zaragoza, Puebla, México.

*Autor de correspondencia: javiercruz@colpos.mx

Artículo científico

Recibido: 17 de julio 2024

Aceptado: 11 de septiembre 2025

RESUMEN. Los sistemas de producción convencionales, con uso continuo y excesivo de insumos, pueden generar contaminación en el suelo, aire y mantos acuíferos, siendo el agua de riego el principal medio para la difusión de los contaminantes. Por ello, se planteó como objetivo medir variables de calidad y fitotoxicidad, como indicadores de la presencia de contaminantes en el agua usada en un sistema de producción convencional y en un sistema orgánico de cebolla, en comparación con el agua colectada de un sistema no cultivado. Se realizaron tres muestreos de agua de pozo en cada sistema de producción y en el no cultivado, de octubre de 2020 a mayo del 2021 en Santa Isabel Cholula Puebla. En el agua muestreada se midió el contenido de: nitratos, fosfatos, pH, sólidos totales, CE, sales, metales pesados, y tres índices de fitotoxicidad por bioensayos de germinación con semillas de *Raphanus sativus* L., como especie indicadora de contaminantes. Las variables medidas se procesaron con análisis de varianza por efecto de sistemas, con comparaciones de medias Tukey ($p < 0.05$), análisis de correlación entre variables y de conglomerados, con el programa InfoStat. Los contenidos de nitratos, fosfatos, plomo, mercurio y níquel en el agua del sistema convencional superaron los límites establecidos en normas oficiales mexicanas, y manifestaron índices moderados de fitotoxicidad. El sistema de producción orgánico y el no cultivado, se agruparon con valores inferiores a lo establecido en las normas y con nula a baja fitotoxicidad, lo que indica baja contaminación del agua en el sistema orgánico.

Palabras clave: Agroecosistema, bioensayo de toxicidad, calidad del agua, fosfatos, nitratos.

ABSTRACT. Conventional production systems, with continuous and excessive use of inputs, can generate contamination in the soil, air and aquifers, with irrigation water being the main medium for the diffusion of pollutants. Therefore, the objective was to measure quality and phytotoxicity variables, as indicators of the presence of contaminants in water used in a conventional production system and an organic onion system, compared to water collected from a non-cultivated system. Three well water samples were taken in each production system and in the non-cultivated system, from October 2020 to May 2021 in Santa Isabel Cholula Puebla. In the sampled water was measured the content of: nitrates, phosphates, pH, total solids, EC, salts, heavy metals and three phytotoxicity indices by germination bioassays with *Raphanus sativus* L seeds as an indicator species of contaminants. The measured variables were processed with analysis of variance by systems effect, with Tukey mean comparisons ($p < 0.05$), correlation analysis between variables and clusters, with the InfoStat program. The nitrate and phosphate contents in the water of the conventional system exceeded the limits established in the official standard and showed moderate rates of phytotoxicity. The organic and non-cultivated systems were grouped with values lower than those established in the standard and with null to low phytotoxicity, which indicates low water contaminants in the organic agroecosystem.

Key words: Agroecosystems, bioassay toxicity, nitrate, phosphate, water quality.

INTRODUCCIÓN

La intensificación de sistemas de producción agrícola ha permitido incrementar el rendimiento de los cultivos en menor tiempo; sin embargo, también ha generado contaminación y alteraciones en la calidad de suelos y aguas (Akhtar *et al.* 2021). El uso continuo de insumos químicos se asocia a una reducción en la calidad nutricional de los alimentos (Schleiffer y Speiser 2022). Además de ocasionar la dependencia hacia estos insumos, lo que afecta la economía de los productores, la salud de las comunidades rurales y la de los consumidores (Blanco-Villacorta 2021).

La contaminación derivada de las actividades agrícolas es difícil de rastrear su origen, y resulta complicada de medir y controlar, ya que implica múltiples interacciones y procesos de lixiviación, que impactan de manera diferenciada los mantos acuíferos y los suelos (Echeverri *et al.* 2020, Akhtar *et al.* 2021). Factores como el tipo de vegetación, la precipitación pluvial, las características edáficas, el contenido de materia orgánica del suelo, mecánica del suelo, la cantidad y frecuencia de riego, entre otros, influyen en los sitios de disposición final de contaminantes y sus efectos sobre el ambiente y la salud humana (Rojas *et al.* 2020, Feyisa *et al.* 2025).

En particular, la contaminación del agua subterránea por nitratos, nitritos y fosfatos se ha vinculado con el uso de fertilizantes y la disposición de estiércoles (Dongfan *et al.* 2021, Torres *et al.* 2021, Verma *et al.* 2023). Este tipo de contaminación es preocupante por sus riesgos y efectos en la salud humana (Yunhui *et al.* 2021). Además, de asociarse con la pérdida de biodiversidad y la eutrofización de cuerpos de agua en agroecosistemas (Chancay *et al.* 2021). Asimismo, concentraciones elevadas de nitratos, nitritos, fosfatos, metales pesados y agroquímicos pueden afectar los procesos productivos al alterar la germinación, reducir la actividad enzimática (Bouchiba *et al.* 2025) y limitar el crecimiento y desarrollo de las plantas (Kebrom *et al.* 2019).

La cebolla es uno de los principales ingredientes en la cocina mexicana y ocupa el cuarto lugar en importancia nacional, con una producción anual de 85 104 toneladas. En Puebla se siembran 1 988.38 ha, con un rendimiento promedio de 21.4 t ha⁻¹ en sistemas convencionales y 12.5 t ha⁻¹ en sistemas orgánicos (SIAP 2021). En sistemas intensivos, como los de Puebla, se aplican grandes cantidades de nitrógeno, fósforo e insumos químicos y orgánicos en pequeñas unidades de producción (Romero-Ruiz *et al.* 2022).

El uso excesivo de insumos puede contaminar aguas superficiales, subterráneas y de riego, afectando ambiente, cultivos y salud humana (Dongfan *et al.* 2021, Feyisa *et al.* 2025, Verma *et al.* 2023). Por ello, es indispensable monitorear la presencia de contaminantes en agroecosistemas e identificar sus fuentes (Zhuo *et al.* 2025), a fin de implementar medidas preventivas y de mitigación (Akhtar *et al.* 2021, Bressiani *et al.* 2025). Una estrategia de monitoreo es la estimación de parámetros y variables toxicológicas (Bouchiba *et al.* 2025), ya sea por medición directa o mediante bioensayos de germinación con semillas indicadoras, que permiten detectar contaminantes en agua o extractos acuosos de suelo (Sykora *et al.* 2021).

En estudios ecotoxicológicos, especies como pepino (*Cucumis sativus* L.), lechuga (*Lactuca sativa* L.) y rábano (*Raphanus sativus* L.) son empleadas por su sensibilidad a contaminantes, reflejada en menor germinación y crecimiento radicular (Chancay *et al.* 2021). Indicadores como el índice de germinación (IG), el IG normalizado (IGN) y el índice de crecimiento radicular normalizado

(ICRN) permiten establecer escalas de toxicidad del agua (Sykora *et al.* 2021). Los bioensayos son métodos indirectos, reproducibles, rápidos y accesibles cuando no se cuenta con equipo especializado, y pueden emplearse como paso previo al análisis específico o como biomonitorio en muestras sólidas o líquidas (Mercado y Parada 2025). Su uso ha permitido evaluar contaminantes en aguas superficiales y subterráneas, mediante la detección de alteraciones morfológicas, fisiológicas y citológicas en semillas (Bressiani *et al.* 2025, Mercado y Parada 2025). A la fecha, existen pocos estudios que estimen la fitotoxicidad y contaminación en agua de riego para cebolla. Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue determinar la presencia de fosfatos, nitratos y metales pesados, así como evaluar la fitotoxicidad del agua usada en dos sistemas de producción de cebolla, en comparación con agua de un sistema no cultivado en Santa Isabel Cholula, Puebla.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio y muestreo del agua

El estudio se realizó en el municipio de Santa Isabel Cholula en el estado de Puebla, México. Los sitios de estudio se encuentran en las coordenadas geográficas entre los paralelos 18° 55' y 19° 01' de latitud norte; los meridianos 98° 20' y 98° de longitud oeste, a una altitud entre 1 800 y 2 100 msnm y una temperatura promedio anual de 15 a 26 °C (Figura 1) (INEGI 2021).

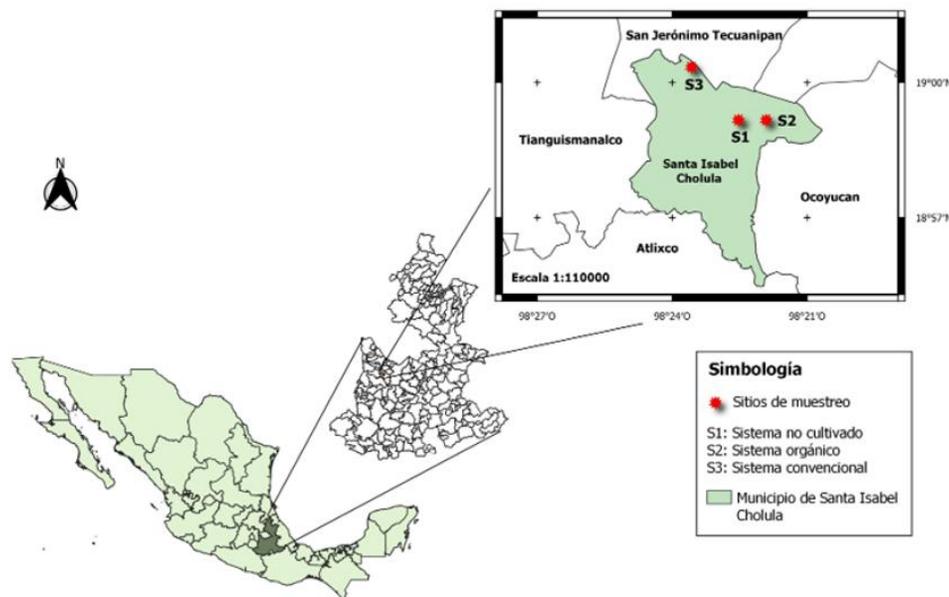


Figura 1. Ubicación geográfica del municipio de Santa Isabel Cholula, Puebla, México, del sistema de referencia y los sistemas de producción de cebolla estudiados. S1 sistema no cultivado (SNC), S2 sistema orgánico (SORG) y S3 sistema convencional (SCV) de producción de cebolla.

El municipio presenta una precipitación pluvial promedio anual de 800 – 1 000 mm, su clima es templado subhúmedo con lluvias en verano (INEGI 2021), y se ubica dentro de la cuenca baja del río Atoyac y alrededor del río Nexapa, uno de sus principales afluentes. El río Atoyac, junto con el

alto Balsas, son considerados como los más contaminados del estado de Puebla, con alto riesgo de afectación por metales pesados al ambiente, a los cultivos y a la población (Castro-González *et al.* 2024). En estas condiciones, alrededor del 75% de la población se dedica a la agricultura en el municipio (INEGI 2021).

En el estudio se midieron características del agua, usada para riego, de dos sistemas de producción de cebolla (orgánico y convencional), y se compararon con las características del agua de un sistema no cultivado (SNC). El agua del sistema SNC se usó como referencia, por su nula o baja exposición directa a insumos contaminantes. Los sitios del SNC, de producción orgánica (SORG) y del sistema convencional (SCV) se indican en la Figura 2. Los tres sitios se ubican dentro de la cuenca baja del Río Atoyac.

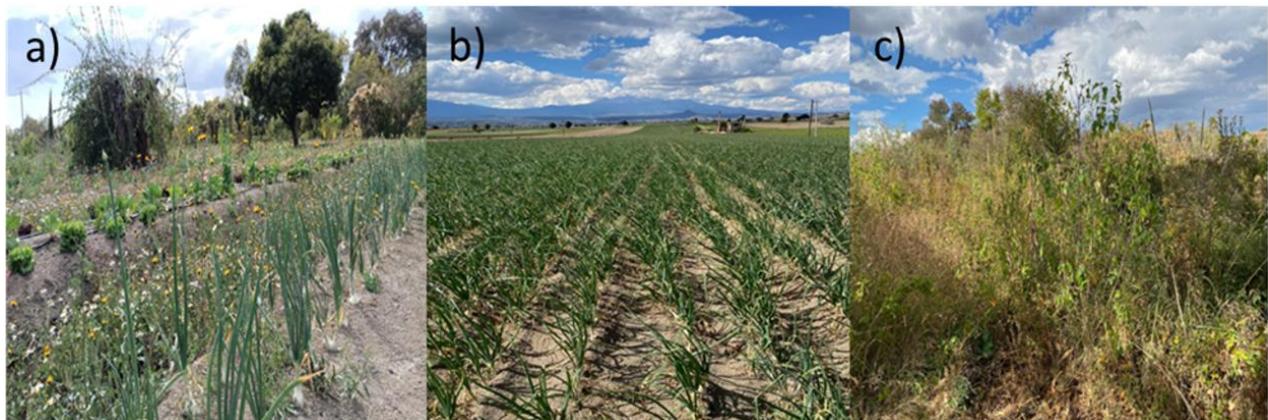


Figura 2. Sitios seleccionados para la colecta de agua de pozo usada para riego en un sistema de producción orgánico (a) y en un sistema convencional de cebolla (b), y sitio para la colecta de agua de un sistema natural o no cultivado (c) en el municipio de Santa Isabel Cholula, Puebla, México.

Para esto, se colectaron tres muestras de agua de pozo en los sistemas en estudio. El agua se colectó durante los meses de octubre del 2020 a mayo del 2021, recolectando las muestras cada tres meses en el período indicado. El muestreo del agua se realizó con base a los procedimientos que marca la NOM-230-SSA1-2002 salud ambiental (SSA 2002). Para recolectar las muestras se utilizaron frascos de polietileno de alta densidad, de 1 000 mL de capacidad. Los frascos se etiquetaron y se llevaron al laboratorio del Colegio de Postgraduados Campus Puebla para su análisis.

Características de los sistemas en estudio

En el SORG (Figura 2a) se cultiva cebolla en asociación en surcos con diversas hortalizas, flores, plantas medicinales y arvenses, cuenta con hileras de árboles frutales diversos, en una unidad de producción familiar de aproximadamente 0.5 ha, donde para la producción únicamente se utilizan insumos orgánicos. Como fuente de fertilización se aplican 10 t ha⁻¹ de lombricomposta por año, y para el tratamiento de plagas o enfermedades se usan regularmente extractos vegetales de Neem, ajo, cempaxúchitl y chile. El control de arvenses se realiza con escardas y se aplica fertilización foliar con humus líquido de lombricomposta a 2.5 mL L⁻¹. La producción se rige por los lineamientos de operación orgánica establecidos por el Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA). La cosecha se comercializa en el sistema de mercados

alternativos, en proceso de certificación orgánica participativa, en la ciudad de Puebla. La unidad cuenta con un pozo de agua para riego de 30 m de profundidad y 20 de espejo de agua.

En el SCV (Figura 2b) se cultivan cebolla, cilantro y rábano en rotación durante el año productivo, en una unidad de producción de aproximadamente 2 ha. En esta unidad se utilizan insumos químicos para la fertilización a dosis de 180 kg ha⁻¹ de N y 80 kg ha⁻¹ de P, aportados con Urea, super triple, y fertilizantes solubles de Yara®. Se aplica Carbofuran, Clorpirifos, Endosulfan, Oxitetraciclina, Mancozeb, Fosetil-al, Clorotalonil, Paraquat, Oxifluorfen y Glifosato, entre otros, para el control de plagas, enfermedades y malezas; con aplicaciones a demanda durante el ciclo de cultivo, sin control estricto de las dosis, ni con medidas recomendadas de protección. No se utilizan ni se certifica en BPA. Además, se adicionan entre 14 a 22 t ha⁻¹ de gallinaza sin procesar por año. Se estima un rendimiento promedio de 28 t ha⁻¹ de cebolla. La producción se comercializa en centrales de abasto de Puebla y en la ciudad de México. La unidad de producción cuenta con un pozo de 75 m de profundidad, con espejo de agua a 40 m, y con el que se dispone de agua para riego en el ejido de Santa Isabel Cholula, Puebla.

El SNC (Figura 2c) es un paraje de tres hectáreas que se caracteriza por presentar vegetación de pastizales, arbustos, cazahuates (*Ipomoea murucoides* Roem), fresnos (*Fraxinus excelsior* L.) y diversas arvenses nativas. Este paraje cuenta con un pozo de 35 m de profundidad, con espejo de agua aproximadamente a 25 m. Los suelos de los sitios estudiados son de textura franco-arenosos y arenosos con bajo contenido de materia orgánica, correspondientes al grupo de Arenosoles (INEGI 2017).

Análisis de las muestras de agua y variables de estudio

En las muestras de agua se determinó, por triplicado, el potencial de hidrógeno (pH) y la conductividad eléctrica (CE) con un potenciómetro (Conductronic PC18®, México), sólidos totales (ST) con el equipo PAA0726-TDS ®(Xiaomi Portable, China), total de sales y potencial de oxidoreducción (ORP) con el equipo Water quality tester (P-3®, Diyeeni, China), así como la concentración de nitratos y fosfatos con el espectrofotómetro Hanna (modelo HI83325®, Hanna Instruments, Highland, USA) a 525 nm como parámetros eco toxicológicos directos del agua. Los datos obtenidos se compararon con los intervalos establecidos en la norma NOM-127-SSA1-2017 (SSA 2017). Se analizaron los metales pesados en el agua del tercer muestreo de cada sistema, por espectrofotometría de absorción atómica. Para ello, las muestras se llevaron al Laboratorio de Nutrición del Departamento de Edafología, del Colegio de Postgraduados Campus Motecillos, ubicado en el municipio de Texcoco, Estado de México.

Con el agua muestreada de cada sitio, se realizaron pruebas de fitotoxicidad en laboratorio, mediante bioensayos de germinación con semillas de rábano. En estos bioensayos se estimaron, como indicadores indirectos, los índices de: germinación (IG), índices de germinación normalizado (IGN) y el índice de elongación radicular normalizado (IERN), como los describen Rodríguez *et al.* (2014) y Urriola *et al.* (2021). Estos índices permiten detectar, de manera indirecta, la presencia de metabolitos o sustancias tóxicas, en diluciones al 20% de la muestra analizada. Los índices IGN e IERN indican valores estandarizados que se distribuyen de -1 a +1. Los niveles de toxicidad se establecen según las categorías siguientes: índice de 0 a -0.25 (baja toxicidad), de -0.25 a -0.5 (toxicidad moderada), de -0.5 a -0.75 (muy tóxico) y de -0.75 a -1.0 (toxicidad muy alta); mientras

que, valores = 0 son de nula toxicidad y > 0 representan un efecto de hormesis, efecto promotor o que favorece la germinación, indicando la ausencia de sustancias tóxicas, con base en lo descrito por Rodríguez *et al.* (2014) y Sykora *et al.* (2021).

Análisis estadístico

Para el análisis de los datos se utilizó el paquete estadístico InfoStat®, versión 2020. Con este programa se realizó el análisis de varianzas, pruebas de comparación de medias Tukey ($p < 0.05$), análisis de correlación entre variables físicas, químicas y de toxicidad medidas en el agua. Así como análisis de conglomerados por el Método De Ward, como lo indican Sánchez *et al.* (2013). En el contenido de metales pesados, se presentan, describen y discuten los datos promedios del tercer muestreo realizado en el agua de los sistemas en estudio.

RESULTADOS

Parámetros físicos y químicos del agua usada en los sistemas

Únicamente en conductividad eléctrica y contenido de sales se observaron diferencias significativas en el agua al comparar los tres sistemas en estudio (Tabla 1), mientras que por efecto del muestreo se presentaron diferencias significativas en conductividad eléctrica y potencial de óxido reducción.

Los valores de pH, en el agua en los tres sistemas fluctuaron alrededor del intervalo del neutro, pero sin mostrar diferencias significativas. En cuanto a la CE, el agua del sistema convencional presentó los mayores valores; mientras que, el agua del sistema no cultivado y del sistema orgánico de producción de cebolla alcanzó niveles bajos. En sólidos totales, el agua de los tres sistemas se encontró dentro de los parámetros establecidos en la NOM-127-SSA1-2017. El potencial de óxido-reducción (POR) fue estadísticamente similar en el agua de los tres sistemas. Mientras que el contenido de sales fue estadísticamente superior en el agua del sistema convencional, en comparación con el agua de los otros dos sistemas. Por fecha de muestreo, los valores más altos de CE se observaron en el muestreo dos realizado en el mes de enero y abril, mientras que para POR resultaron superiores y estadísticamente similares en los muestreos realizados en octubre y enero, en comparación con el muestreo realizado en abril (Tabla 1).

La interacción entre el tipo de sistema y fecha de muestreo fue diferente estadísticamente para las variables pH, CE y ORP. El pH del agua en la mayoría de los sistemas fue neutro, excepto en el sistema convencional, donde los muestreos de enero y abril fueron estadísticamente diferentes entre sí, con valor ácidos en el segundo y alcalino en el tercer muestreo. La CE fue más alta en el segundo muestreo en los tres sistemas estudiados, pero solo estadísticamente superior en el segundo muestreo en el sistema convencional. Los valores menores de ORP se observaron en el muestreo realizado en abril en los tres sistemas estudiados, pero fue estadísticamente menor únicamente en este tercer muestreo en el sistema convencional, en comparación con el resto (Tabla1).

Tabla 1. Parámetros físicos y químicos del agua usada en dos sistemas de producción de cebolla en comparación con un sistema no cultivado, en Santa Isabel Cholula, Puebla, México.

Factor de estudio	pH	CE (mS cm ⁻¹)	Sólidos totales (mg L ⁻¹)	ORP (Mv)	Sales (mg L ⁻¹)
Tipo de sistema (T)					
Sistema no cultivado	7.34 ^a	0.7 ^a	172.89 ^a	174.44 ^a	120.56 ^a
Sistema orgánico	7.28 ^a	0.96 ^{ab}	126.78 ^a	174.44 ^a	133.33 ^a
Sistema convencional	7.25 ^a	1.5 ^b	205.22 ^a	172.33 ^a	215.11 ^b
p valor	0.916	0.017	0.449	0.039	0.001
Muestreo (m)					
M1	7.28 ^a	0.21 ^a	155.22 ^a	218.78 ^b	158.67 ^a
M2	7.25 ^a	2.75 ^b	206.78 ^a	218.78 ^b	158.67 ^a
M3	7.33 ^a	2.71 ^b	142.89 ^a	83.67 ^a	151.67 ^a
p-valor	0.918	<0.0001	0.676	<0.001	0.861
Interacción T x m					
No cultivado M1	7.35 ^{ab}	0.16 ^a	107.33 ^a	217.33 ^{cd}	104.67 ^a
No cultivado M2	7.72 ^{ab}	1.81 ^b	311.77 ^a	220.00 ^{cd}	147.67 ^a
No cultivado M3	6.94 ^{ab}	0.15 ^a	99.67 ^a	86.00 ^b	109.33 ^a
Orgánico M1	7.26 ^{ab}	0.18 ^a	136.33 ^a	217.00 ^{cd}	139.00 ^a
Orgánico M2	7.55 ^{ab}	2.52 ^b	119.00 ^a	216.00 ^c	127.33 ^a
Orgánico M3	7.03 ^{ab}	0.18 ^a	125.00 ^a	90.33 ^b	133.67 ^a
Convencional M1	7.24 ^{ab}	0.29 ^a	222.00 ^a	222.00 ^d	232.33 ^a
Convencional M2	6.49 ^a	3.90 ^c	189.67 ^a	220.33 ^{cd}	201.00 ^a
Convencional M3	8.03 ^b	0.30	204.00 ^a	74.67 ^a	212.00 ^a
p-valor	0.002	0.003	0.380	<0.0001	0.335

Medias con la misma letra no son significativamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$). M1 primer muestreo 28 de octubre de 2020, M2 segundo muestreo 10 de enero de 2021, M3 tercer muestreo 15 de abril de 2021. ORP potencial de óxido reducción.

Contenido de metales pesados en el agua

El agua del sistema no cultivado y del sistema de producción orgánico de cebolla se encuentra dentro de los límites establecidos por la norma NOM-127-SSA1-2017. Sin embargo, el agua del sistema convencional supera los límites de plomo (Pb), mercurio (Hg) y níquel (Ni) (Tabla 2).

Tabla 2. Contenido de metales pesados en agua de uso agrícola para la producción de cebolla en Santa Isabel Cholula, Puebla.

Tipo de agua (Límite permisible)	Pb (0.01 mg L ⁻¹)	Hg (0.001 mg L ⁻¹)	Cd (0.005 mg L ⁻¹)	Ni (0.20 mg L ⁻¹)
Agua de sistema no cultivado	<0.003	<0.0005	ND	0.085
Agua de sistema orgánico	<0.003	<0.0005	ND	0.117
Agua de sistema convencional	0.161	0.661	ND	0.353

Contenido de plomo (Pb), mercurio (Hg), cadmio (Cd) y níquel (Ni). Datos promedio de muestreo de agua realizado en abril de 2021. ND no detectado

Contenido de fosfatos y nitratos en el agua

El agua del sistema no cultivado presentó durante los tres muestreos un promedio de 0.40 mg L⁻¹ de fosfatos, mientras que el agua usada en el sistema orgánico obtuvo una media de 0.89 mg L⁻¹, los cuales se encuentran dentro del límite máximo permitido en la NOM-127-SSA1-2017. En contraste, el agua del sistema convencional superó el límite máximo, y se observó que los valores cambiaron según la fecha de muestreo, con registros más altos en los meses de octubre y abril (Figura 3).

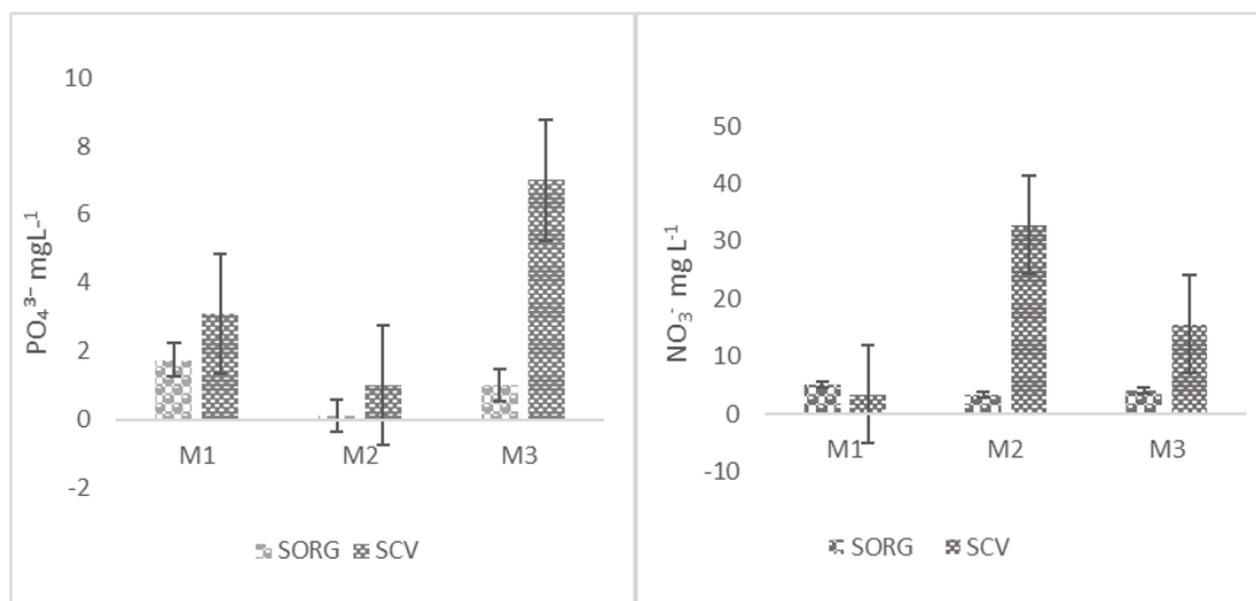


Figura 3. Diferencia en contenido de fosfatos y nitratos en el agua usada en el sistema orgánico (SORG) y en el sistema convencional (SCV) en comparación con el agua del sistema no cultivado (SNC en eje x), en tres muestreos en Santa Isabel Cholula, Puebla, México. M1 primer muestreo 28 de octubre de 2020, M2 segundo muestreo 10 de enero de 2021, M3 tercer muestreo 15 de abril de 2021.

En el sistema no cultivado se obtuvo una media en el contenido de nitratos de 0.47 mg L⁻¹ y en el sistema orgánico el agua alcanzó una media de 2.84 mg L⁻¹ (Figura 3), los cuales se encuentran dentro del límite permitido; mientras que, en el sistema convencional se superaron los límites establecidos en la NOM-127-SSA1-2017, con valores que van de 15 a 32 mg L⁻¹. Así, las mayores concentraciones de nitratos se registraron en el segundo y tercer muestreo, en los meses de enero y abril respectivamente (Figura 3).

Fitotoxicidad del agua por bioensayo de germinación

El agua proveniente de pozo del sistema no cultivado y del sistema orgánico, presentó un índice de germinación (IG) de rábano entre el 96 y 100%, mientras que las semillas tratadas con el agua de pozo del sistema convencional alcanzaron una germinación promedio del 76.6% (Figura 4). Se destaca un IG menor en el muestreo de octubre en el SCV, en comparación con los valores observados en el SORG y en el SNC.

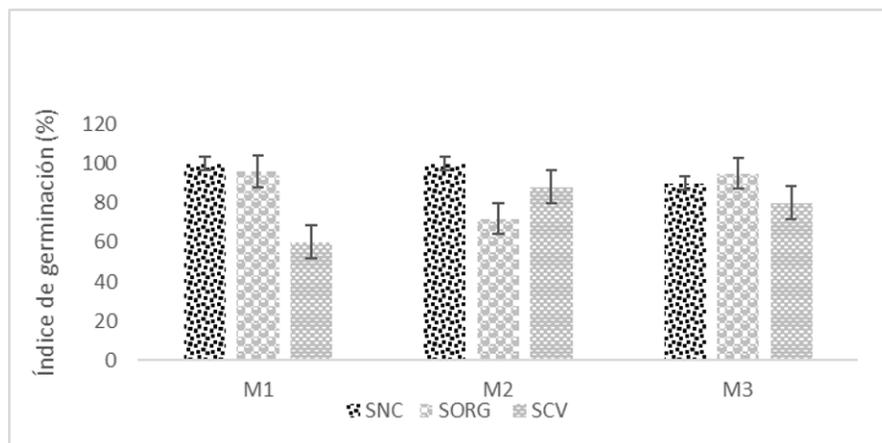


Figura 4. Índice de germinación (IG) de semillas de rábano calculado en el agua en dos sistemas de producción de cebolla y en un sistema no cultivado en Santa Isabel, Cholula Puebla, México. SNC sistema no cultivado, SORG sistema orgánico y SCV sistema convencional de producción de cebolla, durante tres muestreos. M1 muestreo 28 de octubre de 2020, M2 muestreo 10 de enero de 2021, M3 muestreo 15 de abril de 2021.

Los valores de IGN con el agua del sistema no cultivado y del sistema orgánico muestran valores de 0 y 0.4 (Figura 5). El IERN se presentó con valores de baja toxicidad para el agua proveniente del sistema no cultivado y del sistema orgánico, con valores de 0.25 y 0.24 respectivamente, mientras que el agua del sistema convencional alcanzó índices de toxicidad moderada (-0.30) (Figura 5). Se destaca que los valores de IGN e IERN fluctuaron dependiendo del tipo de agua y fecha de muestreo. Con valores más negativos de IGN en el muestreo de octubre, y de IERN en los muestreos de enero y abril en el SCV, en comparación con el SORG y el SNC (Figura 5).

Se presentó una relación positiva y significativa entre la CE con nitratos, fosfatos y salinidad ($r = 0.87, 0.83$ y 0.82 , respectivamente), y altamente significativa y positiva entre nitratos y fosfatos ($r = 0.99$). Una correlación altamente significativa y positiva entre las variables de salinidad con nitratos y fosfatos ($r = 0.96$ y 0.94), pero negativa con el Potencial de Óxido Reducción ($r = -0.76$ y -0.81). En

relación con los índices de toxicidad, únicamente se observó una relación negativa entre el IGN y el contenido de fosfatos con un $r = -0.66$, así como una relación positiva entre IERN con el IG ($r = 0.83$) (Tabla 3), al observarse porcentajes de germinación elevados con mayor elongación radicular.

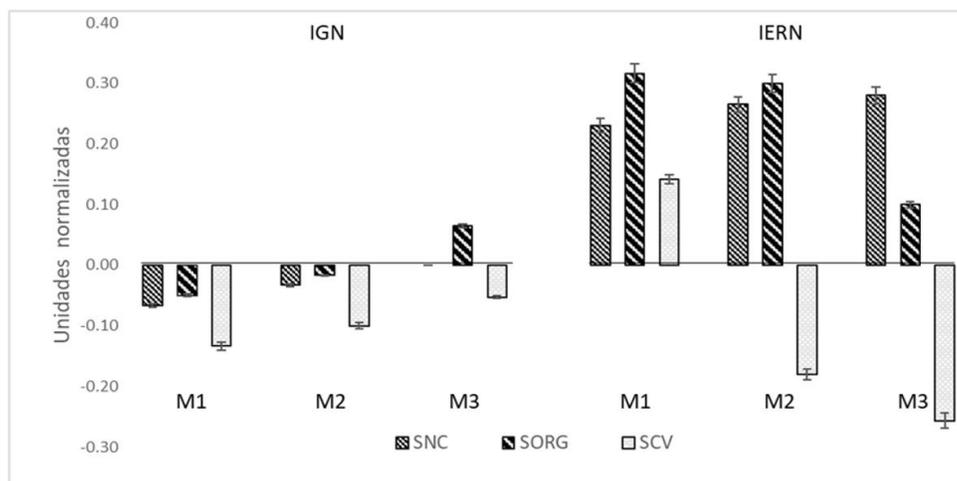


Figura 5. Índice de germinación (IGN) e Índice de elongación radicular normalizados (IERN) evaluados en semillas de rábano con el agua de los sistemas estudiados en tres muestreos, en Santa Isabel Cholula, Puebla México. M1 muestreo 28 de octubre de 2020, M2 muestreo 10 de enero de 2021 y M3 muestreo 15 de abril de 2021.

Tabla 3. Coeficientes de correlación entre variables evaluadas en el agua de los tres sistemas estudiados en Santa Isabel Cholula, Puebla México.

Variables	Coefficiente de correlación (n = 27)
Conductividad eléctrica/ Nitratos	0.87**
Conductividad eléctrica /Fosfatos	0.83*
Conductividad eléctrica/Salinidad	0.82*
Nitratos/Fosfatos	0.99***
Potencial Óxido Reducción/Nitratos	-0.76*
Potencial Óxido Reducción/Fosfatos	-0.81*
Salinidad/Nitratos	0.96***
Salinidad/Fosfatos	0.94***
IERN/IG	0.83*
IGN/Fosfatos	-0.66*

*, ** = significativo para $p \leq 0.05$ y $p \leq 0.01$, respectivamente; n = número de datos pares en la correlación. IERN índice de elongación radicular normalizado. IG índice de germinación. IGN índice de germinación normalizado.

Análisis de conglomerados

Al realizar el análisis de conglomerados se confirmó un agrupamiento con características similares entre el agua del SNC y el SORG, y separados de las características del agua usada en el SCV (Figura 6). Con un componente principal (CP1) que explica el 84% de la variabilidad y donde las variables con mayor influencia fueron pH (-0.34), nitratos (0.3), fosfatos (0.34), IGN (-0.33), CE (-0.30) e IERN (0.64).

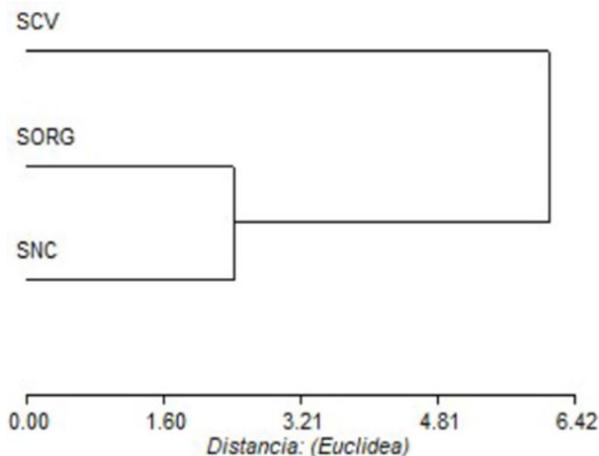


Figura 6. Análisis de conglomerados por el método De Ward de las variables fisicoquímicas e índices de fitotoxicidad estimadas en el agua de los sistemas estudiados en Santa Isabel Cholula, Puebla México. SNC sistema no cultivado, SORG sistema orgánico y SCV sistema convencional de producción de cebolla.

DISCUSIÓN

Parámetros físicos y químicos del agua usada en los sistemas de producción

El pH de los sistemas de producción de cebolla se encontró dentro de los intervalos establecidos por la NOM-127-SSA1-2017 (SSA 2017) para ser considerados como pH neutro (6.5 - 7.5), sin diferencias estadísticas en comparación con el SNC; pero que contrasta, con el nivel ligeramente ácido en el segundo muestreo a un valor alcalino en el tercer muestreo en el SCV. Sin embargo, la CE observada en el agua del SCV fluctuó en niveles considerados como de salinidad elevada, con base en lo indicado por Mancilla *et al.* (2021), y con mayores valores en el muestreo realizado en enero. Tanto el contenido de sólidos disueltos, como el de ORP, resultaron con valores bajos y adecuados en agua para uso agrícola. Sin embargo, los valores bajos de ORP tienen menor capacidad de inhibir el crecimiento microbiano en el agua (Mérida-Cano 2020). Por lo que, los valores de pH y CE más altos, y de ORP más bajos observados en el muestreo realizado en abril en el SCV, pueden estar asociados a un agua con mayores niveles de contaminantes, como se han observado en los meses más secos del año en otros estudios (Rodríguez *et al* 2016, Sykora *et al* 2021).

El contenido de sales disueltas en el agua del SCV superó, en un ocho por ciento, lo establecido en la norma oficial mexicana (SSA 2017). Los resultados del SCV, se relacionan con lo indicado por

Rodríguez *et al.* (2016), quienes observaron diferentes concentraciones, en función de la época y sitio de muestreo, en agua contaminada del río Chalma en el estado de México. Si bien, en el presente estudio, no se observaron diferencias significativas en el contenido de sales disueltas, por fecha de muestreo. Los mayores niveles de CE y ORP, observados en el segundo, y en el primero y segundo muestreo respectivamente, coinciden con lo indicado por Rodríguez *et al.* (2016), quienes, además, encontraron mayores valores de estas variables en muestras de agua durante el invierno.

Contenido de metales pesados en el agua muestreada

Los valores de metales pesados observados en el agua del SPO de cebolla, similares a los del SNC, resultaron inferiores a los niveles máximos permisibles establecidos en la norma mexicana (SSA 2017). Estos resultados se asocian a sistemas con bajo nivel de contaminación. Sin embargo, es de resaltar el elevado contenido de Hg, Pb y Ni en el SCV de cebolla, en la comunidad de estudio. En este último sistema, la aplicación continua de insumos químicos puede estar influyendo en los niveles de contaminación en el agua, como lo indican Díaz-Arriaga (2014) y Mancilla *et al.* (2021), quienes asocian el uso fertilizantes químicos y plaguicidas a altos contenido de Pb y Hg en el agua de riego. Pero, los contenidos elevados de Zn, Cu, Cd, Hg, Pb o Ni también se han relacionado con la aplicación continua de gallinaza (Wang-Rong *et al.* 2020), y con un potencial riesgo ambiental para aguas superficiales y subterráneas, como lo plantea Delgado-Arroyo *et al.* (2014). Riesgos que también dependen de la cantidad y frecuencia de aplicación de la gallinaza en los sistemas de producción (Dueñas-Rivadeneira y Intriago-Flor 2022). Otra razón, asociada a la contaminación del agua con metales pesados, es el uso de fertilizantes fosfóricos usados en sistema convencionales (Otero *et al.* 2005, Mendoza-Escalona *et al.* 2021). Por lo cual, los metales contenidos en el agua del SCV, entre otras causas, se pueden relacionar con el manejo agronómico que se utiliza en este sistema, así como, por la cercanía del sitio de estudio a la zona con elevado riesgo de contaminación por metales en la cuenca del Atoyac (Castro-González *et al.* 2024) y del río Nexapa.

Contenido de fosfatos y nitratos en el agua de los sistemas en estudio

El comportamiento de los fosfatos y nitratos durante el monitoreo del agua en los sistemas de producción de cebolla, en comparación con el agua del sistema no cultivado, sugiere que existe una relación con el manejo agronómico usado en el SCV. Así, las cantidades aplicadas de fertilizantes en el SCV pueden estar asociadas a mayores riesgos de contaminación. Ya que, en otros estudios, se han observado contaminación del agua de pozos con nitratos y fosfato, relacionada principalmente con el exceso de fertilización química nitrogenada y fosfatada aplicada en campos agrícolas (Morales *et al.* 2020, Yunhui *et al.* 2021); pero también, se explican por la aplicación de estiércoles en zonas rurales, o por la mala disposición de residuos orgánicos en zonas urbanas (Verma *et al.* 2023).

Los nitratos presentan fluctuaciones entre fechas de muestreo, alcanzando los valores más altos en el agua del SCV en enero y abril. Estas variaciones, y las diferencias entre sistemas de producción de cebolla (Figura 3), se explican por el tipo de insumos aplicados, frente a la baja exposición en el sistema de referencia (SNC). Estudios previos señalan que el contenido de nitratos varía según el sitio, la estación del año y la precipitación pluvial (Bolaños *et al.* 2017, Sykora *et al.* 2021). Asimismo, puede modificarse en una misma fuente de agua por disposición de estiércoles, descarga de aguas residuales urbanas y, en menor medida, por fertilización nitrogenada en áreas de cultivo (Torres *et*

al. 2021). Los niveles de nitratos observados en el SCV coinciden con los valores bajos encontrados por Dongfan *et al.* (2021), quienes registraron contenidos de 33.4 a 73.2 mg L⁻¹ en muestras de agua subterránea en zonas de agricultura intensiva, en un estudio realizado. Con base en la norma oficial mexicana (SSA 2017), el límite máximo permitido de nitratos en el agua es de 10 mg L⁻¹. Sin embargo, por los valores altos de nitratos observados en el agua proveniente del SCV, en los muestreos de enero y abril, el agua de este sistema se puede clasificar como agua tipo IV para riego a V no potable, y no apta para consumo humano, de acuerdo con lo indicado por Dongfan *et al.* (2021). Por lo que, el contenido de este mineral y la baja calidad del agua del SCV, pueden estar asociados, entre otras razones, al uso de fertilizantes químicos, y a la aplicación de gallinaza para la producción de cebolla, durante el ciclo anual de cultivo. Mientras que los nitratos, medidos en el agua proveniente de un sistema convencional, en comparación con el agua de un sistema sin uso de agroquímicos y de un sistema natural en Tiabaya, Perú, mostraron valores de 0 mg L⁻¹ en los tres sistemas estudiados (Mendoza y Ortiz, 2018). Estos resultados pueden depender de la época de muestreo, del lugar y condiciones ambientales del sitio de estudio (Sykora *et al.* 2021).

En el SCV, los fosfatos, especialmente en abril, superaron los límites establecidos por la OMS y la norma mexicana (SSA 2017), así como los niveles registrados en el SORG y SNC. Esto indica el uso de agua de baja calidad y contaminada con fosfatos y nitratos, alcanzando valores críticos reportados por Bolaños *et al.* (2017), lo que demanda medidas de atención.

Para el SORG, los fosfatos en enero y abril estuvieron por debajo del límite normativo (SSA 2017), similares a los observados en la cuenca de Lluhca, Perú (Milder-Ruiz 2020). Sin embargo, en octubre los valores se aproximaron a niveles no aptos para consumo humano (Ağca 2014).

Fitotoxicidad del agua de riego

Los menores valores de IG, IGN e IERN observados en el agua del SCV, indican mayor presencia de contaminantes en el agua, en comparación con valores que se relacionan con baja o nula toxicidad en el agua del sistema orgánico y del sistema de referencia SNC. Al respecto, se reportan menores valores de IG, en bioensayos con semillas de lechuga, los cuales se relacionan con un mayor contenido de nitratos y fosfatos en el agua (Chancay *et al.* 2021). Una respuesta debida a que la etapa de germinación de las semillas, durante los primeros días, es muy sensible ante los metabolitos o sustancias presentes en el agua, los cuales pueden favorecer (hormesis) o impedir (fitotóxicos) el crecimiento de la radícula (Sykora *et al.* 2021). De la misma manera, los valores de IG entre 90 y 100% y los niveles positivos de IGN e IRN registrados en el agua del SORG, similares a los observados en el SCN (Figuras 4 y 5), son indicativos de una baja toxicidad, y que los metabolitos fitotóxicos no están presentes o están en concentraciones muy bajas en las muestras de agua (Rodríguez *et al.* 2014). Los valores de IG entre 50 y 80% en el SCV, indican fitotoxicidad moderada (Cruz-Hernández *et al.* 2017).

El IGN cercano a cero o con valores positivos indica nula toxicidad o efecto de hormesis, asociado a la estimulación del crecimiento radicular (Rodríguez *et al.* 2014). Esta condición se observó en el agua del SNC y en el riego del SORG. De manera similar, en estudios con agua de pozos en Cuba, bioensayos con lechuga relacionaron bajos valores de toxicidad con reducida contaminación (Cantero y Pérez 2018). En contraste, el IGN negativo (-0.1 a -0.5) registrado en el SCV refleja toxicidad moderada (Rodríguez *et al.* 2014). Al respecto, Sykora *et al.* (2021) reportaron variaciones

estacionales en la fitotoxicidad, con índices más altos en invierno, lo cual también se evidenció en este estudio, particularmente en el SCV (Figuras 4 y 5). Mientras que Chancay *et al.* (2021) señalaron que los valores de IGN e IERN se relacionan con sustancias tóxicas, influenciadas por pH y CE en los procesos de germinación. En este estudio, dicha relación se corroboró mediante correlación entre nitratos, fosfatos y CE, observándose además una correlación negativa entre fosfatos e IGN (Tabla 3).

La relación negativa entre fosfatos en el agua y el IGN, observada en este estudio, también fue reportada por Chancay *et al.* (2021), quienes asociaron altos niveles de fosfatos con menor crecimiento radicular y valores negativos de IGN e IRN en bioensayos con lechuga. Según Bouchiba *et al.* (2025), este efecto se explica por la reducción de la actividad enzimática de amilasas y proteasas durante la germinación. Los valores negativos de IGN e IERN y su correlación significativa con fosfatos en el SCV, particularmente en enero y abril, cuando los niveles de fosfatos y nitratos superaron la norma mexicana (SSA 2017), sugieren un riesgo ecotoxicológico y posibles efectos en la salud de la población, dependientes de la época de muestreo. Así, el riesgo de contaminación estaría asociado a mayores concentraciones de fosfatos, nitratos y metales pesados en épocas de baja precipitación (otoño, invierno y primavera), como lo señalan Bolaños *et al.* (2017) y Sykora *et al.* (2021).

Análisis de conglomerados

En el dendograma se aprecia que el agua del SCV se diferenció de los otros dos tipos de agua (Figura 6), debido a su mayor contenido de nitratos y fosfatos, con índices de toxicidad moderados, dependiendo de la fecha de muestreo; siendo el IERN la variable respuesta con mayor influencia (0.64). Esta variable resultó con mayor influencia, porque el efecto fitotóxico o contenido de contaminantes en el agua, se manifiesta principalmente en el crecimiento de la radícula de las semillas o hasta en la inhibición completa de la germinación, como lo mencionan Sykora *et al.* (2021) y Chancay *et al.* (2021). El mayor contenido de nitratos y fosfatos en el agua del SCV puede afectar el crecimiento de los cultivos como lo menciona Kebrom *et al.* (2019). Pero, estos minerales también representan un riesgo para el ambiente y la salud humana, porque en diferentes estudios se ha comprobado que los elevados contenidos en el agua provocan eutrofización y muerte de peces de agua dulce, y otras especies marinas (Figueruelo y Dávila 2004). Altas concentraciones de nitratos y fosfatos, en los cultivos o en el agua de consumo humano, se han relacionado con cáncer de páncreas, anemia o metahemoglobinemia en bebés, desordenes de la tiroides (Bolaños *et al.* 2017, Verma *et al.* 2023), así como posibles afectaciones en la fecundidad masculina (Calleros *et al.* 2012), pero los bebés y niños menores de seis años pueden presentar mayor riesgo en su salud en comparación con los adultos (Yunhui *et al.* 2021).

Con relación a la contaminación con metales pesados observados en el agua del SCV de producción de cebolla, en niveles superiores a los indicados en la norma (SSA 2017), es necesario considerar medidas de intervención, por los riesgos que representa para la salud de la población. Como lo indican Castro-González *et al.* (2024), quienes observaron un elevado riesgo de contaminación por plomo y otros metales pesados, con mayor peligro para adultos y en menor grado para niños, en municipios irrigados con aguas del río Atoyac, en la cuenca del alto Balsas en el estado de Tlaxcala y en el centro del estado de Puebla. El uso continuo de insumos durante el ciclo de cultivo, como

fertilizantes químicos, plaguicidas, herbicidas y gallinaza, pueden estar afectando la calidad del agua en el sistema convencional de producción de cebolla en el sitio de estudio. Al respecto se ha reportado la afectación de la calidad del agua por altos niveles de nitratos en pozos de zonas de producción agrícola intensiva en el Bajío guanajuatense (Morales *et al.* 2020).

CONCLUSIONES

El agua de los sistemas no cultivado y orgánico de cebolla presentó calidad dentro de los parámetros normativos mexicanos, con bajos niveles de toxicidad. En contraste, el agua del sistema convencional no cumplió con dichos criterios, mostrando concentraciones elevadas de nitratos, fosfatos y metales pesados, que representan un riesgo para la producción. Se recomienda realizar más estudios en la región para evaluar el comportamiento de estos parámetros e incluir otras variables como contenido de metales en el suelo, residuos de agroquímicos y antibióticos, así como análisis de escurrimientos, a fin de comprender mejor los factores que afectan la calidad del agua en los sistemas de producción de cebolla.

AGRADECIMIENTOS

Al CONAHCYT por el apoyo otorgado al primer autor para la realización de estudios de Maestría en el Programa de Manejo Sostenible de Agroecosistemas, BUAP. En agradecimiento al Dr. Sergio Martínez Trinidad por su apoyo en la elaboración del mapa del sitio de estudio.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen algún conflicto de intereses en la investigación plasmada en el presente manuscrito.

LITERATURA CITADA

- Ağca N, Karanlık S, Ödemiş B (2014) Assessment of ammonium, nitrate, phosphate, and heavy metal pollution in groundwater from Amik Plain, southern Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment* 186: 5921–5934. <https://doi.org/doi:10.1007/s10661-014-3829-z>.
- Akhtar N, Syakir-Ishak MI, Bhawani SA, Umar K (2021) Various natural and anthropogenic factors responsible for water quality degradation: A review. *Water* 13(2660): 1-35. <https://doi.org/10.3390/w13192660>
- Blanco-Villacorta MW (2021) La revolución verde: mitos y verdades caso Bolivia. *Apthapi* 637(1): 2213-2218.
- Bolaños D, Cordero G, Segura G (2017) Determinación de nitritos, nitratos, sulfatos y fosfatos en agua potable como indicadores de contaminación ocasionada por el hombre, en dos cantones de Alajuela (Costa Rica). *Tecnología en Marcha* 16: 30-48. <https://doi.org/10.18845/tm.v30i4.3408>

- Bouchiba E, Ellafi A, Ferrer AV, Younes SB, Haffouz A, Kacem BH, Elgharbi F, López-Maldonado EA, Raldua, D, Gómez-Canela C, Borgi MA (2025) Analytical study, environmental risk assessment, and toxicity-based bioassays of effluents from phosphate fertilizer industry: A case study in Gafsa mining basin (SW Tunisia). *Environmental Science Pollution Research* 32: 14465-14488. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36518-w>
- Bressiani PA, de Oliveira AKG, de Souza CA, da Silva MPR, Moreira ACP, Schmitz APO, Pokrywiecki JC, Pokrywiecki TS, Manosso FC, Gomes EMV, Lingnau R, Arruda G, Follador F AC, Düsman E (2025) Physicochemical and ecotoxicological changes of the waters of the River Marrecas, Paraná, Brasil and others tributaries in high-flow. *Water Air Soil Pollut* 236(510). <https://doi.org/10.1007/s11270-025-08167-9>
- Calleros REY, Alarcón HMaT, Morán MJ, Cueto WJA, Pérez MR, Sanin LH (2012) Caracterización de una zona contaminada por nitratos y su impacto en la salud humana. En: Cedillo LA, Cano RF (eds) *Género, ambiente y contaminación por sustancias químicas*. SEMARNAT, INECOL. México. pp: 35-54.
- Cantero BD, Pérez GL (2018) Evaluación ecotoxicológica de aguas subterráneas utilizadas para el consumo, en la ciudad de Matanzas. *Convención Internacional de Salud Cuba* 8: 188-196.
- Castro-González NP, Calderón-Sánchez F, Pérez-Marroquín GJ (2024) Análisis espacial de metales pesados en suelos agrícolas de la subcuenca Atoyac-Zahuapan y riesgos de salud pública. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo* 21(1): 84-99. <https://doi.org/10.22231/asyd.v21i1.1593>
- Chancay JE, Solís OL, Alvear SD, Martínez RD, Mena GBZ, Henry CV, Segarra EN, Coronel B, Espinosa, R, Cabrera MV, Capparelli J, Celi E (2021) Integrating multiple lines of evidence to assess freshwater ecosystem health in a tropical river basin. *Environmental Pollution* 289: 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117796>
- Cruz-Hernández J, Águila-Muñoz JC, Rojano-Hernández R, Morales-Jiménez J (2017) Digeridos de fermentación de estiércol: consideraciones para su recomendación en agricultura de traspatio. *Agroproductividad* 10(7): 3-8.
- Delgado-Arroyo MM, Miralles de Imperial -Hornedo R, Alonso-Peralta F, Rodríguez-Almestre C, Martín-Sánchez JV (2014) Heavy metals concentration in soil, plant, earthworm and leachate from poultry manure applied to agricultural land. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 30(1): 43-50.
- Díaz-Arriaga F (2014) Mercurio en la minería del oro: impacto en las fuentes hídricas destinadas para consumo humano. *Revista Salud Pública* 16: 947-957.
- Dongfan L, Yuanzheng Z, Yan L, Jie L, Yanguo T, Hong L, Xuelian X, Weifeng Y, Jie Y (2021) Spatiotemporal evolution of groundwater nitrate nitrogen levels and potential human health risks in the Songnen Plain, Northeast China. *Ecotoxicology Environmental Safety* 5: 208-223. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111524>
- Dueñas-Rivadeneira JP, Intriago-Flor FG (2022) Contenido de metales pesados (Cu, Pb, Ni, Cd) en abonos orgánicos y las materias primas para su elaboración. *La Técnica: Revista de las Agrociencias* 27: 26-35. https://doi.org/10.33936/la_tecnica.v0i27.3674
- Echeverri SAF, Urrutia CN, Barona RSM (2020) Vulnerabilidad de fuentes hídricas superficiales de la cuenca del río cerrito a la contaminación difusa agrícola. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental* 11(2): 117-130. <https://doi.org/10.22490/21456453.3136>
- Feyisa G, Mekassa B, Merga LB (2025) Human health risks of heavy metals contamination of a water-soil-vegetables farmland system in Toke Kutaye of West Shewa, Ethiopia. *Toxicology Reports* 14(102061): 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2025.102061>
- Figueruelo J, Dávila M (2004) *Química física del ambiente y de los procesos medioambientales*. Reverté, S. A. España. 570p.

- INEGI (2017) Anuario estadístico y geográfico de Puebla. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. 46p. https://www.datatur.sectur.gob.mx/ITxEF_Docs/PUE_ANUARIO_PDF.pdf. Fecha de consulta: 18 de agosto del 2021.
- INEGI (2021) Indicador Global de la Actividad Económica. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. <https://www.inegi.org.mx/temas/igae/>. Fecha de consulta: 21 de agosto de 2021.
- Kebrom TH, Woldesenbet S, Bayabil HK (2019) Evaluation of phytotoxicity of three organic amendments to collard greens using the seed germination bioassay. *Environmental Science Pollution Research* 26: 5454-5462. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3928-4>
- Mancilla VOR, Anzaldo CBN, Guevara GRD, Hernández VO, Palomera GCY, Figueroa GY, Ortega EHM, Flores MH; Can AJ, Cruz CE, Sánchez BE, Olguín LJJ, Mendoza SI (2021) Calidad del agua subterránea para uso agrícola en Zacoalco de Torres y Autlán de Navarro, México. *Terra Latinoamericana* 39: e745. <https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.745>
- Mendoza-Escalona B, Torres-Rodríguez D, Marco LM, Gómez C, Estanga-Barrios M, García-Orellana Y (2021) Concentración de metales pesados en suelos agrícolas bajo diferentes sistemas de labranza. *Tecnológicas* 24(51): 1-12. <https://doi.org/10.22430/22565337.1738>
- Mendoza YM, Ortiz BJC (2018) Pollution's degree of Chili river by metallic oligoelements and its effect in *Allium stump* L. (onion) crop in the irrigation sector – Tiabaya. *Campus* 23(25): 43-58. <https://doi.org/10.24265/camus.2018.v23n25.04>
- Mercado SAS, Parada CZ (2025) Bioassay of toxicity of acid mine drainage treated and untreated with lime ash using the bioindicator *Pisum sativum* L. *Environmental Science Pollution Research*, 32: 8547-8554. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36247-0>
- Mérida-Cano ME (2020) Calidad bacteriológica del agua y su relación con el potencial de óxido reducción (ORP). *Agua, Saneamiento & Ambiente* 15(1): 37-43.
- Milder-Ruiz CS (2020) Calidad de agua de la microcuenca Llluchca, Amazonas, Perú. *Revista de Investigación Científica UNTRM: Ciencias Naturales e Ingeniería* 3(3): 15-21. <http://dx.doi.org/10.25127/ucni.v3i3.631>
- Morales AI, Flores OA, Morán RJ, Hernández HMA, Landa AJF (2020) Identificación de las fuentes de nitratos mediante métodos hidrogeoquímicos e isotópicos en el agua subterránea del Bajío Guanajuatense. *Geofísica internacional* 59(3): 169-194. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2020.59.3.2093>
- Otero N, Vitoria L, Soler A, Canals A (2005) Fertiliser characterisation: Major, trace and rare earth elements. *Applied Geochemistry* 20(8): 1473-1488. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2005.04.002>
- Rodríguez AJ, Salazar CA, Ruiz R, López E, Sedeño JE, Rodríguez A (2014) Índices de germinación y elongación radical de *Lactuca sativa* en el biomonitorio de la calidad del agua del río de Chalma. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 30(3): 307-316.
- Rodríguez CS, De Asmundis LC, Martínez CG (2016) Variaciones estacionales de las concentraciones de fosfatos y nitratos en distintas fuentes de aguas de pequeños productores hortícolas. *Agrotecnia* 24: 30-34. <http://dx.doi.org/10.30972/agr.0241174>
- Rojas IS, Coronado GMR, Beltrán FA (2020) Contaminación por nitratos y fosfatos provenientes de la actividad agrícola en la cuenca baja del río Mayo en el estado de Sonora, México. *Terra Latinoamericana* 38(2): 247-256. <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.642>
- Romero-Ruiz RY, Leos-Rodríguez JA, Torres-Abelino G, Zavala-Pineda MJ (2022) Viabilidad económica de la implementación de buenas prácticas agrícolas en la producción de cebolla. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo* 19(1): 1-10. <https://doi.org/10.22231/asyd.v19i1.861>
- Sánchez TBI, Zegbe DJA, Rumayor RAF (2013) Propuesta para evaluar el proceso de adopción de las innovaciones tecnológicas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 4(6): 855-868.

- Schleiffer M, Speiser B (2022) Presence of pesticides in the environment, transition into organic food, and implications for quality assurance along the European organic food chain – A review. *Environmental Pollution* 313: e120116. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120116>
- SIAP (2021) Producción Nacional de cebolla blanca. <https://www.gob.mx/siap> Fecha de consulta 15 de julio de 2023.
- SSA (2002) NOM-230-SSA1-2002 Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano, requisitos sanitarios que se deben cumplir en los sistemas de abastecimiento públicos y privados durante el manejo del agua. Procedimientos sanitarios para el muestreo. Secretaría de Salubridad y Asistencia. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=2081772&fecha=12/07/2005 Fecha de consulta: 20 de julio de 2022.
- SSA (2017) NOM-127-SSA1-2017, Norma oficial Mexicana Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. 2017 Secretaría de Salud. Secretaría de Salubridad y Asistencia. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5581179&fecha=06/12/2019. Fecha de consulta: 20 de julio de 2022
- Sykora V, Clavijo A, Kronoberg MF, Díaz S, Gómez C, Manurriz E, Rossen A (2021) Aplicación de bioensayos ecotoxicológicos para evaluar la calidad del agua del arroyo Cañuelas Buenos Aires, Argentina. *Tecnología y ciencias del agua* 12(1): 261-312. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2021-v12-n1>
- Torres MJA, Jürgen MLW, Daesslé PA, Cervantes AR, Ledesma R (2021) Estimation of nitrate pollution sources and transformations in groundwater of an intensive livestock-agricultural area (Comarca Lagunera), combining major ions, stable isotopes and MixSIAR model. *Environmental Pollution* 269: 183-189. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115445>
- Urriola L, Montes CK, Díaz VM (2021) Evaluación de la fitotoxicidad de abonos orgánicos comerciales usando semillas de lechuga (*Lactuca sativa* L.) y pepino (*Cucumis sativus*). *Revista Semilla del Este* 1(2): 1-11.
- Verma A, Sharma A, Kumar R, Sharma P (2023) Nitrate contamination in groundwater and associated health risk assessment for Indo-Gangetic Plain, India. *Groundwater for Sustainable Development* 23: 1-16. e100978. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.100978>
- Wang-Rong L, Dong-Zeng LS, Wen-Xing S, De-Chun H, Gen-Yi W, Xiao-Rui M, Shan J, Cai-Hong J, Guang-Guo Y (2020) Comparisons of pollution characteristics, emission situations, and mass loads for heavy metals in the manures of different livestock and poultry in China. *Science of the Total Environment* 734: 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139023>
- Yunhui Z, Yongsheng D, Ying W, Xun H, Yong X, Qiuming P (2021) Hydrochemistry, quality and potential health risk appraisal of nitrate enriched groundwater in the Nanchong area, southwestern China. *Science of the Total Environment* 784: 1-11. e147186. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147186>
- Zhou Z, Xuesong YX, Hu C (2025) Convolutional neural network for groundwater contamination source identification. *Expert Systems with Applications*, 294 (128820). <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.128820>