

Revisión de la toxicología genética de fertilizantes en *Allium cepa*: metodología, fortalezas y limitaciones del modelo

Genetic Toxicology Review of Fertilizers in *Allium cepa*: Methodology, Strengths, and Limitations of the Model

Olivia Torres-Bugarin ^{a, b*}, Karina Iveth Orozco-Jiménez ^a, Fernanda Valverde-Salazar ^a, Paulina Renata Valencia-Chávez ^a, María Isabel Martínez-Ruiz ^a, María Luisa Ramos-Ibarra ^c, María Evarista Arellano-García ^{b*}.

^a Medicina clínica de especialidad, Unidad Académica de Medicina, Universidad Autónoma de Guadalajara, Zapopan 45129, Jalisco, México; oliviatorres@hotmail.com; iveth.orozco@edu.uag.mx;

fernanda.valverde@edu.uag.mx; paulinar.valencia@edu.uag.mx; mariai.martinez@edu.uag.mx

^b Laboratorio de Genotoxicología Ambiental, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Baja California. Carretera Transpeninsular Ensenada-Tijuana No. 3917, Colonia Playitas, C. P. 22860, Ensenada, Baja California, México. evarista.arellano@uabc.edu.mx

^c Laboratorio de Toxicología Genética, Depto. Salud Pública, División Ciencias Veterinarias, Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad de Guadalajara, Jalisco, México. luisa.ramos@academicos.udg.mx

* autor por correspondencia

oliviatorres@hotmail.com, evarista.arellano@uabc.edu.mx

RESUMEN

El uso intensivo de fertilizantes preocupa por sus efectos en organismos no blanco y el ambiente. En este marco, *Allium cepa* es un modelo sencillo, económico, sensible y reproducible para evaluar daño genético. Sus meristemas radiculares presentan alta actividad mitótica y cromosomas grandes y pocos ($2n = 16$), lo que facilita la enseñanza de la mitosis y el análisis de biomarcadores clave (índice mitótico, aberraciones cromosómicas, puentes, rezagos, rupturas y micronúcleos). Este artículo revisa el modelo *Allium cepa*, sus biomarcadores, fortalezas, limitaciones y su aplicación en la evaluación de fertilizantes.

Se realizó una búsqueda, sin límite temporal, en español e inglés, en PubMed, Google académico y ProQuest y manual. Solo se incluyeron artículos que estudiaron citotoxicidad y genotoxicidad en meristemas de raíz de *Allium*, y no se incluyeron revisiones. Se identificaron 13 estudios sobre fertilizantes orgánicos e inorgánicos, formulaciones comerciales, biofertilizantes y nanofertilizantes evaluados mediante el modelo *Allium cepa*.

En general, el uso de fertilizantes nitrogenados a bajas concentraciones estimuló la mitosis, mientras que las dosis altas indujeron efectos citotóxicos y genotóxicos. La vermicomposta tendió a aumentar el IM sin efectos tóxicos; por el contrario, la composta de basura urbana, pese a baja toxicidad en otros modelos, mostró mayor sensibilidad y efectos adversos en *Allium cepa*.

Estos hallazgos respaldan a *Allium cepa* como herramienta para bioensayos preliminares de riesgo ambiental y subrayan la necesidad del uso responsable y sostenible de insumos agrícolas para proteger la salud humana y los ecosistemas.

Palabras clave: *Allium cepa*, fertilizante, sostenibilidad agrícola, bioensayo, genotoxicidad, citotoxicidad, micronúcleos, índice mitótico.

ABSTRACT

The intensive use of fertilizers raises concerns due to their effects on non-target organisms and the environment. In this context, *Allium cepa* is a simple, cost-effective, sensitive, and reproducible model for assessing genetic damage. Its root meristems exhibit high mitotic activity and large, few chromosomes ($2n = 16$), which facilitates the teaching of mitosis and the analysis of key biomarkers (mitotic index, chromosomal aberrations, bridges, laggards, breaks, and micronuclei). This article reviews the *Allium cepa* model, its biomarkers, strengths, limitations, and its application in fertilizer evaluation.

A search was conducted, with no time restriction, in Spanish and English, using PubMed, Google Scholar, ProQuest, and manual sources. Only articles that studied cytotoxicity and genotoxicity in *Allium* root meristems were included; review papers were excluded. Thirteen studies were identified on organic and inorganic fertilizers, commercial formulations, biofertilizers, and nanofertilizers assessed through the *Allium cepa* model.

In general, the use of nitrogen fertilizers at low concentrations stimulated mitosis, whereas high doses induced cytotoxic and genotoxic effects. Vermicompost tended to increase the mitotic index without toxic effects; in contrast, urban waste compost, despite showing low toxicity in other models, demonstrated higher sensitivity and adverse effects in *Allium cepa*.

These findings support *Allium cepa* as a tool for preliminary environmental risk bioassays and highlight the need for responsible and sustainable use of agricultural inputs to protect human health and ecosystems.

Keywords: Allium cepa, fertilizer, agricultural sustainability, bioassay, genotoxicity, cytotoxicity, micronuclei, mitotic index.

■ ■

1. Introducción

La sobrefertilización ha suscitado creciente preocupación debido a sus efectos adversos sobre organismos no blanco y la salud de los ecosistemas (Bonciu, 2018; Liu et al., 2022). Por su parte, el modelo vegetal *Allium cepa*, está consolidada como una herramienta eficiente, sensible y de bajo costo para estudios preliminares de citotoxicidad y genotoxicidad (Casillas-Figueroa et al., 2020; de Melo et al., 2024). Su simplicidad metodológica y alta capacidad de respuesta lo hacen especialmente adecuado para evaluar contaminantes ambientales, incluidos los fertilizantes (Fiskesjö, 1985).

Por tanto, esta revisión expone los procedimientos metodológicos del modelo Allium cepa, sus ventajas y limitaciones, destacando su utilidad como herramienta citogenética validada para evaluar la toxicidad de fertilizantes orgánicos, inorgánicos y experimentales, con el fin de apoyar la vigilancia toxicológica, la regulación de su uso y la protección de la salud humana y ambiental.

2. Búsqueda bibliográfica

La revisión se realizó mediante una búsqueda manual con una estrategia predefinida y reproducible en PubMed, ProQuest y Google Académico, sin restricción de fechas y en español e inglés. Se utilizaron combinaciones de términos y sinónimos (fertilizante/fertilizer, biofertilizante/biofertilizer, composta/compost, nanofertilizante/nanofertilizer, “Allium cepa test/assay”, citotoxicidad/cytotoxic y genotoxicidad/genotoxic), conectados con operadores AND/OR. Se excluyeron artículos de revisión y solo se incluyeron estudios que evaluaron efectos citotóxicos y genotóxicos en meristemos de raíz de *Allium cepa*. El cribado se efectuó por título/resumen y luego a texto completo, con eliminación de duplicados y registro de motivos de exclusión.

2.1 Fertilizantes: daño a la salud de los ecosistemas

Aunque los fertilizantes son esenciales para aumentar la productividad agrícola global (Bonciu, Roşculete et al., 2018), su uso excesivo y mal regulado genera serios problemas ecológicos que requieren atención urgente (Dutta et al., 2018). Los fertilizantes, especialmente los nitrogenados y fosfatados, contaminan suelos y cuerpos de agua por escurrimiento o lixiviación, lo cual afecta la calidad ambiental y el equilibrio biológico (Bijay-Singh, 2021; Rahman & Zhang, 2018; Verma et al., 2016). Por ejemplo, esta contaminación favorece la eutrofización, el crecimiento de algas nocivas y la disminución del oxígeno disuelto, con efectos adversos sobre la fauna acuática (Sankhla, 2018). Además, los fertilizantes alteran la biodiversidad edáfica, principalmente las comunidades microbianas responsables de procesos clave como la fertilidad del suelo y el reciclaje de materia orgánica. Incluso, su impacto trasciende el entorno físico, ya que la exposición a sus residuos — presentes en cultivos o acumulados a lo largo de las cadenas tróficas— pueden inducir efectos tóxicos en diversos organismos terrestres, incluidos los seres humanos (Moura & Franzener, 2017; Remans et al., 2019). Esto se debe a que la acumulación de residuos de fertilizantes puede generar toxicidad y seres humanos (Gong et al., 2019; Suciú et al., 2022).

En particular, la exposición prolongada a nitratos y nitritos se asocia con alteraciones endocrinas, disfunción reproductiva y mayor riesgo oncológico, especialmente en regiones agrícolas con contaminación significativa del agua potable (Mikkelsen, 2007; Sankhla, 2018). De igual manera, está documentado que estos compuestos nitrogenados así como los fosfatos y metales pesados presentes inducen daño al DNA tanto de células vegetales como en animales, a través de mecanismos como el estrés oxidativo, alteración del ciclo celular e inestabilidad genómica (De Bastiani et al., 2024; Dutta et al., 2018; El-Din et al., 2009), de tal manera que estos daños podrían desencadenar alteraciones ecológicas y sanitarias graves (Bonciu, Roşculete, et al., 2018; Dutta et al., 2018).

Por tanto, a pesar de su importancia en la producción de alimentos, el uso excesivo de fertilizantes es un riesgo emergente que requiere ser evaluado mediante herramientas bioindicadoras confiables, como el modelo vegetal *Allium cepa*, que permite detectar efectos citogenéticos y genotóxicos de manera sensible y reproducible.

Es fundamental evaluar estos riesgos para establecer límites seguros de uso y promover prácticas agrícolas sostenibles que minimicen el impacto ambiental y protejan la salud pública (Dhankhar & Kumar, 2023).

2.2 *Allium cepa*: como bioindicador

Biomarcador: un biomarcador se define como un organismo, grupo de organismos o respuesta biológica cuya presencia, ausencia o alteraciones fisiológicas, celulares o genéticas reflejan la exposición a agentes contaminantes y el estado de salud de un ecosistema. Su empleo permite detectar efectos biológicos tempranos de sustancias tóxicas, lo que facilita la evaluación del impacto ecológico o sanitario de dichos compuestos (Torres-Bugarin et al., 2014).

Frente a este escenario, resulta imprescindible desarrollar y utilizar bioindicadores confiables que permitan evaluar los efectos citogenéticos y genotóxicos de los insumos agrícolas. Estas herramientas no solo favorecen la vigilancia ambiental, sino que también orientan políticas para el uso racional de fertilizantes y la transición hacia prácticas agrícolas más seguras y sostenibles.

Específicamente, la evaluación de la genotoxicidad y citotoxicidad ambiental requiere modelos sensibles, económicos y reproducibles. Entre las especies vegetales más empleadas con este propósito, *Allium cepa* (cebolla común) destaca como uno de los sistemas más versátiles y consolidados (Leme & Marin-Morales, 2009).

Cultivo y manejo: es una planta herbácea bienal, de distribución global, de bajo costo, fácil acceso, cultivo y conservación, que posee gran diversidad de usos culinarios y aplicaciones en la salud, enseñanza y en toxicología genética (Marefati et al., 2021; Teshika et al., 2019).

Raíz: presenta un sistema radicular bien desarrollado, conformado por numerosas raíces fasciculadas que emergen de un disco basal con nudos y entrenudos cortos, a partir del cual también se originan las hojas. En los extremos de las raíces se encuentran los meristemos apicales, de organización simple, constituidos por células de gran tamaño, alta actividad mitótica y elevada permeabilidad. Estas características facilitan la absorción de sustancias tóxicas y colorantes, permiten calcular con

precisión la tasa de división celular y favorecen la activación metabólica de pro-mutágenos (Alias et al., 2023).

Núcleo: las células meristemáticas presentan un núcleo prominente en relación con el citoplasma, lo que facilita su visualización microscópica. Esta característica permite observar con claridad estructuras nucleares como la condensación de cromatina y la formación de nucleolos, útiles como indicadores de daño genético.

Cromosomas: *Allium cepa* su cariotipo es diploide ($2n = 16$), conformado por cromosomas metacéntricos (pares 1, 4 y 7), submetacéntricos (pares 2, 3, 5 y 8) y uno subtelocéntrico (par 6) (Figura 1). El gran tamaño de sus cromosomas facilita su tinción y permite, mediante microscopía convencional, la identificación precisa de las fases de la mitosis (Figura 2). Esta morfología también favorece la detección de alteraciones citogenéticas —aberraciones cromosómicas, puentes anafásicos, rupturas o micronúcleos— (Figura 3), lo cual favorece resultados confiables sobre los efectos genotóxicos (Lomartire et al., 2021).

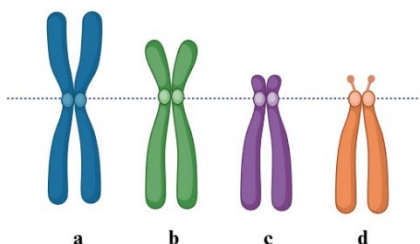


Figura 1. Tipos de cromosomas por posición de centrómero: a) metacéntrico, b) submetacéntrico, c) subtelocéntrico, d) telocéntrico. Imagen propia. Diseñada con Biorender®.



Figura 2. *Allium cepa* (cebolla): células de raíz. a) profase, b) metafase (*) y telofase (■), c) anafase. Tinción Aceto-orceína solución “B” para cromosomas (Hycel®). Microscopio ZEISS (Objetivo 40X). Imágenes donadas por Dra. en C. Olivia Torres Bugarín (Unidad Académica de Medicina, UAG).

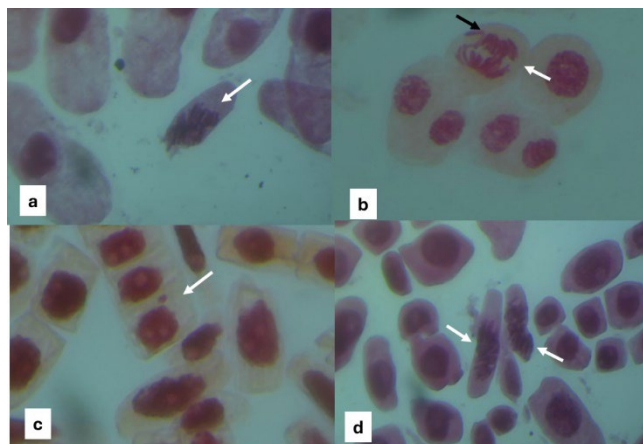


Figura 3. *Allium cepa* (cebolla): células de raíz: a) metafase polar, b) puente anafásico (flecha blanca), cromosoma pegajoso (flecha negra), c) célula micronucleada, d) C-mitosis. Tinción Aceto-orceína solución “B” para cromosomas (Hycel®). Microscopio ZEISS (Objetivo 40X). Imágenes donadas por Dra. Olivia Torres Bugarín (Unidad Académica de Medicina, UAG).

Como sistema de prueba: en 1938, Levan investigó los efectos de diferentes concentraciones de

colchicina en los meristemas radicales de *Allium cepa*. Sus experimentos lograron detener la mitosis e inducir la formación de cromosomas metafásicos sobrecondensados, lo que representó un hito en el desarrollo de la citogenética (Fiskesjö, 1985). Casi cinco décadas después, Fiskesjö estandarizó esta metodología y consolidó a *Allium cepa* como uno de los modelos vegetales más eficaces para evaluar citotoxicidad y genotoxicidad (Fiskesjö, 1985).

Gracias a estas y otras contribuciones, *Allium cepa* es considerado como un modelo de referencia en estudios ambientales y toxicológicos. Sus principales ventajas incluyen el bajo costo, la facilidad de manejo y la buena correlación con sistemas biológicos más complejos, sin requerir infraestructura especializada (de Melo et al., 2024; Ruiz-Ruiz et al., 2023).

2.3 Metodología del modelo *Allium cepa*

Cuidados: aunque el modelo *Allium cepa* es sencillo de manejar, cada paso requiere precisión para evitar errores y garantizar resultados confiables.

Selección de organismos: los organismos se pueden adquirir del mercado local, del sitio de producción, o incluso cultivarlos explícitamente para el trabajo experimental. Es fundamental seleccionar bulbos sanos, de tamaño homogéneo, sin daños físicos evidentes, libres de hongos y con el disco germinativo intacto, además se deben limpiar cuidadosamente y cortar todas las raíces (dejar aproximadamente medio cm) sin dañar el disco germinativo, a fin de asegurar el desarrollo radicular óptimo. Esta homogeneidad inicial contribuye a minimizar la variabilidad en las respuestas biológicas frente al agente de prueba.

Hidratación: para inducir la división celular y estimular el crecimiento radicular, los bulbos deben ser aclimatados, para ello se colocan a temperatura ambiente (20-25° C) por al menos 24 horas en un contenedor con agua, la cual debe cubrir perfectamente el disco germinativo.

Distribución experimental: una vez alcanzado el desarrollo radicular adecuado, los bulbos se colocan en contenedores individuales y se conforman los grupos experimentales.

Se recomienda utilizar un mínimo de tres ejemplares por grupo; sin embargo, lo ideal es trabajar con cinco, considerando que hasta el 20 % puede presentar crecimiento deficiente. Esta estrategia permite prevenir sustituciones inesperadas con los organismos y refuerza la validez estadística de los resultados.

Es indispensable incluir al menos dos controles: el control negativo— el cual es el más importante— consiste en bulbos sin exposición, mantenidos únicamente en agua destilada o en un buffer fisiológico. El control positivo, por su parte, debe exponerse a un agente genotóxico conocido (Tabla 1). —como por ejemplo un antineoplásico— con el fin de verificar la sensibilidad del sistema. Finalmente, los grupos tratados se exponen al agente de prueba en una o más concentraciones (generalmente tres dosis), con el propósito de evaluar sus posibles efectos citotóxicos y/o genotóxicos (Fiskesjö, 1985; Leme & Marin-Morales, 2008).

Recolección y preparación de muestras: al finalizar la incubación, se cuentan y miden las raíces. Luego, se cortan y fijan en solución de Carnoy (metanol: ácido acético, 3:1) dentro de un contenedor etiquetado y hermético. Las muestras pueden conservarse por varios meses. Antes de su preparación, se elimina el exceso de fijador con lavados suaves con agua destilada (Fiskesjö, 1985).

Tabla 1. Agentes usados como control positivo en el modelo *Allium cepa*.

Control positivo [Dosis]	Mecanismo de acción	Referencia
Colchicina [0.05 - 2 p/v]	Alcaloide mitótico que inhibe la polimerización de los microtúbulos al unirse a la tubulina, interfiriendo en la formación del huso mitótico. Induce: inhibición de células en metafase, arresto mitótico, por ello se observa aumento de células en metafase, AC, MN y disminución del IM.	(Alotaibi, 2022; Fiskesjö, 1985)
Ciclofosfamida [2-50 mg/mL]	Alquilante del grupo de las oxazafosforinas, requiere activación hepática in vivo, y en <i>Allium cepa</i> muestra	(Leme & Marin-

	efectos genotóxicos por la formación de metabolitos activos en soluciones acuosas o por preactivación. Induce: entrecruzamientos de cadenas de DNA, rupturas de cadena sencilla y doble, formación de aductos DNA-proteína, mutaciones, AC numéricas y estructurales, aumento de alteraciones de células en metafase-anafase, AC, MN y disminución del IM.	Morales, 2009; Okorie Asita et al., 2017)
Mitomicina C [0.5–5 mg/L]	Antibiótico antineoplásico y alquilante bifuncional. Se activa intracelularmente. Induce: alquilación del DNA, forma aductos y puentes, causa rupturas de doble hebra, rezagos anafásico, pulverización cromosómica, AC, MN, apoptosis y arresto mitótico. Inhibe la síntesis de DNA, la transcripción y progresión del ciclo celular.	(Leme & Marin-Morales, 2008; Madike et al., 2019)
NaAsO ₂ [0.37 mg/mL (2.84 mM)]	Altamente tóxico y carcinógeno humano (Grupo 1, IARC). Induce: interferencia con la respiración celular mitocondrial al inhibir enzimas dependientes de tioles. También EO, rupturas en DNA, alteraciones del huso mitótico, AC y MN.	(Casillas-Figueroa et al., 2020)
EMS [1-125 mg/mL 0.05-0.6 mM]	Alquilante. Actúa introduciendo grupos etilo en las bases nitrogenadas del DNA, principalmente en la guanina. Induce: errores de emparejamiento durante la replicación y, por ello mutaciones puntuales.	(Madike et al., 2019; Ping et al., 2012)
(K ₂ Cr ₂ O ₇) [0.05-1.0 mM]	Compuesto inorgánico. Altamente oxidante y genotóxico. Genera EO y enlaces cruzados en el DNA. Induce: rupturas de una y dos hebras y alteraciones cromosómicas.	(Mohammed et al., 2015),
MH [200–500 mg/L, 2 - 5 mM, 4 x10 ⁻³ M]	Posible carcinógeno (Grupo 3, IARC). Induce: interferencia de la formación del huso mitótico, por ello inhibe la mitosis, causa AC y MN, además de generar efectos clastogénicos y aneugénicos, por interferencia en la segregación cromosómica.	(Goujon et al., 2014)
EtBr [0.1 a 5 µg/mL (≈ 0.1 a 5 mg/L)]	Agente intercalante, distorsiona la doble hélice. Induce: engrosamiento y necrosis en raíces, EO, inhibe la replicación y transcripción, provoca rupturas del DNA, AC, MN y apoptosis.	(Madike et al., 2019)
NaC ₆ H ₅ COO [50-1000 mg/L]	Conservador alimentario (E211), presente en bebidas, alimentos y productos farmacéuticos. Induce: disminución del IM, AC y MN, engrosamiento, necrosis de raíces.	(Türkoğlu, 2007)

EO- estrés oxidativo; IM-índice mitótico; AC- alteraciones cromosómicas (retrasos anafásicos puentes, fragmentos, cromosomas dispersos o pegajosos, aneuploides, poliploidías e hipoploidía); MN-micronúcleos; MH- Hidrazida maléica; K₂Cr₂O₇- Dicromato de potasio; EMS- Etil-metano-sulfonato; NaC₆H₅COO - Benzoato de sodio; EtBr -Bromuro de etidio; NaAsO₂-Arsenito de sodio.

Hidrolisis y tinción: para facilitar la penetración del colorante y resaltar las estructuras citoplasmáticas y nucleares, las raíces se hidrolizan en ácido clorhídrico concentrado durante 5 minutos en un vidrio de reloj (Figura 4). Luego se enjuagan con agua destilada y se tiñen con aceto-orceína clorhídrica al 2% durante 30 a 50 minutos. (Fiskesjo, 1985), o bien con acetocarmine al 2 % (Paul & Arjun, 2018), Feulgen (Fiskesjo, 1985; Paul & Arjun, 2018), Saffrania (40–45 %)(Sivaram et al., 2022), o Schiff's reagent (Trivedi & Ahmad, 2013), incluso si se cuenta con microscopio equipado con epifluorescencia se puede usar naranja de acridina (Ozakca & Silah, 2013).

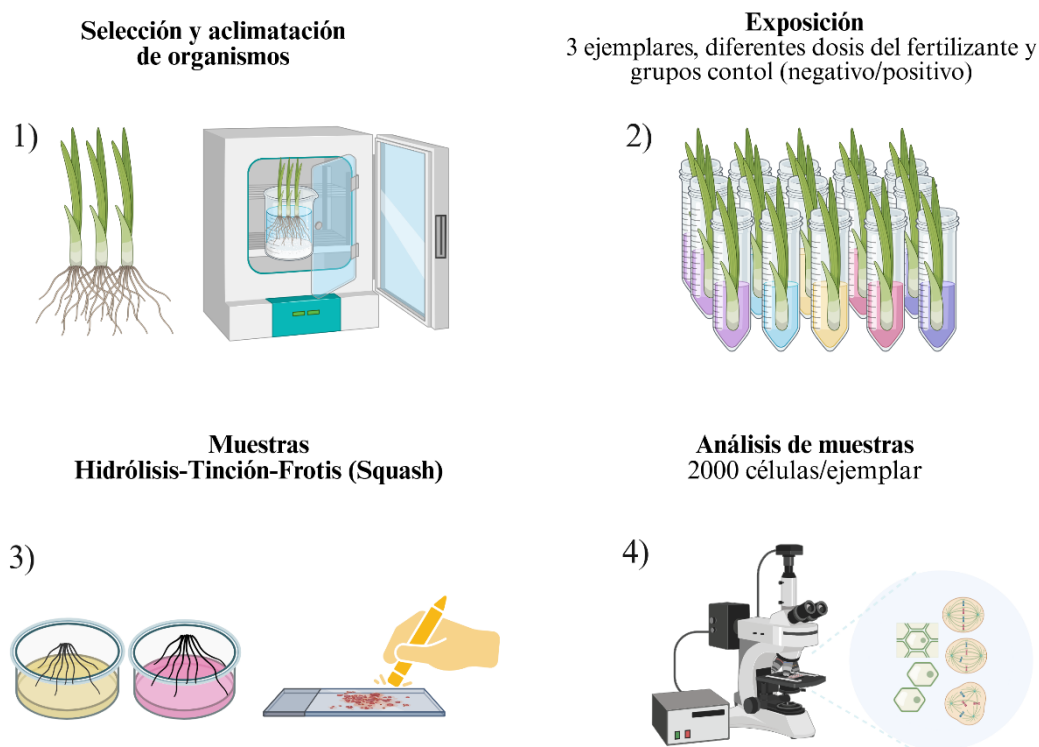


Figura 4. Esquema metodológico del bioensayo de *Allium cepa* para la evaluación citogenética de fertilizantes. 1) Selección y aclimatación de bulbos sanos y homogéneos en condiciones controladas. 2) Exposición a diferentes concentraciones del agente de prueba ("Fertilizantes"), con inclusión de controles negativo y positivo. 3) Procesamiento de raíces mediante hidrólisis ácida y tinción, el preparación de los frotis mediante "squash". 4) Análisis microscópico de 2,000 células por ejemplar, registrando índice mitótico, aberraciones cromosómicas y micronúcleos.

Preparación de muestras para su análisis: tras la tinción, se seleccionan 2 a 3 raíces, se lavan y colocan en un portaobjetos codificado, luego se dejan caer unas gotas de ácido acético al 45 % y se cubren con gretina glicerizada líquida. Se coloca un cubreobjetos y se realiza un extendido tipo squash, aplicando presión firme pero controlada para dispersar las células en una sola capa y facilitar la observación microscópica de las fases mitóticas y posibles alteraciones citogenéticas. Se retira el exceso de líquido con papel absorbente. Las laminillas deben analizarse en un plazo de 1 a 2 semanas. Hasta entonces, pueden conservarse en una cámara húmeda (envueltas en servilletas húmedas), asegurando todo el tiempo buena humedad y que estén libres de hongos.

Análisis microscópico: las muestras se examinan bajo el microscopio óptico a 10×, 40× y 100x aumentos. Se identifican y cuentan células en interfase y en mitosis, estas últimas se clasifican según su fase (profase [P], metafase [M], anafase [A], telofase [T]). También se registran aberraciones cromosómicas como fragmentos, cromosomas rezagados o pegajosos, puentes, micronúcleos, núcleos lobulados, binucleados y polares; para asegurar representatividad, por bulbo, se analizan entre 1,000 y 2,000 células, considerar que se deben incluir al menos dos raíces por ejemplar y tres ejemplares por tratamiento (Fiskesjo, 1985).

Potencial proliferativo (citotoxicidad): el agente de prueba puede inducir diversos efectos sobre la actividad mitótica del tejido meristemático, tales como la estimulación anómala de la división celular, su retraso, inhibición parcial o total, e incluso desencadenar procesos de muerte celular. Para identificar y cuantificar estos efectos, es necesario comparar las alteraciones en los procesos de mitosis y citocinesis entre los diferentes grupos experimentales.

Una herramienta clave para esta evaluación es el cálculo del índice mitótico (IM), que corresponde

al porcentaje de células en división activa (profase, metafase, anafase y telofase) respecto al total de células observadas. Este indicador permite estimar el potencial proliferativo del tejido y detectar variaciones significativas atribuibles a la acción del agente ensayado. Valores anormalmente altos o bajos del IM, en comparación con los controles, pueden reflejar efectos citotóxicos o genotóxicos que comprometen la integridad celular y el ciclo mitótico (Bonciu, Firbas, et al., 2018; Fiskesjö, 1985).

Genotoxicidad: el agente de prueba puede inducir daño directo o indirecto al DNA, conocido como genotoxicidad. Esta se evalúa mediante la detección de alteraciones citogenéticas, como reordenamientos cromosómicos, fracturas del material genético o disrupciones del huso mitótico. Estas lesiones comprometen la estabilidad genómica y son clave para valorar el potencial mutagénico de los compuestos analizados (Bonciu, Firbas, et al., 2018; Fiskesjö, 1985).

2.4 Allium cepa: potencial proliferativo (citotoxicidad)

El modelo Allium cepa permite evaluar la fitotoxicidad mediante la cuantificación de parámetros morfológicos del sistema radicular, como el número, la longitud y la forma de las raíces, así como la presencia de clorosis, necrosis o tumoraciones, siempre en comparación con el grupo control.

La citotoxicidad, entendida como la capacidad de un agente para afectar la viabilidad y función celular, se determina a partir de los cambios en la distribución de las fases del ciclo celular y de las alteraciones en el índice mitótico (IM). Este índice corresponde al porcentaje de células en división sobre el total de al menos 1,000 a 2,000 células analizadas (Sabeen et al., 2020).

El IM es un indicador clave, ya que permite detectar si un agente estimula, retrasa, inhibe o incluso induce la muerte celular (Bonciu, Firbas et al., 2018; Fiskesjö, 1985). La disminución del IM por debajo del 50 % respecto al control refleja alteraciones significativas en el crecimiento y desarrollo celular.

Por el contrario, el aumento del IM sugiere efecto mitoestimulador. Aunque pudiera interpretarse como favorable, este fenómeno puede ser perjudicial, pues indica posible interferencia en los mecanismos de regulación del ciclo celular y podría favorecer divisiones descontroladas, con el consiguiente riesgo de formación de tejidos tumorales (Bonciu et al., 2018).

En consecuencia, el análisis del IM, complementado con los parámetros de crecimiento radicular — como número y longitud de raíces —, ofrece una evaluación integral de los efectos citotóxicos (Fiskesjö, 1985; Leme & Marin-Morales, 2009).

$$\text{IM: \% índice de mitótico (IM)} = [(Células \text{ en mitosis}) / (Total \text{ de células contabilizadas})] \times 100.$$

Donde:

$$Las \text{ células en mitosis} = Células \text{ en profase (P)} + metafase (M) + anafase (A) + telefase (T).$$

$$Total \text{ de células contabilizadas} = células \text{ en interfase} + células \text{ en mitosis}.$$

2.5 Allium cepa: biomarcadores de genotoxicidad

En Allium cepa, la genotoxicidad — entendida como la capacidad de un agente para inducir daño en el DNA — se evalúa mediante la identificación de aberraciones cromosómicas, entre ellas; puentes anafásicos, cromosomas rezagados, C-metafase, metafase polar y micronúcleos (Figuras 1 y 2) (Bonciu, Roşculete, et al., 2018; Fiskesjö, 1985; Sabeen et al., 2020; Torres-Bugarín & Arias-Ruiz, 2023). Cuyo porcentaje se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{vagabundos} + \text{binucleadas} + \text{lesiones nucleares} + \text{células gigantes desviación polar} + \text{células micronucleadas} / (Total \text{ de células contadas}) \times 100.$$

2.6 Mecanismo: Clastogénico

Puente anafásico, figura (2b): estas conexiones son alteraciones estructurales que se originan por

rupturas y fusiones anómalas de cromosomas o cromátidas durante la anafase. De tal manera que los cromosomas permanecen unidos por finos hilos de DNA.

Ruptura cromosómica. la ruptura de cromosomas, seguida de la unión de las regiones proximales de las cromátidas, conduce a la formación de cromosomas dicéntricos, fragmentos de cromosomas acéntricos (sin centrómero) o anillos.

Cromosoma pegajoso, figura (2b): indica efecto altamente tóxico, en general no es reversible, probablemente conduce a la muerte celular.

Micronúcleo (MN), figura (2c): un MN es un fragmento o cromosoma completo que no se integra al núcleo principal durante la mitosis. Cuya membrana es inestable y propensa a romperse y liberar el DNA al citoplasma. Este DNA independiente del núcleo, puede condensarse, replicarse y dividirse de forma asincrónica, y sufrir cromotripsis. Luego, puede reincorporarse al núcleo e inducir inestabilidad genómica contribuyendo a la cancerinogénesis.

$$\text{Frecuencia de células micronucleadas (\%)} = \left[\frac{\text{Total de células contadas}}{\text{Número de células con micronúcleos}} \right] \times 100$$

2.7 Mecanismo: aneuploidogénico

Aneuploidía: número anormal de cromosomas debido a errores en la segregación durante la mitosis.

Poliploidía: incremento del set completo cromosómico, asociado a fallas en la citocinesis.

Cromosoma (rezagado, vagabundo, pegajoso): uno o varios cromosomas no se unen al huso mitótico y no migran a los polos. Los cromosomas pegajosos resultan de la condensación excesiva, despolimerización del DNA o disolución de nucleoproteínas, alteraciones que pueden conducir a la muerte celular.

Metafase polar, figura (2a): los cromosomas no se alinean a la placa ecuatorial, por ello se agrupan hacia uno de los polos (extremos) de la célula.

C-mitosis, figura (2d): la desintegración del huso provoca la desorganización de los cromosomas en la placa ecuatorial, generando configuraciones características —como las inducidas por colchicina— que pueden dar lugar a células tetraploides.

2.8 Mecanismo: inhibición de la citocinesis

Célula binucleada: se forman por división aberrante del huso durante el anafase temprano o el fracaso de la citocinesis después de la telofase.

Anormalidades nucleares: pueden ser indicio de muerte celular, son poco frecuentes en el control negativo y abundantes en el positivo. No obstante, las yemas nucleares también pueden reflejar la eliminación de material genético excedente.

Es un modelo ampliamente utilizado en toxicología genética gracias a las siguientes características (Kanaya et al., 1994; Ma et al., 1995; Ruiz-Ruiz et al., 2023; Torres-Bugarín & Zavala-Cerna, 2013):

- Su accesibilidad y bajo costo, en general los bulbos de cebolla son fáciles de obtener y no requieren condiciones especiales de cultivo;
- Su manejo sencillo permite realizar ensayos in vitro sin equipamiento sofisticado, lo que lo hace útil incluso en laboratorios con recursos limitados;
- Las células meristemáticas poseen alta tasa mitótica, núcleos definidos y cromosomas grandes, características que facilitan el análisis bajo el microscópico;
- Alta sensibilidad a amplia gama de agentes tóxicos como contaminantes ambientales, compuestos industriales, medicamentos, fertilizantes y nanomateriales.
- Buena capacidad para activar pro-mutágenos;
- Los resultados obtenidos con este modelo vegetal correlacionan bien con los de modelos animales, lo que lo convierte en un sistema confiable para estudios preliminares. Al ser vegetal, representa además una alternativa ética y técnica que evita el uso de animales lo cual facilita la aprobación por comités de bioética.

2.9 *Allium cepa*: limitaciones del modelo

No obstante, el modelo *Allium cepa* presenta ciertas limitaciones que deben considerarse al interpretar los resultados (Alias et al., 2023; Barbério et al., 2011; Singh Rathore et al., 2010):

- Una de las más relevantes es la ausencia de un sistema enzimático complejo como el de los mamíferos, particularmente las enzimas hepáticas involucradas en la bioactivación de compuestos, lo que restringe su uso en la evaluación de sustancias que requieren metabolismo previo para ejercer su efecto tóxico;
- También puede haber variabilidad biológica significativa entre bulbos, lo cual puede afectar la reproducibilidad de los resultados;
- Además, los resultados obtenidos en este modelo no siempre son directamente extrapolables a organismos humanos. Esto debido entre otras cosas, a que existen diferencias sustanciales toxicocinéticas y toxicodinámicas —absorción, distribución, metabolismo (bioactivación enzimática ausente en plantas) y excreción—, así como variaciones en barreras tisulares, vías de reparación del DNA, regulación del ciclo celular y respuestas inflamatorias/oxidativas. A ello se suman divergencias en métricas de dosis (p. ej., mg L^{-1} en medios acuosos vs. mg kg^{-1} de peso corporal), rutas de exposición y matrices ambientales que influyen en la biodisponibilidad. Por lo tanto, es ideal que los hallazgos en *Allium cepa* deben complementarse con sistemas mamíferos para establecer su relevancia clínica;
- *Allium cepa* no permite el análisis de procesos toxicocinéticos como la absorción, distribución, metabolismo y excreción de las sustancias evaluadas, y su entorno experimental simplificado no refleja la complejidad fisiológica de los organismos superiores.

2.10 *Allium cepa*: citotoxicidad y genotoxicidad de los fertilizantes

Sin duda, la creciente demanda alimentaria ha impulsado el uso intensivo e indiscriminado de insumos agrícolas, entre ellos los fertilizantes. Sin embargo, la aplicación excesiva de cualquier sustancia implica efectos colaterales no deseados. En particular, la sobrefertilización altera la disponibilidad de nutrientes en el suelo y puede generar impactos negativos, tanto directos como indirectos, en la productividad de los cultivos (Verma & Srivastava, 2018).

Las formas asimilables de nitrógeno, principalmente nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+), son fundamentales para el crecimiento vegetal. Su deficiencia reduce de manera significativa el rendimiento agrícola.

Para suplir esta demanda se emplean fertilizantes nitrogenados, tanto orgánicos (como la urea, de bajo costo y alto contenido de nitrógeno) como inorgánicos (por ejemplo, el nitrato de amonio), que aportan directamente estas fuentes esenciales para las plantas. El ion amonio (NH_4^+) se origina a partir de la descomposición de la materia orgánica o de fertilizantes como la urea y el nitrato de amonio, mientras que el nitrato (NO_3^-) se produce mediante nitrificación o se incorpora al suelo a través de la fertilización (Bijay-Singh, 2021; Verma et al., 2016).

Sin embargo, se estima que solo el 50 % del nitrógeno aplicado es aprovechado por los cultivos. El resto se acumula en el ambiente, provocando toxicidad y alteraciones del pH del suelo. Además, puede inducir estrés por salinidad, al reducir la captación de otros cationes debido a la competencia catiónica. Estas condiciones afectan el metabolismo vegetal e incluso generan consecuencias a nivel celular y genético, tales como estrés oxidativo, aberraciones cromosómicas, polarización defectuosa, anafases desordenadas y puentes cromosómicos (Bijay-Singh, 2021; Verma & Srivastava, 2017).

En este contexto, el modelo vegetal *Allium cepa* constituye un sistema eficaz para la detección temprana de efectos citotóxicos y genotóxicos. Su alta sensibilidad, junto con la facilidad para analizar aberraciones cromosómicas, el IM y la formación de micronúcleos, lo convierte en una herramienta confiable para evaluar el impacto de agroquímicos sobre la integridad genómica vegetal. De este modo, aporta evidencia valiosa para los estudios de riesgo ambiental (Leme & Marin-Morales, 2008).

Esta descrito que las concentraciones elevadas de fertilizantes nitrogenados, como el nitrato de amonio (NH_4NO_3) y otros compuestos similares, provocan reducción significativa en la división

celular. Además, incrementan la frecuencia de aberraciones cromosómicas, lo que refleja un impacto genotóxico potencialmente perjudicial para la estabilidad genética de las plantas expuestas (Figura 5).

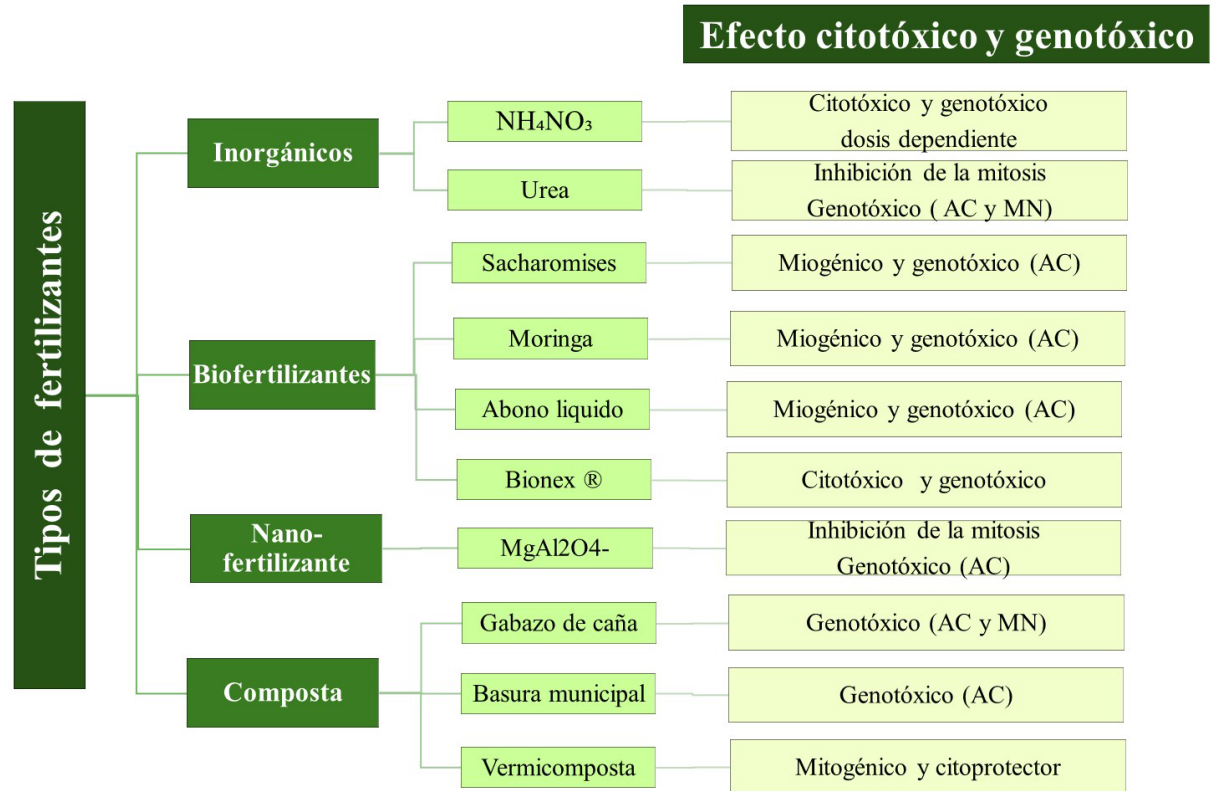


Figura 5. Fertilizantes evaluados con el bioensayo de *Allium cepa* y sus principales efectos citotóxicos y genotóxicos (AC- Aberraciones cromosómicas; MN- Micronúcleos).

Estas alteraciones no se limitan a la especie evaluada, sino que podrían afectar a otros organismos y traducirse en consecuencias fisiológicas adversas. A largo plazo, estos efectos pueden contribuir a desequilibrios ecológicos en sistemas agrícolas intensivos (Tabla 2) (Leme & Marin-Morales, 2008).

Tabla 2. Fertilizantes evaluados mediante el modelo *Allium cepa*.

Fertilizante	Concentración	Biomarcador afectado	Observaciones	Referencia
NH ₄ NO ₃	200 mg N kg ⁻¹	↑ IM ↑ AC, MN	Potente efecto genotóxico dosis-dependiente, en células en división.	(Verma et al., 2016)
NH ₄ NO ₃	0.5 mg N mL ⁻¹	↓ IM ↑ AC, MN	El volumen celular y nuclear interfásico de las células de las raíces tratadas se redujo respecto al control.	(Verma & Srivastava, 2017)
Urea	200 mg N kg ⁻¹	↓ - IM ↑ AC, MN	Mitodepresor Indujo alteraciones en células en interfase, incluso mayor que el NH ₄ NO ₃ .	(Verma et al., 2016)
Urea	100, 500, 1000, 5000, 10.000 y 20.000	↓ IM ↑ AC, MN	↓ - IM, efecto dosis-respuesta Anomalías nucleares: células binucleadas, multinucleadas y núcleos fantasma.	(Bonciu, Roșculete, et al., 2018)

	ppm		A Dosis de 1000 o dosis más altas: células con multi MN. Potente efecto clastogénico	
Urea	200mg N kg ⁻¹	↓ IM ↑ AC	El uso indiscriminado de urea como fertilizante puede inducir una serie de AC en los sistemas vegetales debido a la alteración del equilibrio amonio-nitrato en el suelo.	(Arara et al., 2014)
Urea	0, 0,005, 0,01, 0,025, 0,05 %	↓IM, ↑ AC	A mayor dosis menor longitud y número de raíces, así como IM. 0.05 % indujo AC	(Adeleke M.T.V, 2019)
Nanofertilizantes MgAl ² O ⁴ - Óxido de aluminio y magnesio	50, 100, 200 y 400 mg L ⁻¹	↓IM, ↑ AC	Dosis bajas promovieron el crecimiento de las plantas, las dosis 200 – 400 mL aumentaron el efecto cito y genotóxico.	(Alghofaili et al., 2025)
Abono líquido para algas marinas	10, 15, 20, 25, 30 % V/V	↑ IM ↑ AC	10 % V/V: IM sin efecto negativo, AC son evidentes. Otras concentraciones: ↑IM, AC, MN, vacuolación múltiple y condensación del citoplasma.	(Anitha, 2013)
Biofertilizante Extracto -Sacharomyces cerevisiae - Moringa	5.0, 10.0, 20.0 %	↑ IM ↑ AC = MN	El extracto de moringa en menor concentración es más adecuado, no daña ni los orgánulos citoplasmáticos ni el aparato mitótico. Los extractos no forman MN	(Ali et al., 2019)
Biofertilizante Bionex ®	2,5, 5, 10 y 15 %	↓IM ↑ AC	El efecto citotóxico y mutagénico depende de la concentración y de la duración del tratamiento.	(Văsi, 2016)
SCBC	100 % 0, 3 y 6 Meses de degradación	↑ AC, MN	La citotoxicidad se mantuvo a lo largo de 6 meses, y conforme pasa el tiempo de degradación el daño disminuye.	(Anacleto et al., 2017)
Composta Cb	100 %	AC	Allium no fue sensible, a diferencia de otros modelos.	(Cabrera et al., 1999)
Composta Vc	100 %	* Vc ↑ IM, longitud de raíz * Plaguicida ↓ IM ↑ AC	Suelos tratados con plaguicidas o con Vc. La adición de Vc actúa como mejorador del suelo y e incrementa IM, es bueno para la productividad de los cultivos.	(Datta et al., 2018)

NH₄NO₃ - Nitrato de amonio (fertilizante inorgánico); NPK - fertilizante compuesto comercial (N - Nitrógeno, P-Fósforo, K-Potasio); (NH₄)₂ SO₄ - Sulfato amónico; SCBC – Composta de bagazo de caña de azúcar; Vc - Vermicomposta; Cb - Composta de basura municipal; IM - Índice mitótico; CR - Crecimiento radicular; AC - Aberraciones cromosómicas; CC - Cromatina condensada; MN - Micronúcleos; CRS - Cromosomas rezagados.

3. Discusión

El análisis de los estudios revisados confirma que el modelo *Allium cepa* es una herramienta confiable, sensible y ampliamente validada para la detección de efectos citotóxicos y genotóxicos inducidos por fertilizantes de distinta naturaleza.

Es destacable la escasez de estudios que evalúen efectos citotóxicos y genotóxicos en *Allium cepa*. Además, existe amplia heterogeneidad metodológica (p. ej., rangos de dosis, tiempos de exposición, técnicas de tinción y criterios de conteo), lo que dificulta la comparación directa entre trabajos. Por ello, el análisis se apoya principalmente en los controles internos de cada estudio y en patrones consistentes de respuesta (IM, AC, MN), más que en comparaciones cruzadas.

En este contexto, se puede observar que la mayoría de los trabajos coinciden en que las dosis elevadas de fertilizantes inorgánicos—particularmente los nitrogenados como el NH_4NO_3 , la urea y las mezclas comerciales NPK—provocan disminución significativa del IM y aumento en la frecuencia de aberraciones cromosómicas y micronúcleos, incluso señales clastogénicas son mayores a medida que aumenta la dosis. Estos efectos citogenéticos reflejan daño celular que podría comprometer la integridad genómica de organismos no blanco, incluidos los seres humanos. De tal suerte que, los efectos citogenéticos observados —p. ej., puentes anafásicos, cromosomas rezagados, C-mitosis y micronúcleos— evidencian clastogenicidad/aneugenicidad y, por tanto, inestabilidad genómica. A nivel celular, esto se traduce en detención del ciclo, apoptosis o sobrevida con daño heredable, con impacto en la competencia proliferativa y en la integridad del tejido (v. gr., meristemos radiculares) (Adeleke, 2019; Bonciu, Roşculete, et al., 2018; Verma & Srivastava, 2018).

En organismos no blanco, dichos desenlaces pueden comprometer crecimiento, reproducción y desarrollo, afectando la viabilidad poblacional y la función ecosistémica. En el contexto humano, la señal positiva en *Allium cepa* no implica una extrapolación directa, pero es concordante con vías mecanísticas plausibles (estrés oxidativo, disrupción del huso mitótico, rupturas de DNA). Dado que la frecuencia de MN se asocia con inestabilidad genómica, estos hallazgos justifican evaluaciones complementarias en modelos animales y celulares, así como vigilancia ambiental (suelos y aguas) y gestión de riesgo (Adeleke, 2019; Bonciu, Roşculete, et al., 2018; Verma & Srivastava, 2018).

Por tanto, operativamente, estos resultados sugieren que sería ideal aplicar la dosis mínima efectiva de fertilizantes, monitorear IM, AC y MN como panel integrado de alerta temprana y priorizar alternativas con menor huella citogenotóxica (p. ej., bioinsumos con ventanas de seguridad definidas).

En contraste, como se observa en la tabla 2, los fertilizantes orgánicos y foliares evaluados en concentraciones moderadas mostraron menor citotoxicidad y genotoxicidad que los inorgánicos (Ali, 2019; Anacleto et al., 2017; Cabrera-Guzmán et al., 2007; Datta et al., 2018). Entre ellos destaca la vermicomposta, que favoreció el índice mitótico (IM) y el crecimiento radicular sin efectos tóxicos detectables, lo que sugiere mayor compatibilidad ambiental (Datta et al., 2018). No obstante, el efecto es dependiente de la formulación y la dosis. El abono líquido de algas incrementó el IM, pero a ciertas concentraciones indujo aberraciones cromosómicas/MN y alteraciones citoplasmáticas; los extractos biofertilizantes (*Saccharomyces*/Moringa) aumentaron IM y aberraciones cromosómicas sin formación de MN; y el biofertilizante comercial (Bionex®) mostró mayor frecuencia de IM/aberraciones cromosómicas en función de la concentración y tiempo de exposición. Estos patrones refuerzan la necesidad de ventanas de seguridad específicas por producto.

Por otro lado, la madurez y el origen del insumo orgánico también son relevantes, la SCBC (composta de bagazo de caña) mantuvo citotoxicidad, aunque el daño disminuyó con el tiempo de degradación, mientras que la composta de basura urbana mostró respuestas heterogéneas y menor sensibilidad en *Allium* frente a otros modelos.

En síntesis, los orgánicos/foliares ofrecen perfiles de menor riesgo a dosis moderadas, pero requieren: (i) dosificación prudente y validada en bioensayos (*Allium cepa*: IM, AC, MN); estandarización de protocolos y reporte de composición y verificación de madurez y pureza para minimizar variabilidad y asegurar beneficios agronómicos con baja huella citogenotóxica.

Por su parte, los nanofertilizantes son una innovación prometedora en el ámbito agrícola debido a su

potencial para mejorar la eficiencia en la absorción de nutrientes y estimular el desarrollo vegetal. Sin embargo, también plantean desafíos importantes relacionados con su liberación al medio ambiente, su persistencia, su ingreso potencial a la cadena alimentaria y su toxicidad. Algunos estudios, como el de Alghofaili (2025), evidencian que algunos nanofertilizantes pueden inducir alteraciones cromosómicas, dañar la integridad de la membrana celular, deformar la morfología radicular y alterar el tráfico iónico y de micronutrientes. Estos hallazgos subrayan la necesidad de regular cuidadosamente su aplicación y de evaluar de forma rigurosa tanto sus beneficios agronómicos como sus posibles riesgos toxicológicos y genotóxicos.

Cabe señalar que, si bien existe variabilidad en las concentraciones empleadas entre los estudios, la mayoría muestra clara relación dosis-dependiente. Esta observación refuerza la necesidad de aplicar fertilizantes de manera racional y controlada para prevenir efectos adversos sobre la salud celular y la sostenibilidad ambiental.

En cuanto a los biomarcadores comúnmente afectados, se reportan alteraciones en el índice mitótico, la frecuencia de micronúcleos, cromosomas pegajosos, puentes anafásicos y núcleos fragmentados. Estos indicadores permiten detectar daño tanto en células en división como en interfase, lo que confirma la utilidad del modelo *Allium cepa* para evaluar disrupción del ciclo celular, estrés genotóxico, inestabilidad genómica y potencial mutagénico.

En conjunto, los hallazgos revisados sugieren la necesidad de un uso precavido de fertilizantes, priorizando concentraciones mínimas efectivas y estrategias sostenibles que garanticen la protección de los ecosistemas, la salud humana y la integridad de los organismos no blanco.

4. Conclusiones

El modelo *Allium cepa* es altamente efectivo para detectar alteraciones citogenéticas asociadas al estrés químico inducido por fertilizantes, lo cual ofrece una alternativa ética, económica y ambientalmente pertinente para el monitoreo de la calidad del suelo y la seguridad agroambiental. Los resultados reunidos en esta revisión evidencian que el uso excesivo o mal gestionado de fertilizantes, especialmente los de origen inorgánico, puede generar efectos citotóxicos y genotóxicos significativos en *Allium cepa*, confirmando su valor como bioindicador vegetal.

Sin embargo, es necesario reconocer ciertas limitaciones metodológicas que condicionan la interpretación de los resultados: la variabilidad biológica entre bulbos, la falta de parámetros toxicocinéticos y metabólicos —como los que aportaría un modelo animal— y la imposibilidad de extrapolar de manera directa los hallazgos a escenarios clínicos en humanos. A ello se suma la heterogeneidad de los estudios disponibles en cuanto a dosis, metodologías y parámetros evaluados, lo que dificulta establecer comparaciones directas y conclusiones generalizables.

No obstante, se recomienda promover prácticas agrícolas sostenibles, ajustando las dosis de fertilización a los mínimos efectivos necesarios para los cultivos y evitar aplicaciones excesivas. Asimismo, es pertinente integrar el modelo de *Allium cepa* con otros bioensayos complementarios en estudios regulatorios, de esta manera será posible validar de forma más integral los riesgos asociados al uso intensivo de fertilizantes y fortalecer la aplicabilidad de este modelo en la evaluación de impactos agroambientales.

5. Lista de abreviaciones, siglas o formulas

Lista de abreviaciones, siglas o formulas

Índice mitótico	IM	Aberraciones cromosómicas	AC
Estrés oxidativo	EO	Cromatina condensada	CC
Alteraciones cromosómicas	AC	Micronúcleos	MN
Hidrazida maléica	HM	Cromosomas rezagados	CRS
Etil-metano-sulfonato	EMS	Crecimiento radicular	CR
Profase	P	Dicromato de potasio	K ₂ Cr ₂ O ₇
Metafase	M	Nitrato de amonio	NH ₄ NO ₃
Anafase	A	Benzoato de sodio	NaC ₆ H ₅ CO

			O
Telofase	T	Bromuro de etidio	EtBr
Composta de bagazo de caña de azúcar	SCBC	Arsenito de sodio	NaAsO ₂
Vermicomposta	Vc	Sulfato amónico	(NH ₄) ₂ SO ₄
Composta de basura municipal	Cb	fertilizante compuesto comercial (N - Nitrógeno, P-Fósforo, K-Potasio)	NPK

Financiamiento

Este trabajo no recibió financiamiento para su elaboración.

Agradecimientos

Agradecemos al Secretaria de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (**SECIHTI**), por el apoyo otorgado a través del Becas de Consolidación por México 2025, Modalidad Académica (Registro: 19104). Expresamos también nuestro reconocimiento a la Universidad Autónoma de Guadalajara (**UAG**) y a la Universidad Autónoma de Baja California (**UABC**) por las facilidades brindadas y el respaldo institucional durante el desarrollo del posdoctorado.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no existe ningún conflicto de interés.

Consideraciones éticas

El trabajo no requiere autorización del comité de ética institucional.

Contribución de autores

OJKI, definición del objetivo, redacción del manuscrito y diseño de imágenes

RIML; revisión crítica del manuscrito

AGME; definición del objetivo, análisis de referencias y revisión crítica del manuscrito.

VSF, **VCPR** y **MRMI**; redacción del manuscrito

TBO; concepción, definición del objetivo, análisis de referencias, redacción y revisión del manuscrito.

Referencias

- Adeleke M.T.V, Go. Odlife E. E. (2019). Evaluation of the toxicity of urea using *Allium cepa* L. Assay. *Journal of Biology, Agriculture and Healthcare*, 9(4), 22–27. <https://doi.org/10.7176/JBAH/9-4-04>
- Alghofaili, F., Tombuloglu, H., Almessiere, M. A., Alsaeed, M., Tombuloglu, G., Akhtar, S., Baykal, A., Cetiz, M. V., & Turumtay, H. (2025). Growth-Promoting and genotoxic effect of a potential nano fertilizer (Magnesium Aluminum Oxide): A Double-Edged Sword. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. <https://doi.org/10.1007/s42729-025-02368-1>
- Ali, R. T., Abdel-Ghany, E. M., Mohamed, F. I., Hanna, E. M., & Elashery, Z. M. (2019). Usage of the cyto-genetics and cytology to identify the action mechanisms of two bio-fertilizers on *Allium cepa*. *Bulletin of the National Research Centre*, 43(1). <https://doi.org/10.1186/s42269-019-0171-1>
- Alias, C., Feretti, D., Viola, G. V. C., Zerbini, I., Bisceglie, F., Pelosi, G., Zani, C., Buschini, A., Carcelli, M., Rogolino, D., Restivo, F. M., & Degola, F. (2023). *Allium cepa* tests: A plant-based tool for the early evaluation of toxicity and genotoxicity of newly synthesized antifungal molecules. *Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 889.

- <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2023.503654>
- Alotaibi, M. K. (2022). Evaluation of cytotoxicity and genotoxicity of treated wastewater in Almadinah Almonawrah, Saudi Arabia using *Allium cepa* assay. *Pakistan Journal of Botany*, 54(1). [https://doi.org/10.30848/pjb2022-1\(16\)](https://doi.org/10.30848/pjb2022-1(16))
- Anacleto, L. R., Roberto, M. M., & Marin-Morales, M. A. (2017). Toxicological effects of the waste of the sugarcane industry, used as agricultural fertilizer, on the test system *Allium cepa*. *Chemosphere*, 173, 31–42. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.01.033>
- Anitha, R., & Mahalakshmi, K. (2013). Genotoxic effect of sea weed liquid fertilizer on *Allium cepa* L. *Applied Cell Biology*, 2(2), 93–96.
- Arara, K., Singh, N., Srivastava, S., & Srivastava, A. (2014). Evaluation of genotoxic risks due to temporal changes in soil urea: Using *Allium cepa* L. root tip bioassay. *Cytologia*, 79(1), 85–93. <https://doi.org/10.1508/cytologia.79.85>
- Barbério, A., Voltolini, J. C., & Mello, M. L. S. (2011). Standardization of bulb and root sample sizes for the *Allium cepa*. *Ecotoxicology*, 20(4), 927–935. <https://doi.org/10.1007/s10646-011-0602-8>
- Bijay-Singh, C. E. (2021). Fertilizers and nitrate pollution of surface and ground water: an increasingly pervasive global problem. In *SN Applied Sciences*, 3(4). <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04521-8>
- Bonciu, E., Firbas, P., Fontanetti, C. S., Wusheng, J., Karaismailoğlu, M. C., Liu, D., Menicucci, F., Pesnya, D. S., Popescu, A., Romanovsky, A. V., Schiff, S., Ślusarczyk, J., de Souza, C. P., Srivastava, A., Sutan, A., & Papini, A. (2018). An evaluation for the standardization of the *Allium cepa* test as cytotoxicity and genotoxicity assay. *Caryologia*, 71(3). <https://doi.org/10.1080/00087114.2018.1503496>
- Bonciu, E., Roşculete, E., Olaru, A. L., & Roşculete, C. A. (2018). Evaluation of the mitodepressive effect, chromosomal aberrations and nuclear abnormalities induced by urea fertilization in the meristematic tissues of *Allium cepa* L. *Caryologia*, 71(4), 350–356. <https://doi.org/10.1080/00087114.2018.1473918>
- Cabrera, G. L., Rodríguez, D. M. G., & Maruri, A. B. (1999). Genotoxicity of the extracts from the compost of the organic and the total municipal garbage using three plant bioassays. *Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 426(2), 201–206. [https://doi.org/10.1016/S0027-5107\(99\)00068-8](https://doi.org/10.1016/S0027-5107(99)00068-8)
- Casillas-Figueroa, F., Arellano-García, M. E., Leyva-Aguilera, C., Ruíz-Ruiz, B., Vázquez-Gómez, R. L., Radilla-Chávez, P., Chávez-Santoscoy, R. A., Pestryakov, A., Toledano-Magaña, Y., García-Ramos, J. C., & Bogdanchikova, N. (2020). ArgovitTM silver nanoparticles effects on *Allium cepa*: Plant growth promotion without cyto genotoxic damage. *Nanomaterials*, 10(7). <https://doi.org/10.3390/nano10071386>
- Datta, S., Singh, J., Singh, J., Singh, S., & Singh, S. (2018). Assessment of genotoxic effects of pesticide and vermicompost treated soil with *Allium cepa* test. *Sustainable Environment Research*, 28(4). <https://doi.org/10.1016/j.serj.2018.01.005>
- De Bastiani, V. I. M., Spies, M. R., Franco, J. L., Zaniol, F., Magro, J. D., Lucas, E. M., & dos Santos, T. G. (2024). Agro is not cool: DNA damage and oxidative stress in anurans evidencing the devastation of subtropical grasslands. *Aquatic Sciences*, 86(1). <https://doi.org/10.1007/s00027-023-01016-z>
- de Melo, E. C., da Silva Pinheiro, R., Costa, B. S., de Lima, R. M. T., Soares Dias, A. C., dos Santos, T. de J. A., do Nascimento, M. L. L. B., de Castro e Sousa, J. M., Islam, M. T., Cavalcante, A. A. de C. M., El-Nashar, H. A. S., El-Shazly, M., & de Oliveira Filho, J. W. G. (2024). *Allium cepa* as a Toxicogenetic Investigational Tool for Plant Extracts: A Systematic Review. *Chemistry & Biodiversity*. <https://doi.org/10.1002/cbdv.202401406>
- Dhankhar, N., & Kumar, J. (2023). Impact of increasing pesticides and fertilizers on human health: A review. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.766>
- Dutta, S., Mitra, M., Agarwal, P., Mahapatra, K., De, S., Sett, U., & Roy, S. (2018). Oxidative and genotoxic damages in plants in response to heavy metal stress and maintenance of genome stability. In *Plant Signaling and Behavior*, 13(8).

- <https://doi.org/10.1080/15592324.2018.1460048>
- El-Din, A. E., Abd-El-Samie, E. M., Faheem, H. B., Ibrahim, M. T., Ramzy, A., & Salama, M. S. (2009). Mutagenic effect of three nitrogenous fertilizers on *Drosophila melanogaster*. *Cytologia*, 74(2), 201–208. <https://doi.org/10.1508/cytologia.74.201>
- Fiskesjo, G. (1985). Allium test on river water from Braan and Saxan before and after closure of a chemical factory. *Ambio*, 14(2).
- Gong, Q., Chen, P., Shi, R., Gao, Y., Zheng, S. A., Xu, Y., Shao, C., & Zheng, X. (2019). Health assessment of trace metal concentrations in organic fertilizer in Northern China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(6). <https://doi.org/10.3390/ijerph16061031>
- Goujon, E., Sta, C., Trivella, A., Goupil, P., Richard, C., & Ledoigt, G. (2014). Genotoxicity of sulcotrione pesticide and photoproducts on *Allium cepa* root meristem. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 113(1), 47–54. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2014.06.002>
- Kanaya, N., Gill, B. S., Grover, I. S., Murin, A., Osiecka, R., Sandhu, S. S., & Andersson, H. C. (1994). Vicia faba chromosomal aberration assay. *Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 310(2), 231–247. [https://doi.org/10.1016/0027-5107\(94\)90116-3](https://doi.org/10.1016/0027-5107(94)90116-3)
- Leme, D. M., & Marin-Morales, M. A. (2008). Chromosome aberration and micronucleus frequencies in *Allium cepa* cells exposed to petroleum polluted water-A case study. *Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 650(1), 80–86. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2007.10.006>
- Leme, D. M., & Marin-Morales, M. A. (2009). Allium cepa test in environmental monitoring: A review on its application. *Reviews in Mutation Research*, 682(1). <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2009.06.002>
- Liu, L., Xu, W., Lu, X., Zhong, B., Guo, Y., Lu, X., Zhao, Y., He, W., Wang, S., Zhang, X., Liu, X., & Vitousek, P. (2022). Exploring global changes in agricultural ammonia emissions and their contribution to nitrogen deposition since 1980. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 119(14). <https://doi.org/10.1073/pnas.2121998119>
- Lomartire, S., Marques, J. C., & Gonçalves, A. M. M. (2021). Biomarkers based tools to assess environmental and chemical stressors in aquatic systems. *Ecological Indicators*, 122. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107207>
- Ma, T. H., Xu, Z., Xu, C., McConnell, H., Valtierra Rabago, E., Adriana Arreola, G., & Zhang, H. (1995). The improved Allium/Vicia root tip micronucleus assay for clastogenicity of environmental pollutants. *Environmental Mutagenesis and Related Subjects*, 334(2). [https://doi.org/10.1016/0165-1161\(95\)90010-1](https://doi.org/10.1016/0165-1161(95)90010-1)
- Madike, L. N., Takaidza, S., Ssemakalu, C., & Pillay, M. (2019). Genotoxicity of aqueous extracts of *Tulbaghia violacea* as determined through an *Allium cepa* assay. *South African Journal of Science*, 115. <https://doi.org/10.17159/sajs.2019/4391>
- Marefati, N., Ghorani, V., Shakeri, F., Boskabady, M., Kianian, F., Rezaee, R., & Boskabady, M. H. (2021). A review of anti-inflammatory, antioxidant, and immunomodulatory effects of *Allium cepa* and its main constituents. *Pharmaceutical Biology*, 59(1). <https://doi.org/10.1080/13880209.2021.1874028>
- Mikkelsen, R. L. (2007). Biuret En fertilizantes de urea. *Better Crops With Plant Food*, 9(3). <https://www.profertil.com.ar/wp-content/uploads/2020/08/biuret-en-fertilizantes-de-urea.pdf>
- Mohammed, K. P., Aarey, A., Tamkeen, S., & Jahan, P. (2015). Forskolin: Genotoxicity assessment in *Allium cepa*. *Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 777(1), 29–32. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2014.11.005>
- Moura, G. S., & Franzener, G. (2017). Biodiversity of nematodes biological indicators of soil quality in the agroecosystems. *Arquivos Do Instituto Biológico*, 84(0). <https://doi.org/10.1590/1808-1657000142015>
- Okorie Asita, A., Moramang, S., Rants'o, T., & Magama, S. (2017). Modulation of mutagen-induced genotoxicity by vitamin C and medicinal plants in *Allium cepa* L. *Caryologia*, 70(2). <https://doi.org/10.1080/00087114.2017.1311166>
- Ozakca, D. U., & Silah, H. (2013). Genotoxicity effects of flusilazole on the somatic cells of *Allium*

- cepa. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 107(1), 38–43. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2013.05.001>
- Paul, R., & Arjun, J. (2018). Evaluation of industrial effluent and domestic sewage genotoxicity using Allium cepa bioassay. *Bioscience Biotechnology Research Communications*, 11(3). <https://doi.org/10.21786/bbrc/11.3/19>
- Ping, K. Y., Darah, I., Yusuf, U. K., Yeng, C., & Sasidharan, S. (2012). Genotoxicity of euphorbia hirta: An allium cepa assay. *Molecules*, 17(7). <https://doi.org/10.3390/molecules17077782>
- Rahman, K. M. A., & Zhang, D. (2018). Effects of fertilizer broadcasting on the excessive use of inorganic fertilizers and environmental sustainability. *Sustainability*, 10(3). <https://doi.org/10.3390/su10030759>
- Remans, R., Villani, C., Jones, S., Smith, A., Laporte, M.-A., Carmona, N., Arnaud, E., Dulloo, E., & China, R. (2019). Measuring Agricultural Biodiversity for Sustainable Food Systems. *Biodiversity Information Science and Standards*, 3. <https://doi.org/10.3897/biss.3.46785>
- Ruiz-Ruiz, B., Torres-Bugarin, O., Zúñiga-Violante, E., Casillas-Figueroa, F., Luna-Vázquez-Gómez, R., Campos Gallegos, V., Ruiz-Arellano, A. E., & Arellano-García, M. E. (2023). Genomic instability and cytotoxicity evaluation of two communities exposed to pesticides in the Mexicali Valley by the L-CBMN Assay. *Toxics*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/toxics11100807>
- Sabeen, M., Mahmood, Q., Ahmad Bhatti, Z., Faridullah, Irshad, M., Bilal, M., Hayat, M. T., Irshad, U., Ali Akbar, T., Arslan, M., & Shahid, N. (2020). Allium cepa assay based comparative study of selected vegetables and chromosomal aberrations due to heavy metal accumulation. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 27(5), 1368–1374. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2019.12.011>
- Sankhla, M. S. (2018). Water Contamination through pesticide & their toxic effect on human health. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 6(1), 967–970. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2018.1146>
- Singh Rathore, H., Rathore, M., Panchal, S., Makwana, M., Sharma, A., & Shrivastava, S. (2010). Can genotoxic effect be model dependent in Allium test?-an evidence. *EnvironmentAsia*, 3(2).
- Sivaram, A. K., Logeshwaran, P., Abinandan, S., Mukunthan, K., & Megharaj, M. (2022). Cytogenotoxicity evaluation of pyrolytic acid using Allium cepa assay. *Journal of Environmental Science and Health*, 57(10), 852–857. <https://doi.org/10.1080/10934529.2022.2119741>
- Suciu, N. A., De Vivo, R., Rizzati, N., & Capri, E. (2022). Cd content in phosphate fertilizer: Which potential risk for the environment and human health?..*Current Opinion in Environmental Science and Health*, 30. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2022.100392>
- Teshika, J. D., Zakariyyah, A. M., Zaynab, T., Zengin, G., Rengasamy, K. R. R., Pandian, S. K., & Fawzi, M. M. (2019). Traditional and modern uses of onion bulb (Allium cepa L.): a systematic review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(1), 39–70. <https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1499074>
- Torres-Bugarín, O., Ramos-Ibarra, M. L., Ruiz-Bernés, S., Flores-García, A., & Zavala-Cerna, M. G. (2014). La prueba de micronúcleos: biomarcador de contaminación genotóxica, mutagénica y/o teratogénica. En V. Botello Alfonso (Ed.), *Pacífico mexicano, contaminación e impactos ambientales: Diagnóstico y tendencias* (pp. 819–848). UAC; UNAM-ICMYL.
- Torres-Bugarín, O., & Arias-Ruiz, L. F. (2023). Micronúcleos: Actualización del papel en la inestabilidad genética, inflamación, envejecimiento y cáncer. Revisión panorámica. *Revista Biomédica*, 34(2), 208–223. <https://doi.org/10.32776/revbiomed.v34i2.1101>
- Torres-Bugarín, O., Zavala-Cerna, M.G., Macriz-Romero N., Flores-García A., & Ramos-Ibarra, M.L. (2013). Procedimientos básicos de la prueba de micronúcleos y anomalías nucleares en células exfoliadas de mucosa oral. *El Residente*, 4–11. <http://new.medigraphic.com/cgi-bin/resumenMain.cgi?idarticulo=41887>
- Trivedi, A. K., & Ahmad, I. (2013). Genotoxicity of chrysotile asbestos on Allium cepa L. meristematic root tip cells. *Current Science*, 105(6), 781–786.
- Türkoğlu, Ş. (2007). Genotoxicity of five food preservatives tested on root tips of Allium cepa L. *Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 626(1–2), 4–14. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2006.07.006>
- Văşii, I. B. , D. E. , & T. M. (2016). Advances in biotechnology the cytotoxic effects induced by

- foliar fertilizer bionex at allium cepa l. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM, 1*, 799–806.
- Verma, S., Arora, K., & Srivastava, A. (2016). Monitoring of genotoxic risks of nitrogen fertilizers by Allium cepa L. mitosis bioassay. *Caryologia*, 69(4). <https://doi.org/10.1080/00087114.2016.1226540>
- Verma, S., & Srivastava, A. (2017). Cytomorphologic parameters in monitoring cytogenotoxic effects of fertilizer in Allium cepa L. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(4). <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5873-y>
- Verma, S., & Srivastava, A. (2018). Bioassessment of genotoxicity due to flux in soil nitrogen dynamics caused by addition of ammonium nitrate. *Cytologia*, 83(3), 271–275. <https://doi.org/10.1508/cytologia.83.271>