

Estudio sobre el efecto individual y las interacciones del cobre y de un detergente comercial sobre la germinación y crecimiento de radícula en semillas del árbol de Cachichin (*Oecopetalum mexicanum*)



Colaboración

Melissa Paola Gracia Anaya; José Guillermo Franzua Perdomo; Gabriel Grosskelwing Nuñez; Francisco Antonio Rodríguez Libreros; Arturo Cabrera Hernández, Tecnológico Nacional de México, campus Misantla

Fecha de recepción: 08 de abril de 2024

Fecha de aceptación: 16 de abril de 2024

RESUMEN: Se investigó el efecto individual y las interacciones del cobre y un detergente comercial sobre la germinación de semillas de cachichín (*Oecopetalum mexicanum*), una especie no convencional y recalcitrante de origen tropical. Se recolectaron semillas en Misantla, Veracruz, México y se sometieron a tratamientos con diferentes concentraciones de cobre y detergente. Se empleó un diseño factorial completo para analizar el porcentaje de germinación, longitud de radícula y del hipocótilo, y el peso de cada uno. Los resultados mostraron que el cobre incrementó significativamente la germinación hasta un 67% con 30 mg/L en ausencia de detergente, mientras que el detergente aumentó la germinación hasta un 40% con 2.5 ml/L. Sin embargo, la interacción entre ambos contaminantes resultó en una disminución de los efectos potenciadores individuales. Este estudio destaca la tolerancia de las semillas recalcitrantes de cachichín a niveles altos de cobre y sugiere un potencial uso de cobre como promotor de la germinación en semillas de comportamiento recalcitrante y parcialmente deshidratadas.

PALABRAS CLAVE: Germinación, Cobre, Detergente, Semillas recalcitrantes, Cachichín.

ABSTRACT: This study investigated the individual effect and interactions of copper and a commercial detergent on the germination of seeds of cachichín (*Oecopetalum mexicanum*), an unconventional and recalcitrant species of tropical origin. Seeds were collected in Misantla, Veracruz, and subjected to treatments with different concentrations of copper and detergent. A full factorial design was used to analyze germination percentage, radicle and hypocotyl length, and weight of each. The results showed that copper significantly increased germination up to 67% at 30 mg/L in the absence of detergent, while detergent increased germination up to 40% at 2.5 ml/L. However, the interaction between the two contaminants resulted in a decrease in the individual potentiating effects. This study highlights the tolerance of recalcitrant cachichín seeds to high levels of copper and suggests a potential use of copper as a germination enhancer in recalcitrant and partially dehydrated seeds.

KEYWORDS: Germination, Copper, Detergent, Recalcitrant seeds, Cachichín.

INTRODUCCIÓN

México destaca como un país megadiverso con geografías y climas variados. Se estima que México alberga del 10 al 12% de la biodiversidad global. Lo anterior implica una alta responsabilidad para registrar, caracterizar, comprender y preservar tales riquezas naturales, a fin de crear programas y políticas ambientales que promuevan la salud de los ecosistemas y permitan la explotación de su capital natural [1].

En el área montañosa central del estado de Veracruz, México crece de forma silvestre el árbol de Cachichín (*O. mexicanum*) en ecotonos de bosque caducifolio y selva alta perennifolia. Este árbol produce un fruto pequeño y de forma ovalada envuelta en una cáscara gruesa y dura, la cual resguarda en su interior una almendra. Ha sido denominada especie cultural clave por su importante papel ecológico, nutricional, social y económico en las áreas donde está presente. [2]. De este árbol se aprovecha su madera, así como su fruto, el cual se consume de forma hervida o tostada y es ampliamente apreciado por su particular sabor amargo [3]. Los estudios iniciales sobre la germinación de esta semilla en tierra y papel húmedo, ha mostrado bajos porcentajes de germinación, asociados a su particular susceptibilidad frente a la desecación, por ello se ha sugerido que presenta ciertas características asociadas a las semillas recalcitrantes, lo cual dificulta su conservación y propagación [4].

Las semillas de cachichín alcanzan la maduración en los meses de febrero a mayo, desprendiéndose del árbol por dispersión biobalística. El embrión de esta semilla recién desprendida está diferenciado, observándose las estructuras completamente desarrolladas características de un embrión maduro. Evidencias previas sugieren que la semilla de cachichín presenta una germinación epigea con características que la clasifican como semilla recalcitrante; tales como el tamaño grande de la semilla, la ubicación del árbol asociada a selva alta subperennifolia, la correlación existente entre la pérdida de humedad durante la deshidratación y la pérdida de viabilidad de la semilla, así como la coincidencia entre el tiempo de diseminación de la semilla y la época de lluvias del año [4]. Las semillas recalcitrantes suelen germinar rápidamente, lo que les permite evitar condiciones ambientales desfavorables como se reportó previamente para la semilla de cachichín [4].

Al igual que otras especies tropicales, el árbol de cachichín enfrenta severos retos debido a la contaminación de su medio ambiente asociados a actividades antropogénicas, industriales y por desastres naturales, lo cual puede modificar el delicado equilibrio que existe en su hábitat. Se estima que un amplio porcentaje de los bosques y selvas de climas tropicales son los hábitats más amenazados en el mundo, comprometiendo la calidad del suelo, agua y aire [5].

En el suelo, diferentes contaminantes orgánicos e inorgánicos han sido detectados en estos ecosistemas producto de procesos naturales y de actividades antropogénicas, tales como los metales pesados y los detergentes [6]. Los metales pesados (MP) son contaminantes que generan gran preocupación debido a su bioacumulación, persistencia y nula degradación en el suelo [7-8]. El cobre es un MP que presenta una

función dual ya que, aunque es esencial para el crecimiento y desarrollo de las plantas y juega un papel importante en muchos procesos fisiológicos, es tóxico en altas concentraciones por sus características de generador de radicales libres [9].

Otro contaminante químico, los detergentes, son comúnmente empleados para la limpieza doméstica e industrial, así como para el cuidado personal entre otras aplicaciones, están compuestos de una mezcla de moléculas orgánicas complejas con características tensoactivas mejorados con una serie de aditivos que facilitan la ruptura de la grasa y ayudan a dispersarla en el agua. Entre los tensoactivos sintéticos sobresalen las sales de ácidos sulfónicos, sales cuaternarias de amonio, o surfactantes no iónicos o Zwitteriónicos que modifican las fuerzas de superficie o atracción existentes entre moléculas de la interfase en la zona de contacto y provoca el efecto de detergencia [10].

Sin embargo, el uso masivo de los detergentes promueve que grandes cantidades de estos se incorporen y afecten la calidad y salud de los ecosistemas a través de las aguas residuales. Diversos estudios han demostrado que la presencia de estos detergentes provoca un impacto negativo en la calidad del agua empleada en la germinación de semillas convencionales y silvestres, así como disminución en variables morfométricas de las plántulas emergentes [11-12].

El conocimiento actual sobre el efecto de cobre y detergentes en el proceso de germinación se ha enfocado empleando modelos de estudio de semillas comerciales convencionales, sin embargo, se requieren estudios sobre semillas comestibles de origen tropical y consumo local [13].

Por lo anterior en el presente trabajo se propone estudiar los efectos toxicológicos individuales de soluciones de cobre ó de detergente así como los efectos de interacción de ambos contaminantes, sobre la germinación, crecimiento y peso de la plántula del cachichín, una semilla comestible no convencional y de origen tropical. Determinar la susceptibilidad que las interacciones de ambos contaminantes podrían causar en la plántula es una manera más cercana a la realidad para evaluar sus efectos toxicológicos y así contribuir a establecer programas de propagación y conservación [13-15] ya que la interacción de ambos contaminantes en el suelo y las aguas residuales puede llevar a efectos sinérgicos de ambos contaminantes, exacerbando su toxicidad [16].

MATERIAL Y MÉTODOS

Reactivos y material biológico

Las semillas de cachichín (*O. mexicanum*), fueron recolectadas en la localidad de Pueblo Viejo (22°11'0" N, 97°50'0" W), perteneciente al municipio de Misantla,

Veracruz, México, en el mes de marzo del 2023. Posterior a su recolección, las semillas se secaron en el Laboratorio de Investigación Avanzada de Veracruz (LIAV) dentro de las instalaciones del Instituto Tecnológico Superior de Misantla, bajo condiciones de temperatura y humedad ambiente por un periodo de cuatro semanas alcanzando una humedad residual del 13%. Al final del periodo de secado las semillas disminuyeron su peso y su cubierta presentó un color café característico.

Como fuente de cobre se empleó Sulfato de Cobre Pentahidratado $[CuSO_4 \cdot 5H_2O]$ marca Meyer y número de lote M0313101. El detergente empleado fue un detergente comercial líquido lavatrastes de marca líder, cuya composición reportada en la hoja de servicio indica agua, Alquil Sulfonato de Sodio 10%, C12 - 14 alcohol EO 10%, alquil sulfonato de magnesio 10%, óxidos de amina 10%, Alquil Sulfonato de Trietanolamina 10%, Etanol, perfume, EDTA Tetrasódico, colorantes, preservantes. El valor de pH oscila entre 7.5 y 8.5.

Técnica de germinación de semillas en papel húmedo

A fin de germinar las semillas de forma directa, rápida, fácil y económica se implementó la técnica de germinación de semillas en papel húmedo [17-18] empleando papel filtro Whatman grado 5 como soporte.

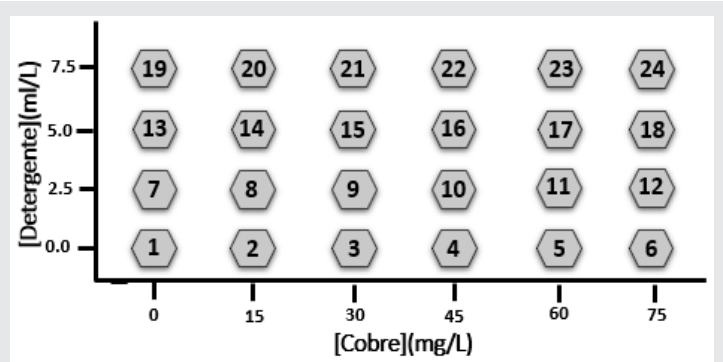


Figura 1: Enumeración de los tratamientos de sulfato de cobre y detergente en la germinación de semilla de Cachichín. Se asignaron los tratamientos 2, 3, 4, 5, 6, para efectos individuales de cobre, tratamientos 7, 13 y 19 para efectos individuales de detergente y los restantes para los tratamientos que involucran interacciones. En el tratamiento 1 solo se aplico agua (control negativo).

Fuente: Elaboración propia.

En este método, 16 semillas son distribuidas especialmente sobre discos de papel filtro dentro de un contenedor plástico transparente con geometría cilíndrica y dimensiones 13 cm de diámetro y 18 cm de altura acondicionados como cámaras de germinación. Los discos de papel filtros fueron humedecidas con las soluciones de cada uno de los 24 tratamientos, en análisis por triplicado.

Los contenedores fueron incubados por 3 semanas bajo condiciones ambiente de humedad, temperatura e iluminación dentro del laboratorio en las instalaciones del Instituto Tecnológico Superior de Misantla, Veracruz, México, durante el mes de mayo del 2023. Dos mililitros de agua natural marca "Bonafont" estéril por contenedor fueron adicionados cada semana para compensar las pérdidas por evaporación.

Diariamente se realizó una inspección visual para revisar la aparición de la radícula, la cual es el criterio para determinar si una semilla germinó. Al día 22 posterior a la siembra, aquellas semillas que germinaron fueron documentadas fotográficamente, se les extrajo el embrión y se midió la longitud de la radícula y la longitud del hipocótilo, además con ayuda de una navaja, se cortó el embrión germinado en dos partes, separando la radícula del resto del embrión y se pesaron ambas secciones. Del embrión se determinó el área y peso de cotiledones.

Diseño experimental

Se realizó el estudio utilizando el diseño factorial completo [19] a fin de analizar las variables de entrada: concentración de cobre y concentración de detergente y las variables de salida: el porcentaje de germinación, la longitud de la radícula y del hipocótilo, así como el peso cada uno de ellos. Además se determinó el área y peso de cotiledón. Para la concentración de cobre se establecieron seis niveles 0 mg/L, 15 mg/L, 30 mg/L, 45 mg/L, 60 mg/L, 75 mg/L y para la concentración de detergente se establecieron cuatro niveles: 0 ml/L, 2.5 ml/L, 5 ml/L y 7.5 ml/L. Las interacciones de los cinco niveles de cobre y detergente en solución acuosa, dieron lugar a 24 tratamientos los cuales se presentan en la Figura 1. A cada tratamiento se le asignó un número clave para facilitar su manejo en las diferentes secciones de este artículo.

Obtención de embriones

A fin de observar en detalle la germinación de cada semilla, los embriones completos germinados o sin germinar fueron extraídos. La corteza de la semilla de cachichín fue removida mecánicamente con ayuda de una pinza para nueces, la almendra liberada presenta una forma cuneiforme, la cual se sujetó manualmente y se realizó un corte de manera axial en la base mayor en de la semilla con una profundidad de 3 mm., removiendo este segmento. Posteriormente, se hizo una incisión longitudinal a la semilla de 3 mm de profundidad y con la ayuda de unas pinzas se abrió la almendra para descubrir el embrión. Cuidadosamente y con ayuda de unas pinzas para disección, se retiró y colocó el embrión en un recipiente con agua, como se muestra en la Figura 1C. Cada embrión fue caracterizado gravimétricamente y morfológicamente.



Figura 2: Extracción y morfología de la semilla de cachichín germinada. Panel A: Exhibe la semilla en su estado inicial de germinación, donde el tegumento (cáscara exterior de la semilla) aún envuelve completamente al embrión. En esta fase, la radícula ha comenzado a emerger, iniciando el proceso de germinación. Panel B: Presenta la semilla con el tegumento removido, lo que permite observar claramente la expansión de la radícula. Panel C: muestra el embrión con la radícula, hipocótilo y cotiledones claramente visibles. Además, se puede ver el comienzo de la diferenciación de la plúmula, la parte del embrión que eventualmente se desarrollará en el tallo y las hojas de la planta. Fuente: Elaboración propia.

Análisis estadístico de datos

Los datos de las variables de salida de los 24 tratamientos fueron registrados empleando el programa Excel 2016. Se filtró los datos atípicos y mediante la aplicación de las pruebas de Shapiro-Wilk y Levene se comprobó que los datos siguen una distribución normal y que las varianzas fueran homogéneas. Para los datos sobre la variable porcentaje de germinación se aplicó la transformación arco-seno a fin de promover que la varianza sea mas constante y aparezcan distribuidos normalmente.

Para las variables restantes, dado que los datos no presentaron un comportamiento normal, se aplicó un análisis estadístico tipo no-paramétrico empleando el análisis tipo AMOVA para diferencia de medianas ($p < 0.05$) para determinar si se presentaron diferencias entre el grupo de control y al menos una de las concentraciones aplicadas y como prueba post-hoc se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para identificar la significancia entre las medianas de cada una de las variables de respuesta.

RESULTADOS

Germinación y crecimiento de radícula en semillas del árbol de cachichín (*O. mexicanum*)

Las Figuras 1 y 2 presentan el curso de tiempo del desarrollo del embrión durante el proceso de germinación en el tratamiento control. En la Figura 1 se observa un crecimiento de la raíz mientras que no hay crecimiento en el hipocótilo del embrión. Este retraso en el crecimiento del hipocótilo se mantiene hasta el día 12 +/- 2 días, comportamiento similar al reportado previamente en otras semillas recalcitrantes que presentan latencia fisiológica del epicotilo, tales como *B. coccínea*, *H. laurifolia*, *Q. alba*, *Q. prinus* y *Q. ilicifolia*, donde hay una etapa de latencia en el crecimiento de la plúmula o epicotilo, tras la aparición de la radícula [20] y se ha sugerido que responde a cubrir la necesidad de

asegurar un suministro constante de agua a la plántula en desarrollo y les permitan escapar de depredadores [18].

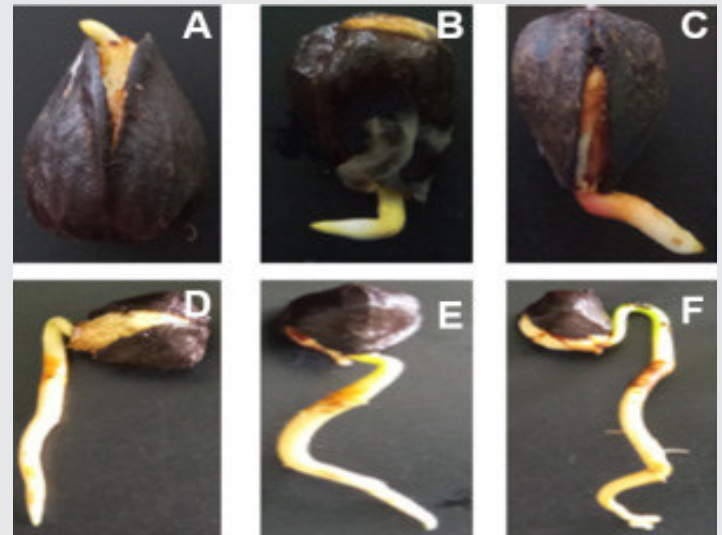


Figura 3: Emergencia de la radícula en la semilla de cachichín germinada. Panel A: Se observa la emergencia de la radícula a través de una fisura en el tegumento. Este proceso indica el comienzo de la germinación. Panel B y C: muestra la semilla durante una fase temprana de germinación con la radícula emergiendo, Panel D: presenta la semilla con un desarrollo considerable de la radícula y el inicio del crecimiento del hipocótilo, ambos con una pigmentación que sugiere un crecimiento saludable. Panel E: ilustra una semilla con una radícula muy alargada y un hipocótilo curvado, lo cual puede ser un indicativo de la búsqueda de agua o sustrato. Panel F: muestra una radícula extremadamente alargada y una plúmula que comienza a mostrar un crecimiento en espiral. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 2 se observan diferentes ventanas de tiempo durante el desarrollo de la plántula en el tratamiento control. En el panel A, B, C y D se observa solo el crecimiento de la raíz y no se presenta crecimiento en el hipocótilo, mientras que en el panel E y F se observa el crecimiento inicial del hipocótilo.

Se ha reportado que las semillas de la mayoría de las especies con un embrión completamente formado, latencia fisiológica en el epicotilo y emergencia temprana de la raíz, son recalcitrantes. lo cual se ha propuesto como una estrategia para mantener la viabilidad de la semilla [21]

Efecto individual de cobre en la germinación de semillas de cachichín

La germinación de semillas deshidratadas de cachichín exhiben bajos porcentajes de germinación en el tratamiento control debido a su naturaleza recalcitrante. En la Figura 4 se observan que los porcentajes de germinación en agua alcanzaron el 12% (tratamiento 1), sin embargo, la adición de cobre promovió un notable aumento en la capacidad de germinación, con una mejora significativa en el porcentaje de germinación, alcanzando un pico del 67% con una concentración de cobre de 30 mg/L, en ausencia de deter-

gente. Este incremento se observó en todas las concentraciones evaluadas con porcentajes que alcanzan valores del 30%.

Actualmente la germinación de semillas recalcitrantes es difícil y se han reportado sólo algunos métodos para incrementar el porcentaje de germinación en estas [22], por ejemplo, aplicando nano burbujas de oxígeno ricas en potasio se aceleró significativamente

la germinación acumulada de una semilla recalcitrante envejecida (*Eutrema japonicum*), involucrando mecanismos de formación de especies reactivas de oxígeno, iones radicales y un suministro constante de oxígeno.

El incremento del porcentaje de germinación de una semilla con características recalcitrantes asociado a la presencia de cobre, sentaría un precedente para el uso de este metal como potenciador de la germinación en semillas de cachichín parcialmente deshidratadas a concentraciones relativamente altas.

Además, las concentraciones aplicadas son similares a las observadas para plantas que crecen en suelos contaminados con cobre, lo cual sugiere que la semilla de cachichín deshidratada es tolerante a estos niveles de cobre [23]. Estudios previos en gran cantidad de semillas han demostrado efectos fitotóxicos durante la germinación y el desarrollo de plántulas a bajas concentraciones de cobre dado su alta actividad redox. En nuestro caso, los altos niveles de cobre tolerados sugieren que el cobre no obstaculiza la germinación de semillas de cachichín y además podría desempeñar un papel en la activación de mecanismos de respuesta al estrés hídrico que impide la germinación de esta semilla [24].

Algunas especies o poblaciones tolerantes y muestran poca inhibición o daño, incluso si crecen en un ambiente severamente contaminado y acumulan altas concentraciones de cobre en sus tejidos. Por ejemplo, para el chícharo o guisante (*Pisum sativum*) no se reporta efectos del cobre en el porcentaje de germinación a concentraciones similares al del presente estudio [25] una situación similar se reportó para la col (*Brassica pekinensis* Rupr) [26]. La germinación de semillas de cachichín no es sensible al estrés por cobre.

Efecto individual de detergente en la germinación de semillas de cachichín

La aplicación del detergente a las semillas de cachichín durante la germinación también potenció el porcentaje de germinación alcanzando un 40% de germinación a una concentración de 2.5 ml/L. A concentraciones mayores se alcanzó un porcentaje de germinación del 30% (Figura 4). Estos resultados podrían reflejar una acción dual del detergente; a concentraciones bajas no inhibe completamente la germinación y podría estar implicado en la modulación de la disponibilidad de nutrientes o en la alteración de la estructura de las membranas de una ma-

nera que no es totalmente adversa para la germinación de la semilla, mientras que al incrementar su concentración se manifiestan los efectos fitotóxicos asociados a los detergentes al alterar la tensión superficial del agua y de las membranas celulares, desestabilizando la integridad de estas y alterando la permeabilidad y el intercambio de nutrientes y agua así como la dinámica osmótica esencial para la activación de la germinación [27].

El efecto potenciador del detergente a bajas concentraciones sobre semillas de cachichín parcialmente deshidratadas y con características recalcitrantes sugiere profundizar en este modelo a fin de establecer su potencial uso en la germinación de este tipo de semillas.

Efecto de las interacciones de cobre y detergente en la germinación de semillas de cachichín

La interacción entre los iones de cobre y los compuestos del detergente resultó en una disminución de los efectos potenciadores individuales durante la germinación de semillas de cachichín. Los valores del porcentaje de germinación disminuyeron paulatinamente a los valores obtenidos de germinación en agua cuando ambos contaminantes alcanzaron los valores más altos de concentración aplicados en este estudio (Figura 4).

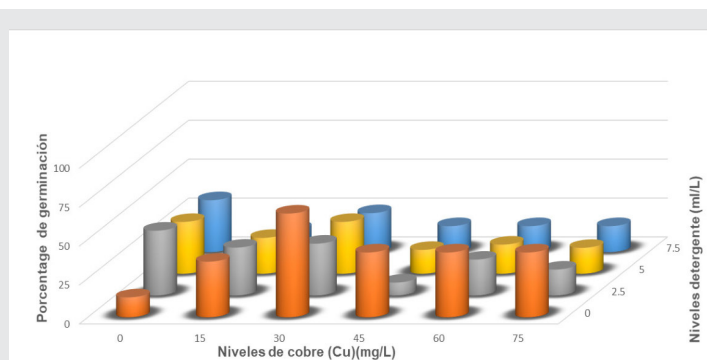


Figura 4. Porcentaje acumulado de germinación final en semillas de Cachichín expuestas a concentraciones variables de cobre, detergente y la combinación de ambos contaminantes. Fuente: Elaboración propia.

La falta de sinergia por la presencia de ambos contaminantes, sugiere mecanismos adversos para la germinación de esta semilla y en vez de actuar como facilitadores, podrían estar alterando la homeostasis iónica, aunque se desconocen los mecanismos involucrados durante las interacciones de ambos contaminantes. Por otra parte, la alta tolerancia durante el proceso de germinación de esta semilla a cobre y detergente, subrayan la necesidad de una evaluación más profunda del impacto de los contaminantes ambientales en la germinación de esta semilla de tipo recalcitrante, por su potencial uso para estudios de fitorremediación, además, por su carácter comestible, es importante determinar la potencial acumulación de este metal ya que podría bioacumularse y ser transferido a los consumidores [26]. Es necesario futuras investigaciones sobre esta resistencia para definir estrategias de manejo de cultivos de cachichín.

Efectos individuales del cobre, detergente y sus interacciones sobre el crecimiento de la radícula

Las series de gráficas de violín de los efectos individuales de cobre Figura 5, detergente Figura 6 así como las gráficas de contorno para las interacciones cobre/detergente Figura 7, ofrecen una visión integral del crecimiento inicial de plántulas de cachichín a diferentes concentraciones de cobre y detergente. Los datos indican una tendencia general de variación no significativa para las variables de respuesta de longitud de tallo, peso de tallo, peso de raíz y peso de cotiledón.

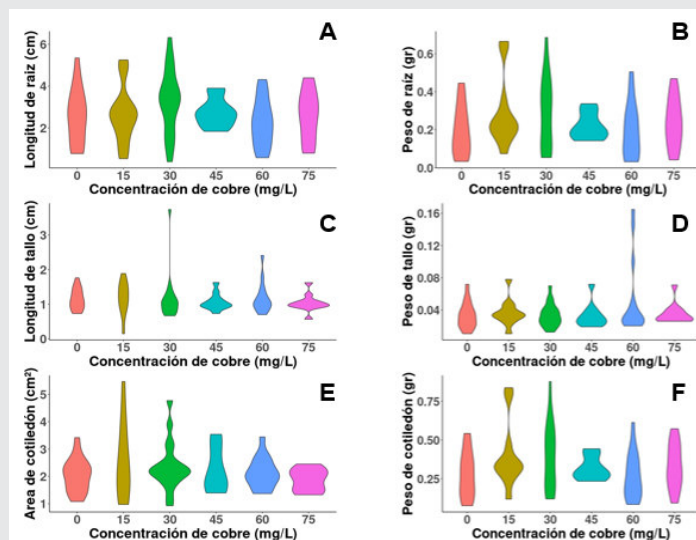


Figura 5. Efectos individuales del cobre sin detergente sobre longitud de raíz (A), peso de raíz (B), longitud de tallo (C), peso de tallo (D), área de cotiledón (E) y peso de cotiledón (F). Fuente: Elaboración propia.

Se reportan diferencias significativas en la longitud de tallo y área de cotiledón ($p < 0.05$), con respecto a las concentraciones de ambos contaminantes.

Con respecto a la longitud de tallo se observa una disminución al incrementarse las concentraciones de cobre o detergente, así como una sinergia del efecto negativo en presencia de ambos contaminantes. Diversos estudios han demostrado que los efectos principales de un exceso de cobre o de detergente en el crecimiento de diversas especies está dirigido al crecimiento de raíces y brotes, teniendo como consecuencia una menor exploración del suelo por parte de las raíces [24]. Para el crecimiento de la raíz principal del cachichín, la presencia de cobre o detergente disminuyó la longitud promedio mientras que la presencia de ambos contaminantes tuvo efectos sinérgicos y disminuyó la longitud de raíz de 3.25 a 2.25 cm.

En contraste, para la variable de salida peso de raíz, aunque con una tendencia similar esta no fue significativa ($p < 0.05$).

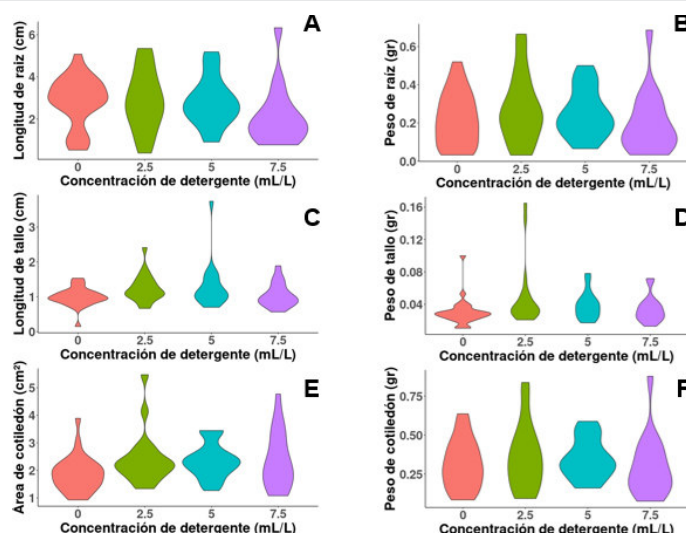


Figura 6. Efectos individuales del detergente sobre longitud de raíz (A), peso de raíz (B), longitud de tallo (C), peso de tallo (D), área de cotiledón (E) y peso de cotiledón (F). Fuente: Elaboración propia.

El área de cotiledón también mostró diferencias significativas ($p < 0.05$) en presencia de cobre y/o detergente, observándose un incremento en sus valores al incrementar la concentración de detergente y una disminución al incrementarse los valores de cobre. Al interactuar ambos contaminantes se observa que el efecto del cobre es atenuado por la presencia del detergente, lo que permite obtener valores tan altos como los alcanzados por el detergente solo. No se observaron diferencias significativas ($p < 0.05$) para el peso del cotiledón. La disminución en el área de cotiledón y el peso de la raíz sugiere una interferencia en la capacidad de la plántula para almacenar y movilizar recursos durante etapas críticas de desarrollo, lo que puede tener consecuencias a largo plazo en la supervivencia y la competencia de la planta en su hábitat natural. Además, la reducción en la longitud de la raíz podría tener implicaciones para la absorción de agua y nutrientes, la interacción con la microflora del suelo y la estabilidad física de la planta.

La falta de efectos significativos sobre el crecimiento de los brotes de la semilla de cachichín a concentraciones que en otras especies comprometen el crecimiento de la planta sugiere un alto potencial de tolerancia de esta especie frente a ambos contaminantes, lo cual permite proponer esta especie como candidata potencial para estudios de fitorremediación.

CONCLUSIONES

El presente estudio demuestra que las semillas recalcitrantes de cachichín (*O. mexicanum*) presentan una tolerancia notable a altas concentraciones de cobre, lo que resulta en un incremento significativo en la germinación. Sin embargo, la interacción entre el cobre y

el detergente disminuye los efectos promotores individuales sobre la germinación. Los hallazgos sugieren que el cobre podría utilizarse como potenciador de la germinación en semillas de cachichín parcialmente deshidratadas con bajos porcentajes de germinación, aunque es necesario investigar más sobre los mecanismos involucrados y la seguridad alimentaria debido a la posible bioacumulación de metales pesados. Este estudio contribuye al entendimiento del impacto de los contaminantes ambientales en la germinación de semillas recalcitrantes y subraya la importancia de desarrollar estrategias de manejo y conservación para especies no convencionales en ecosistemas tropicales.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Consejo Nacional de humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo económico otorgado a la estudiante Melissa Paola Gracia Anaya 1274663 para la realización de la presente investigación.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Gobierno de México (2018). *México Megadiverso*. Consultado el 16 de febrero del 2024, página de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas: <https://www.gob.mx/conanp/articulos/mexico-megadiverso-173682>.

[2] Lascurain, M., Lopez-Binnquist, C., & López, J. C. (2018). El árbol de cachichín (*Oecopetalum mexicanum*) una especie cultural clave de Veracruz, México. In *De la recolección a los agroecosistemas. Soberanía alimentaria y conservación de la biodiversidad*. Xalapa: Universidad Veracruzana. <https://doi.org/10.25009/uv.2075.513>.

[3] Lascurain-Rangel, M., Avendaño-Reyes, S., López-Binnquist, C., López-Acosta, J. C., Covarrubias-Báez, M., & Duno de Stefano, R. (2013). Uso y flora leñosa asociada a *Oecopetalum mexicanum* (Icacinaceae): Una especie comestible nativa de la Sierra de Misantla, Veracruz, México. *Botanical Sciences*, 91(4), 477–484. <https://doi.org/10.17129/botsci.424>

[4] Franzua-Perdomo J.G., Gracia-Anaya M.P., Grosskelwing-Nuñez G, Cabrera-Vazquez A., Cabrera-Hernandez A. (2024). Estudio sobre la germinación y crecimiento de plántula de semillas del árbol de cachichín (*Oecopetalum mexicanum*). [Manuscrito presentado para su publicación].

[5] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2020). *El estado de los bosques del mundo 2020. Los bosques, la biodiversidad y las personas*. Roma. <https://doi.org/10.4060/ca8642es>.

[6] Singh, B.R., & Steinnes, E. (2020). Soil and Water Contamination by Heavy Metals. In *Soil Processes and*

Water Quality (pp. 233–271). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003070184-6>.

[7] El-Meihy, R. M., Abou-Aly, H. E., Youssef, A. M., Tewfike, T. A., & El-Alkshar, E. A. (2019). Efficiency of heavy metals-tolerant plant growth promoting bacteria for alleviating heavy metals toxicity on sorghum. *Environmental and Experimental Botany*, 162, 295–301. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2019.03.005>.

[8] Vicepresidencia tercera del Gobierno (n.d.). *Metales pesados*. Consultado el 19 de febrero del 2024, página del Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, Madrid, España. https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/metales_pesados.html.

[9] Jin, M. -F., You, M. -X., Lan, Q. -Q., Cai, L. -Y., & Lin, M. -Z. (2021). Effect of copper on the photosynthesis and growth of *Eichhornia crassipes*. *Plant Biology*, 23(5), 777–784. <https://doi.org/10.1111/plb.13281>.

[10] Sudheshna, A. A., & Srivastava, M. (2022). Laundry Detergents: A Potential Resource of Pollution and Overutilisation. *London Journal Of Research In Science: Natural And Formal*, 22(7), 15–23.

[11] Alarcón, C., Grosskelwing, G., Vicencio, E., & Cabrera, A. (2023). Efecto fitotóxico de productos de limpieza comerciales sobre la germinación y crecimiento inicial de *Melotria scabra* (sandía de ratón). *Ingeniantes* 6, 17–23..

[12] Hernández-Baranda, Y., Echevarría-Machado, I., Rodríguez-Hernández, P., & Estrada-Medina, H. (2023). Effect of detergents on the germination and initial growth of habanero pepper (*Capsicum chinense* Jacq.) plants. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 17(3). <https://doi.org/10.17584/rcch.2023v17i3.16577>.

[13] Visscher, A. M., Vandeloos, F., Fernández-Pascual, E., Pérez-Martínez, L. V., Ulian, T., Diazgranados, M., & Mattana, E. (2022). Low availability of functional seed trait data from the tropics could negatively affect global macroecological studies, predictive models and plant conservation. *Annals of Botany*, 130(6), 773–784. <https://doi.org/10.1093/aob/mcac130>.

[14] Heidari, H., & Kahrizi, D. (2018). Effect of water stress and contaminated water on seed germination traits and early growth in maize (*Zea mays*). *Environmental Engineering and Management Journal*, 17(1), 35–42. <https://doi.org/10.30638/eemj.2018.005>.

[15] Kominko, H., Gorazda, K., & Wzorek, Z. (2022). Effect of sewage sludge-based fertilizers on biomass growth and heavy metal accumulation in plants. *Jour-*

nal of Environmental Management, 305, 114417. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114417>.

[16] Priya, M., & Shankar, S. (2020). Effect of Heavy Metals on Growth and Development of Cultivated Plants with Reference to Cadmium, Chromium and Lead -A Review. Effect of Heavy Metals on Growth and Development. Original Text Journal of Stress Physiology & Biochemistry, 16(3), 84-102. <https://cyberleninka.ru/article/n/effect-of-heavy-metals-on-growth-and-development-of-cultivated-plants-with-reference-to-cadmium-chromium-and-lead-a-review/viewer>.

[17] Yang, G., Yang, L., Wang, Y., & Shen, S. (2017). Physiological epicotyl dormancy and its alleviation in seeds of *Yunnanopilia longistaminea*: the first report of physiological epicotyl dormancy in China. PeerJ, 5, e3435. <https://doi.org/10.7717/peerj.3435>.

[18] Pammenter, N. W., & Berjak, P. (2000). Evolutionary and ecological aspects of recalcitrant seed biology. Seed Science Research, 10(3), 301-306. <https://doi.org/10.1017/S0960258500000349>.

[19] Masomi, S. H., Imani, A., Seyfzade, S., & Zakerin, H. R. (2023). Effect of drought-induced stress by PEG6000 on physiological and morphological traits of chickpea (*Cicer arietinum* L.) seed germination in order to assortment of drought tolerant cultivars. Journal of Plant Process and Function, 11(52), 1-12. <https://jispp.iut.ac.ir/article-1-1647-fa.html>.

[20] Shen, S.-K., Wang, Y.-H., & Ma, H.-Y. (2010). Seed germination requirements and responses to desiccation and storage of *Apterosperma oblata* (Theaceae), an endangered tree from south-eastern China: implications for restoration. Plant Species Biology, 25(2), 158-163. <https://doi.org/10.1111/j.1442-1984.2010.00278.x>.

[21] Jayasuriya, K. M. G. G., Wijetunga, A. S. T. B., Baskin, J. M., & Baskin, C. C. (2012). Physiological epicotyl dormancy and recalcitrant storage behaviour in seeds of two tropical Fabaceae (subfamily Caesalpinioideae) species. AoB Plants, 2012(0), pls044-pls044. <https://doi.org/10.1093/aobpla/pls044>

[22] Kim, M., Shoji, A., Kobayashi, T., Shirai, Y., Sugawara, S., & Takahashi, M. (2023). Accelerated germination of aged recalcitrant seeds by K⁺-rich bulk oxygen nanobubbles. Scientific Reports, 13(1), 3301. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30343-2>.

[23] Besrukow, P., Will, F., Dussling, S., Berkelmann-Löhnertz, B., & Schweiggert, R. (2023). Additive and synergistic antifungal effects of copper and phenolic extracts from grape cane and apples. Pest Management Science, 79(9), 3334-3341. <https://doi.org/10.1002/ps.7519>.

[24] Torre, A. L., Iovino, V., & Caradonia, F. (2018). Copper in plant protection: current situation and prospects. Phytopathologia Mediterranea, 57(2), 201-236. https://doi.org/10.14601/Phytopathol_Mediterr-23407.

[25] Kunjam, M., Govada, H., Mididoddi, N., & Kota, R. S. (2015). Studies on selected heavy metals on seed germination and plant growth in pea plant (*Pisum sativum*) grown in solid medium. Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry, 3(5), 85-87.

[26] Xiong, Z.-T., & Wang, H. (2005). Copper toxicity and bioaccumulation in Chinese cabbage (*Brassica pekinensis* Rupr.). Environmental Toxicology, 20(2), 188-194. <https://doi.org/10.1002/tox.20094>.

[27] Hassouna, M., Aboshosha, S., Soliman, S., & Al-Dahmashi, M. (2007). Effect of detergent -polluted water on the health of tomato plants. Journal of Plant Production, 32(10), 8193-8204. <https://doi.org/10.21608/jpp.2007.220896>.

ANEXOS:

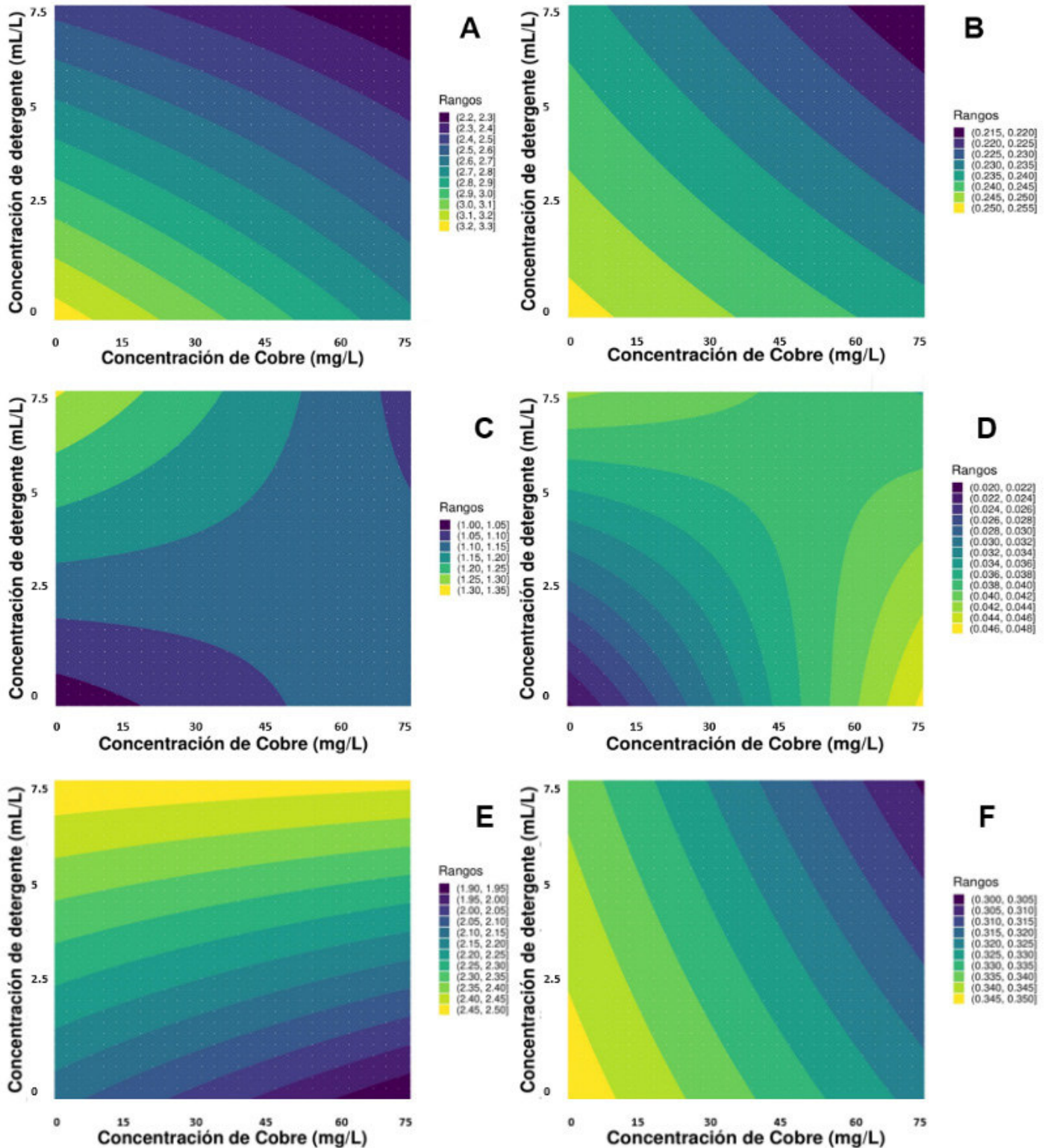


Figura 7. Gráficos de contorno para los efectos de las interacciones del cobre y un detergente comercial sobre longitud de raíz (A), peso de raíz (B), longitud de tallo (C), peso de tallo (D), área de cotiledón (E) y peso de cotiledón (F).