

Aplicación de un Diseño de Mezclas para Evaluar Altas Concentraciones de Ni^{2+} , Fe^{2+} , Zn^{2+} y Mn^{2+} en Soluciones Nutritivas en la Composición Mineral y el Rendimiento de Tomate

Application of a mixture Design to Evaluate High Concentrations of Ni^{2+} , Fe^{2+} , Zn^{2+} and Mn^{2+} in Nutrient Solutions on the Mineral Composition and the Tomato Yield

Saúl Parra-Terraza^{1*}, Carlos Fabián López-Rodas¹, Azareel Angulo-Castro¹,
Jacobó Enrique Cruz-Ortega¹ y Pablo Preciado-Rangel²

¹ Universidad Autónoma de Sinaloa. Facultad de Agronomía. Carretera Culiacán-Eldorado km 17.5, Campo El Diez. 80398 Culiacán, Sinaloa, México; (S.P.T.), (C. F. L. R.), (A.A.C.), (J.E.C.O.).

* Autor para correspondencia: saul.parra@uas.edu.mx

² Tecnológico Nacional de México. Instituto Tecnológico de Torreón. Carretera Torreón - San Pedro km 7.5, Colonia Ana. 22170 Torreón, Coahuila, México; (P.P.R.).

RESUMEN

La producción intensiva de hortalizas de fruto, utiliza altas cantidades de fertilizantes y pesticidas, que contienen en su composición química, elementos como níquel (Ni), hierro (Fe), zinc (Zn) y manganeso (Mn). Estos elementos son absorbidos por las plantas y se acumulan en los frutos, y aumentan el riesgo a la salud de los consumidores. El objetivo de la presente investigación fue aplicar un diseño de mezclas, para evaluar soluciones nutritivas con altas concentraciones de Ni^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} y Zn^{2+} , en la composición mineral, y el rendimiento de tomate (*Solanum lycopersicum* cv. SV8579TE). El diseño experimental utilizado fue centroide simple [4,3] con 15 soluciones nutritivas, y seis repeticiones por tratamiento, para un total de 90 unidades experimentales. Las soluciones nutritivas fueron generadas con la metodología del diseño de mezclas, y el programa Design Expert (versión 11). Las 15 mezclas de Ni^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} y Zn^{2+} , provocaron en las plantas, detención de crecimiento del meristemo apical del tallo principal y alteraciones en la morfología de la planta. Las concentraciones de Ni, Fe, Zn y Mn en los frutos fueron significativamente ($p \leq 0.05$) afectadas por las mezclas. Los mayores valores de Ni, Zn y Mn se obtuvieron en las mezclas puras, donde el elemento de interés está en mayor concentración (12 mg L^{-1}). Los modelos de regresión, que describen estos resultados en la superficie de respuesta, son lineales múltiples, donde aumentos en las proporciones de Ni^{2+} , Mn^{2+} y Zn^{2+} en las mezclas, incrementaron las concentraciones de estos elementos en los frutos. Las concentraciones promedio de Ni, Fe, Zn y Mn en los frutos no excedieron los límites establecidos por organismos internacionales. Por ello, su consumo, no representa peligro a la salud humana. La producción promedio (59.3 Mg ha^{-1}) fue 37.8% menor al rendimiento medio (95.3 Mg ha^{-1}) obtenido en Sinaloa.

Palabras clave: hidroponía, micronutrientes, modelo regresión lineal, toxicidad.

SUMMARY

The intensive production of fruit vegetables uses high amounts of fertilizers and pesticides, which contain in their chemical composition elements such as nickel (Ni), iron (Fe), zinc (Zn), and manganese (Mn). These elements are absorbed by plants and accumulate in the fruits, increasing the health risk to consumers. The objective of this study was to apply a mixture design to evaluate nutrient solutions with high concentrations of Ni^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , and Zn^{2+} on the mineral composition and yield



Cita recomendada:

Parra-Terraza, S., López-Rodas, C. F., Angulo-Castro, A., Cruz-Ortega, J. E., & Preciado-Rangel, P. (2025). Aplicación de un Diseño de Mezclas para Evaluar Altas Concentraciones de Ni^{2+} , Fe^{2+} , Zn^{2+} y Mn^{2+} en Soluciones Nutritivas en la Composición Mineral y el Rendimiento de Tomate. *Terra Latinoamericana*, 43, 1-12. e2165. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2165>

Recibido: 7 de enero de 2025.

Aceptado: 16 de junio de 2025.

Artículo. Volumen 43.

Octubre de 2025.

Editor de Sección:

Dr. Fidel Núñez-Ramírez

Editor Técnico:

Dra. Josefa Espitia López



Copyright: © 2025 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

of tomato (*Solanum lycopersicum* cv. SV8579TE). The hydroponic system was closed and used peat (*Sphagnum parda*) as the substrate. The experimental design employed was a centroid simplex [4,3] with 15 nutrient solutions and six replicates per treatment, for a total of 90 experimental units. The nutrient solutions were generated using the mixture design methodology with the Design Expert software (version 11). The 15 mixtures of Ni^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , and Zn^{2+} caused growth arrest of the apical meristem of the main stem and morphological alterations in the plants. The concentrations of Ni, Fe, Zn, and Mn in the fruits were significantly ($p \leq 0.05$) affected by the mixtures. The highest values of Ni, Zn, and Mn were obtained in the pure mixtures, where the element of interest was at the highest concentration (12 mg L^{-1}). The regression models describing these results on the response surface were multiple linear, where increases in the proportions of Ni^{2+} , Mn^{2+} , and Zn^{2+} in the mixtures increased the concentrations of these elements in the fruits. The average concentrations of Ni, Fe, Zn, and Mn in the fruits did not exceed the limits established by international organizations. Therefore, the consumption of these tomatoes does not represent a risk to human health. The average production (59.3 Mg ha^{-1}) was 37.8% lower than the average yield (95.3 Mg ha^{-1}) obtained in Sinaloa.

Index words: hydroponics, micronutrients, linear regression model, toxicity.

INTRODUCCIÓN

El Ni, Fe, Zn y Mn son micronutrientes esenciales para las plantas porque los requieren en pequeñas cantidades ($<100 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$ de materia seca) para completar su ciclo de vida, y sus funciones en el metabolismo vegetal son conocidas (Rengel, Cakmak y White, 2022). La industria, minería, agricultura y transporte son fuentes antropogénicas que liberan al ambiente Ni, Fe, Zn y Mn como subproductos de sus actividades. Estos elementos se acumulan en concentraciones tóxicas en suelos, aguas y atmósfera (Nazir *et al.*, 2015; Rodríguez-Eugenio, McLaughlin y Pennock, 2019) y afectan el crecimiento y desarrollo de las plantas (Maksymiec, 2007; Shahid *et al.*, 2015). Diversos estudios se han realizado para evaluar la toxicidad de Ni, Mn, Fe, y Zn en los cultivos agrícolas (Shukla, 2010; Fatemeh, Reza, Rashid y Latifeh, 2012; Kleiber y Grajek, 2015; Chen, Yan, Sun, Tian y Liao, 2016; De Dorlodot, Lutts y Bertin, 2005; De Oliveira-Jucoski *et al.*, 2013; Li, Yang, Jia, Chen y Wei, 2013; Mukhopadhyay *et al.*, 2015). La mayoría de estas investigaciones cuantificaron el efecto individual del micronutriente de interés, lo que limita el saber sobre el efecto combinado sinérgico o antagónico de las interacciones entre dos o más micronutrientes.

Para evaluar dichos efectos se puede utilizar la metodología de los experimentos con mezclas, debido a que en las soluciones nutritivas los iones componentes se encuentran formando mezclas (Cornell, 2002). Durante los años 2016-2020 se publicaron 158 artículos en inglés, sobre el uso del diseño mezclas: 59 fueron en el área farmacéutica, 39 en alimentos, 37 en bebidas, y 23 en otras áreas (Galvan, Effting, Cremasco y Conte, 2021). Con base en lo anterior, la aplicación de los diseños de mezclas, en el área agrícola es escasa, y se han realizado con los elementos N, P, S, K, Ca, Mg, y Na en cultivos de: achicoria (*Cichorium intybus* L.) (De Rijck y Schrevens, 1998), tomate (*Solanum lycopersicum* L.) (Colla, Rouphael, Fallovo, Fanasca y Cardarelli, 2008; Parra-Terraza, 2024), frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) (Valdez-Aguilar y Reed, 2010), lirio (*Lilium* cv. *Navona*) (Marín, Valdez, Castillo, Pineda y Galván, 2010) y pasto inglés (*Lolium perenne*) (De Rijck y Schrevens, 1999).

En 2023 las ventas de tomate al mercado internacional totalizaron 2867 millones de dólares, donde Estados Unidos de Norteamérica compró 2562 millones de dólares. La entidad federativa de México con mayor venta de tomate fue Sinaloa con 1066 millones de dólares (Secretaría de Economía, 2023). En Sinaloa la producción intensiva de tomate se caracteriza por usar grandes cantidades de fertilizantes y pesticidas (insecticidas, herbicidas y fungicidas) entre otras prácticas agrícolas. Los fertilizantes y pesticidas son fuentes secundarias de metales pesados (micronutrientes) y de contaminación en los suelos (Alengebawy, Abdelkhalek, Qureshi y Wang, 2021; Núñez-Ramos *et al.*, 2024), lo que favorece la absorción y acumulación por los cultivos (Bell, Chaney y Angle, 1991).

Los productos vegetales son la base de la cadena alimenticia y el riesgo a la salud humana, aumenta a medida que los metales pesados se acumulan en las partes comestibles de las plantas y son inseguros para el consumo (FAO y ITPS, 2015; Rai, 2018). Por ello, es necesario hacer evaluaciones frecuentes de metales pesados en los productos agrícolas (Codex Alimentarius Commission, 1995). El objetivo de esta investigación fue aplicar la metodología del diseño de mezclas para evaluar 15 soluciones nutritivas, con concentraciones elevadas de Ni, Mn, Fe y Zn, respecto a la solución universal de Steiner (1984), en la composición mineral y el rendimiento de tomate desarrollado en condiciones de casa sombra e hidroponía.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en casa sombra ubicada en la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Sinaloa, México, a 24° 37' 29" N, 107° 24' 30" O, y 38 m de altitud. La temperatura y la humedad relativa promedio fueron 26 °C y 68%, respectivamente. Se utilizaron plantas de tomate (*Solanum lycopersicum* cv. SV8579TE) tipo saladette, de crecimiento determinado, de 37 días de edad, las cuales se trasplantaron en un sistema hidropónico cerrado integrado por 180 recipientes de plástico con capacidad de 20 L cada uno. A 90 recipientes que contendrían el sustrato y las plantas, se les hizo un orificio con taladro eléctrico de 12 mm de diámetro, situado cuatro cm hacia arriba del fondo del recipiente. Al orificio se le puso una goma de hule, un conector inicial de riego, y 50 cm de manguera de riego, en cuyo extremo se colocó una mini válvula de paso de agua.

Posteriormente, se les añadió 15 L de turba *Sphagnum* parda (Kekkila Professional, Finlandia) como sustrato para las plantas de tomate. Los recipientes con sustrato y plantas se colocaron en 10 bancas de madera con altura de 50 cm, largo de 3 m, y 0.4 m de separación entre dos bancas del mismo surco. La separación entre bancas colocadas en surcos adyacentes fue de 1.8 m; la distancia entre plantas en las bancas fue de 0.30 m, y densidad de 1.8 plantas m⁻². Los 90 recipientes restantes contenían 10 L de las soluciones nutritivas (SN) correspondientes a los quince tratamientos evaluados. Las plantas fueron regadas cada dos días por gravedad, para ello los recipientes que contenían las SN se levantaban manualmente y se vertían las SN sobre el sustrato hasta saturarlo.

Subsiguientemente se abría la mini válvula de paso del agua y el drenado se recuperaba en el recipiente que contenía la SN del tratamiento específico. El agua evapotranspirada se reponía en los baldes mediante aforo a 10 L con agua de riego, sin ajustar el pH de las soluciones. Las SN de los tratamientos se renovaron cada 14 d hasta concluir con el estudio. El diseño experimental fue diseño centroide simple [4,3] con seis repeticiones por tratamiento, para un total de 90 unidades experimentales. En la Figura 1 se representa el espacio geométrico (tetraedro), el cual es un simplex de dimensión (componentes - 1) que contiene la ubicación de las 15 mezclas de los cuatro componentes evaluados.

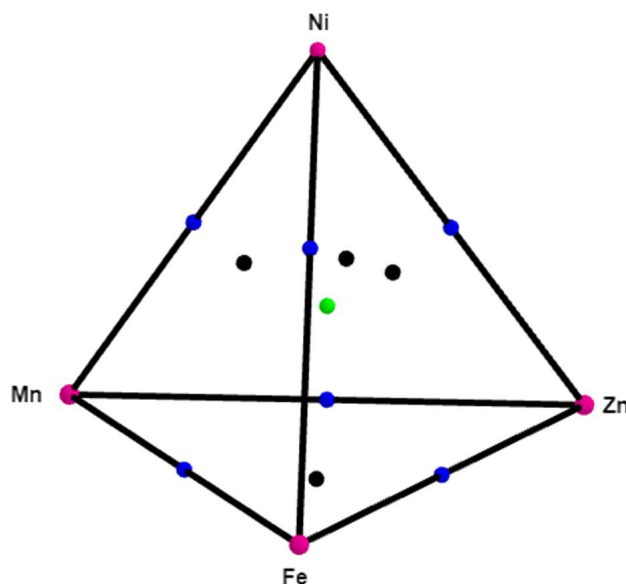


Figura 1. Región experimental del diseño centroide simple para cuatro componentes. Cuatro puntos para los componentes puros Ni²⁺, Mn²⁺, Fe²⁺ y Zn²⁺ en los vértices del tetraedro. Seis puntos para las mezclas binarias 50/50. Cuatro puntos de mezclas de tres componentes en los centroides de las caras triangulares. Una mezcla con partes iguales de los componentes en el centroide del simplex.

Figure 1. Experimental region of the centroid simplex design for four components. Four points for pure components Ni²⁺, Mn²⁺, Fe²⁺ and Zn²⁺ at the vertices of the tetrahedron. Six points for binary 50/50 mixtures. Four points of three-component mixtures at the centroids of the triangular faces. One mixture with equal parts of the components at the centroid of the simplex.

Las SN de los tratamientos fueron diseñadas usando la metodología de experimento de mezclas con Design Expert, versión 11 (Stat-Ease 2018), y las proporciones y concentraciones de las mezclas generadas se indican en el Cuadro 1. Todas las mezclas contenían (me L⁻¹): 12 NO₃⁻, 1 H₂PO₄⁻, 7 SO₄²⁻, 7 K⁺, 9 Ca²⁺ y 4 Mg²⁺, y (mg L⁻¹): 0.5 B, 0.02 Cu y 0.02 Mo. Las mezclas se prepararon con agua de riego (conductividad eléctrica = 0.3 dS m⁻¹ y pH = 7), a la cual se le añadieron fertilizantes químicos para proporcionar las concentraciones nutrimentales evaluadas, considerando los nutrimentos presentes en el agua. Los aportes de Fe²⁺, Zn²⁺ y Mn²⁺, se hicieron con quelatos (EDTA) y para Ni²⁺ se usó Sulfato de níquel(II) hexahidratado, NiSO₄ · 6H₂O.

La cosecha de frutos inició 94 días después del trasplante (ddt) y terminó 154 ddt; al final de la cosecha las plantas se cortaron y separaron las hojas. En el caso de los frutos, durante la cosecha se colectaron cuatro frutos (dos del racimo tercero y dos del cuarto) para el análisis químico. Las hojas y los frutos se secaron en estufa con circulación forzada de aire a una temperatura de a 70 °C durante 72 horas, se molieron en molino eléctrico y tamizaron con malla 40. Al material tamizado se le realizó una digestión húmeda (5 mL HNO₃ + 1.5 mL HClO₄) y 5 mL de HCl diluido 1:1 en agua (Pequerul, Pérez, Madero, Val y Monge, 1993) y se determinaron las concentraciones de Ni, Fe, Zn y Mn mediante espectrofotometría de absorción atómica.

El análisis de los datos fue realizado con el programa de computadora Design Expert, versión 11 (Stat-Ease 2018). Dicho programa se usó para estimar los modelos matemáticos que representen las variables evaluadas, y para elaborar las gráficas de traza de Piepel. El programa estadístico SAS, versión 9.4 SAS Institute (2013) se utilizó para el análisis de varianza y prueba de comparación múltiple de medias de los tratamientos, mediante el criterio de Tukey ($p \leq 0.05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las quince mezclas de Ni²⁺, Fe²⁺, Zn²⁺ y Mn²⁺, provocaron detención de crecimiento del meristemo apical del tallo principal en todas las plantas, notable a los 45 días después del trasplante. Para continuar con la investigación, se permitió el desarrollo del segundo tallo secundario o lateral en el brote axilar. Aunado a lo anterior, se

Cuadro 1. Proporciones y concentraciones de Ni²⁺, Mn²⁺, Fe²⁺ y Zn²⁺ usadas en el experimento.
Table 1. Proportions and concentrations of Ni²⁺, Mn²⁺, Fe²⁺ and Zn²⁺ used in the experiment.

Mezclas #	Proporción				Concentración (mg L ⁻¹)			
	Ni ²⁺	Fe ²⁺	Zn ²⁺	Mn ²⁺	Ni ²⁺	Fe ²⁺	Zn ²⁺	Mn ²⁺
1	0.25	0.25	0.25	0.25	3	3	3	3
2	0	0	1	0	0	0	12	0
3	0.125	0.625	0.125	0.125	1.5	7.5	1.5	1.5
4	0.125	0.125	0.125	0.625	1.5	1.5	1.5	7.5
5	0	1	0	0	0	12	0	0
6	0	0	0.5	0.5	0	0	6	6
7	1	0	0	0	12	0	0	0
8	0	0	0	1	0	0	0	12
9	0	0.5	0	0.5	0	6	0	6
10	0	0.5	0.5	0	0	6	6	0
11	0.5	0	0.5	0	6	0	6	0
12	0.625	0.125	0.125	0.125	7.5	1.5	1.5	1.5
13	0.125	0.125	0.625	0.125	1.5	1.5	7.5	1.5
14	0.5	0.5	0	0	6	6	0	0
15	0.5	0	0	0.5	6	0	0	6

presentaron anomalías en la morfología de la totalidad de las plantas, caracterizadas por alargamientos de los racimos florales y la aparición de ramificaciones florales en las hojas. Dichas anomalías son atribuidas a toxicidad, ya que generalmente altas concentraciones de metales dañan las raíces, afectan la absorción de nutrientes y alteran la morfología de las plantas (Corradi, Bianchi y Albasini, 1993). De igual manera, Bini, Wahasha, Fontana y Maleci (2012) indican que las plantas que crecen en suelos contaminados con metales pesados, los absorben y acumulan en los tejidos y alteran la morfología de las plantas. Steiner (1984) menciona mayor riesgo de toxicidad en las plantas, debido a altas concentraciones de Fe, Zn, Mn, B, Cu y Mo en la SN, que los provocados por deficiencia de estos micronutrientes. Por ello, sugiere los rangos de concentraciones adecuados (mg L^{-1}) en la SN: Fe (0.5-2), Zn (0.1-0.6), Mn (0.2-2), B (0.2-0.6), Cu (0.01-0.06) y Mo (0.04-0.06). No incluye al Ni, ya que la esencialidad de este micronutriente fue establecida en el año 1987 (Brown, Welch y Cary, 1987) y la solución Steiner fue anterior a este año. En la presente investigación las concentraciones individuales de Ni^{2+} , Fe^{2+} , Zn^{2+} y Mn^{2+} , variaron de 0 a 12 mg L^{-1} , valores seis veces superiores para Fe^{2+} y Mn^{2+} y 20 veces mayor para Zn^{2+} a los valores máximos recomendados por Steiner. Las mezclas de Ni^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} y Zn^{2+} en las SN afectaron ($p \leq 0.05$) las concentraciones de Ni, Fe, Zn y Mn en las hojas de tomate (Cuadro 2).

Las mayores concentraciones de Ni, Fe y Zn en hojas, se obtuvieron con las mezclas puras (mezclas 7, 8 y 5, respectivamente) que se caracterizan por tener 12 mg L^{-1} del elemento en cuestión. En cambio, las menores concentraciones de Ni (mezclas 2, 3 y 13), Zn (mezclas 2, 6, 7, 8 y 15) y Mn (mezclas 5, 8, 9, 14 y 15) fueron obtenidas con las mezclas, cuyos aportes de estos elementos fueron nulos o bajos (Cuadro 2). Angelova, Babrikov e Invanov (2009) reportaron $32.5 \text{ mg Zn kg}^{-1}$ en hojas de tomate cultivado en suelos contaminados con metales pesados, y en el presente estudio, al aplicar 12 mg Zn L^{-1} en la SN (mezcla 5) se obtuvo una concentración de $118.6 \text{ mg Zn kg}^{-1}$ en las hojas. Kleiber y Grajek (2015) evaluaron diferentes concentraciones de Mn y con 9.6 mg L^{-1} en la SN, la concentración de este elemento en las hojas de tomate fue de 110.

Cuadro 2. Efecto de las mezclas sobre las concentraciones de Ni, Fe, Zn y Mn en las hojas de tomate.

Table 2. Effect of mixtures on Ni, Fe, Zn and Mn concentrations in tomato leaves.

Mezclas	Pseudocomponentes- $L^{\dagger}$				----- mg kg^{-1} -----			
#	X'1	X'2	X'3	X'4	Ni	Fe	Zn	Mn
1	0.25	0.25	0.25	0.25	22.1 d [‡]	156.0 ab	48.1 cdef	73.2 def
2	0	0	0	1	14.9 ef	104.8 d	27.4 ef	125.6 b
3	0.125	0.125	0.625	0.125	12.6 f	146.0 abcd	77.4 b	56.8 ef
4	0.125	0.625	0.125	0.125	22.8 cd	109.3 cd	35.8 def	60.6 ef
5	0	0	1	0	21.8 d	154.8 abc	118.6 a	60.2 ef
6	0	0.50	0	0.50	20.4 d	173.8 a	25.8 f	108.7 bc
7	1	0	0	0	36.6 a	162.7 a	29.7 ef	82.0 cde
8	0	1	0	0	22.4 d	177.0 a	31.6 ef	71.0 def
9	0	0.50	0.50	0	21.9 d	137.0 abcd	69.0 bc	44.8 f
10	0	0	0.50	0.50	19.0 de	109.7 bcd	67.4 bc	77.5 de
11	0.50	0	0	0.50	27.5 bc	155.8 abc	32.3 ef	208.3 a
12	0.625	0.125	0.125	0.125	22.3 d	152.0 abc	58.8 bcd	79.2 cde
13	0.125	0.125	0.125	0.625	12.5 f	163.0 a	51.2 cde	94.5 cd
14	0.50	0	0.50	0	30.7 b	146.5 abcd	79.8 b	53.4 ef
15	0.50	0.50	0	0	31.7 b	169.0 a	29.7 ef	52.8 ef

[†] Variables codificadas para facilitar la predicción de las variables independientes en los modelos de regresión. [‡] Medias en la misma columna y con letras iguales se consideran estadísticamente iguales (Tukey; $p \leq 0.05$).

[†] Coded variables to facilitate the prediction of independent variables in the regression models. [‡] Means in the same column followed by the same letter are considered statistically equal (Tukey; $p \leq 0.05$).

En el actual trabajo al aplicar 12 mg L⁻¹ de Mn (mezcla 2; Cuadro 2) la concentración fue 125.6 mg Mn kg⁻¹. Los modelos de regresión lineal múltiple estimados por Design Expert, para predecir las concentraciones de Ni, Fe, Zn y Mn en las hojas de tomate fueron significativos ($p < 0.0001$) (Cuadro 3). Los modelos para Ni, Fe y Mn son de tercer grado, del tipo cúbico especial, cuya ecuación estimada es de la forma: $\hat{Y} = \beta_1 X'_1 + \beta_2 X'_2 + \beta_3 X'_3 + \beta_4 X'_4 + \beta_{12} X'_1 X'_2 + \beta_{13} X'_1 X'_3 + \beta_{14} X'_1 X'_4 + \beta_{23} X'_2 X'_3 + \beta_{24} X'_2 X'_4 + \beta_{34} X'_3 X'_4 + \beta_{123} X'_1 X'_2 X'_3 + \beta_{124} X'_1 X'_2 X'_4 + \beta_{134} X'_1 X'_3 X'_4 + \beta_{234} X'_2 X'_3 X'_4$ (Cornell, 2002). Estos modelos pueden utilizarse para estimar las concentraciones de Ni, Fe y Mn, en las hojas, mientras que para Zn el modelo estimado fue lineal. Por ejemplo, para calcular la concentración estimada de Zn, Ni, Fe, y Mn al usar proporciones de 0.17 Ni: 0.33 Fe: 0.40 Zn: 0.10 Mn en la SN, los modelos estiman concentraciones de 63.26, 19.36, 58.33 y 88.77 mg kg⁻¹ de Zn, Ni, Fe y Mn, respectivamente. Los coeficientes de determinación (R²) de los modelos estimados, en orden decreciente son: 0.80, 0.78, 0.67 y 0.47 para Zn, Mn, Ni y Fe, dichos valores explican los % de variabilidad de los resultados.

Las mezclas de Ni²⁺, Fe²⁺, Zn²⁺ y Mn²⁺, en las SN afectaron estadísticamente las concentraciones de estos elementos en los frutos (Cuadro 4). La mayor concentración de Ni (5.8 mg kg⁻¹) se obtuvo con la mezcla pura, donde el Ni²⁺ está en mayor concentración ($X'_1 = 1$) y los otros tres pseudocomponentes-L (X'_2 , X'_3 y X'_4) tienen valor cero. En contraste, las menores concentraciones de Ni se obtuvieron con las mezclas 2, 5, 8, 9, 10, sin aportes de Ni²⁺, excepto la mezcla 6. En el caso de Zn y Mn, los menores valores absolutos se obtuvieron en las SN carentes de estos elementos, mientras que los mayores fueron obtenidos generalmente con las mezclas puras.

Respecto al Fe la mezcla pura (12 mg Fe L⁻¹) fue similar estadísticamente a todas las mezclas, lo cual puede estar relacionado con la composición química del agua de riego (0.5 mg Fe L⁻¹) y de la turba (1.1 a 5.5 % Fe). Los límites permisibles de Ni, Fe y Zn en vegetales son: 68, 425.5, y 99.4 mg kg⁻¹, respectivamente (Mensah, Kyei, Ofori y Obeng, 2009). Estos valores son superiores a los encontrados en el presente estudio, por lo tanto, no representan riesgos a la salud para los consumidores.

El tomate puede desarrollarse en suelos con contenidos medios de metales pesados, ya que la acumulación de metales en este cultivo, en orden descendente fue: raíces > tallos > hojas > frutos (Angelova *et al.*, 2009). Los modelos de regresión lineal múltiple estimados por Design Expert para las concentraciones de Ni, Zn y Mn en los frutos de tomate son de primer grado del tipo: $Y = \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 + \varepsilon$, donde: Y es la variable independiente considerada y β_i son los coeficientes obtenidos vía regresión, de las proporciones de las mezclas. $x'_1 = \text{Ni}^{2+}$, $X'_2 = \text{Fe}^{2+}$, $X'_3 = \text{Zn}^{2+}$ y $X'_4 = \text{Mn}^{2+}$ y ε es el error experimental (Cuadro 5).

El modelo para Ni, indica que la magnitud de los coeficientes en orden decreciente es: $X'_1 > X'_4 > X'_2 > X'_3$, por lo que la mayor concentración predicha de este elemento en el fruto, se obtuvo con la mezcla pura de Ni²⁺ seguido de las mezclas puras de Mn²⁺, Fe²⁺ y Zn²⁺. De igual manera, para Zn²⁺ el mayor valor fue obtenido con la mezcla pura de Zn (12 mg L⁻¹), y la tendencia fue $X'_3 > X'_1 > X'_4 > X'_2$, y para Mn²⁺ el valor más alto se obtuvo con la mezcla pura de Mn²⁺ y tendencia $X'_4 > X'_1 > X'_2 > X'_3$. Para Fe, el modelo cuadrático tuvo el mejor ajuste de los datos y la magnitud de los coeficientes lineales, considerados en forma decreciente son: $X'_1 > X'_4 > X'_3 > X'_2$ (Cuadro 5). Los componentes $x'_2 x'_4$ (FeMn) y $x'_2 x'_3$ (FeZn) tienen un efecto no lineal de sinergismo, ya que en estas mezclas binarias las concentraciones de Fe en el fruto son mayores que el promedio de sus mezclas puras ($40 > 30.12$ mg kg⁻¹) y ($32.13 > 29.9$ mg kg⁻¹) para $x'_2 x'_4$ y $x'_2 x'_3$, respectivamente.

Cuadro 3. Modelos de regresión para estimar las concentraciones de Ni, Fe, Zn y Mn en las hojas de tomate en función de las mezclas de estos micronutrientes en las soluciones nutritivas.

Table 3. Regression models to estimate Ni, Fe, Zn and Mn concentrations in tomato leaves as a function of mixtures of these micronutrients in nutrient solutions.

Variable	Modelo	F	Prob.	R ²
Ni	$\hat{Y} = 33.5 x'_1 + 22.1 x'_2 + 21.6 x'_3 + 14.5 x'_4 + 13.4 x'_1 x'_2 + 10.6 x'_1 x'_3 + 11.5 x'_1 x'_4 + 12.2 x'_2 x'_3 - 3.9 x'_2 x'_4 + 1.6 x'_3 x'_4 - 260.0 x'_1 x'_2 x'_3 + 431.5 x'_1 x'_2 x'_4 - 883.0 x'_1 x'_3 x'_4 + 191.3 x'_2 x'_3 x'_4$	10.5	<0.0001	0.67
Fe	$\hat{Y} = 161.6 x'_1 + 175.6 x'_2 + 153.7 x'_3 + 144.7 x'_4 + 41.5 x'_1 x'_2 - 69.7 x'_1 x'_3 - 0.17 x'_1 x'_4 - 119.5 x'_2 x'_3 + 43.9 x'_2 x'_4 - 167.0 x'_3 x'_4 - 4417.0 x'_1 x'_2 x'_3 + 1164.8 x'_1 x'_2 x'_4 + 4170.0 x'_1 x'_3 x'_4 - 1166.3 x'_2 x'_3 x'_4$	4.5	<0.0001	0.47
Zn	$\hat{Y} = 37.1 x'_1 + 27.9 x'_2 + 111.8 x'_3 + 30.2 x'_4$	100.3	<0.0001	0.80
Mn	$\hat{Y} = 81.8 x'_1 + 65.7 x'_2 + 60.0 x'_3 + 125.4 x'_4 - 85.2 x'_1 x'_2 - 71.6 x'_1 x'_3 + 337.0 x'_1 x'_4 - 73.8 x'_2 x'_3 + 10.5 x'_2 x'_4 - 41.4 x'_3 x'_4 + 2184.0 x'_1 x'_2 x'_3 - 2596.0 x'_1 x'_2 x'_4 - 1096.1 x'_1 x'_3 x'_4 + 350.7 x'_2 x'_3 x'_4$	18.3	<0.0001	0.78

Cuadro 4. Efecto de las mezclas sobre las concentraciones de Ni, Fe, Zn y Mn en los frutos de tomate.
Table 4. Effect of mixtures on Ni, Fe, Zn and Mn concentrations in tomato fruits.

Mezclas	Pseudocomponentes-L				----- mg kg ⁻¹ -----			
#	X'1	X'2	X'3	X'4	Ni	Fe	Zn	Mn
1	0.25	0.25	0.25	0.25	2.7 b [†]	36 ab	20 ab	9 ab
2	0	0	0	1	2.7 b	35 ab	18 ab	11 ab
3	0.125	0.125	0.625	0.125	3.4 ab	32 ab	21 ab	8 ab
4	0.125	0.625	0.125	0.125	4.1 ab	35 ab	17 ab	9 ab
5	0	0	1	0	2.7 b	33 ab	23 a	8 ab
6	0	0.50	0	0.50	3.0 ab	39 a	16 b	11 ab
7	1	0	0	0	5.8 a	34 ab	19 ab	10 ab
8	0	1	0	0	2.0 b	27 ab	17 ab	7 b
9	0	0.50	0.50	0	2.8 b	30 ab	19 ab	8 ab
10	0	0	0.50	0.50	2.8 b	27 ab	19 ab	9 ab
11	0.50	0	0	0.50	3.7 ab	32 ab	18 ab	11 ab
12	0.625	0.125	0.125	0.125	3.6 ab	30 ab	20 ab	8 ab
13	0.125	0.125	0.125	0.625	3.3 ab	29 ab	18 ab	13 a
14	0.50	0	0.50	0	3.4 ab	30 ab	20 ab	7 b
15	0.50	0.50	0	0	4.8 ab	24 b	16 b	8 ab

[†] Medias en la misma columna y con letras iguales se consideran estadísticamente iguales (Tukey; $p \leq 0.05$).

[†] Means in the same column followed by the same letter are considered statistically equal (Tukey; $p \leq 0.05$).

En contraste, las mezclas $x'_1x'_2$, $x'_1x'_3$, $x'_1x'_4$, $x'_3x'_4$ fueron antagónicas, ya que las concentraciones de Fe son menores que el promedio de sus mezclas puras, y de acuerdo con el valor de los coeficientes del modelo de regresión, el mayor antagonismo fue con la mezcla $x'_3x'_4$ (ZnMn) ($27.36 < 33.05$ mg Fe kg⁻¹). Estos modelos tienen coeficientes de determinación (R^2) bajos (≤ 0.30), que explican máximo el 30% la variabilidad de los datos obtenidos (Cuadro 5), por lo que su uso con fines de predicción es limitado. Los efectos individuales de Ni²⁺, Fe²⁺, Zn²⁺ y Mn²⁺ sobre las concentraciones predichas de Ni, Zn y Mn en los frutos de tomate, respecto a la mezcla de referencia (el centroide, coordenadas 0.250:0.250:0.250:0.250 Ni²⁺: Fe²⁺: Zn²⁺: Mn²⁺) se indican en los gráficos de Piepel (Figuras 2, 3 y 4, respectivamente).

Cuadro 5. Modelos de regresión para estimar las concentraciones de Ni, Fe, Zn y Mn en los frutos de tomate en función de las mezclas de estos micronutrientes en las soluciones nutritivas.
Table 5. Regression models to estimate Ni, Fe, Zn and Mn concentrations in tomato fruits as a function of mixtures of these micronutrients in nutrient solutions.

Variable	Modelo	F	Prob.	R2
Ni	$\hat{Y} = 5.19 x'_1 + 2.80 x'_2 + 2.58 x'_3 + 4.3 x'_4$	6.3	0.0001	0.22
Fe	$\hat{Y} = 33.71 x'_1 + 26.94 x'_2 + 32.81 x'_3 + 33.31 x'_4 - 18.86 x'_1x'_2 - 7.09 x'_1x'_3 - 5.55 x'_1x'_4 + 9.03 x'_2x'_3 + 39.65 x'_2x'_4 - 22.76 x'_3x'_4$	2.1	0.0400	0.23
Zn	$\hat{Y} = 18.81 x'_1 + 15.68 x'_2 + 23.05 x'_3 + 17.76 x'_4$	9.7	0.0001	0.30
Mn	$\hat{Y} = 9.22 x'_1 + 7.84 x'_2 + 7.56 x'_3 + 12.18 x'_4$	6.4	0.0001	0.22

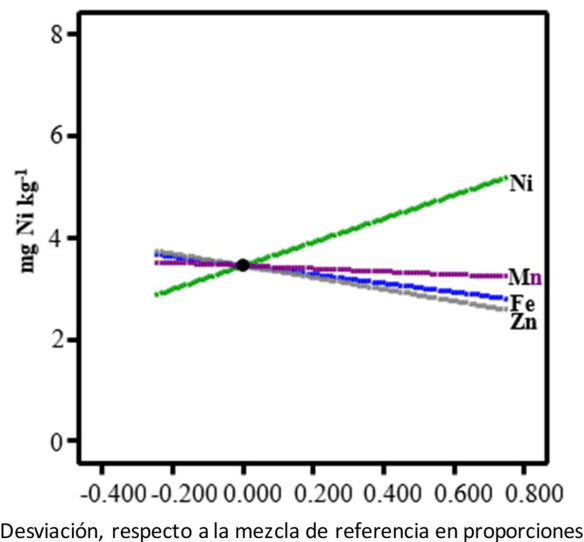


Figura 2. Gráfico de traza de Piepel para evaluar los efectos individuales de Ni^{2+} , Fe^{2+} , Zn^{2+} y Mn^{2+} sobre la concentración de Ni en frutos, respecto a la mezcla de referencia (0.25 Ni^{2+} : 0.25 Fe^{2+} : 0.25 Zn^{2+} : 0.25 Mn^{2+}).
Figure 2. Piepel trace plot to evaluate the individual effects of Ni^{2+} , Fe^{2+} , Zn^{2+} and Mn^{2+} on Ni concentration in fruits, with respect to the reference mixture (0.25 Ni^{2+} : 0.25 Fe^{2+} : 0.25 Zn^{2+} : 0.25 Mn^{2+}).

En estos gráficos, un componente individual es variado, mientras los otros permanecen en proporciones constantes, y se observa que las concentraciones de Ni, Zn y Mn en los frutos aumentan linealmente al incrementar las proporciones de Ni^{2+} , Zn^{2+} y Mn^{2+} en las mezclas. Las plantas absorben al Ni, Fe, Zn y Mn por gradientes de concentración en el medio de crecimiento, por ello a mayor concentración, superior es la absorción (Peralta-Videa, Lopez, Narayan, Saupe y Gardea-Torresdey, 2009; Bell *et al.*, 1991). Kleiber y Grajek (2015) evaluaron concentraciones de Mn (2.4 a 24 mg L^{-1}) en tomate y reportaron correlación positiva entre los contenidos de Mn en frutos, respecto a las concentraciones en el medio de crecimiento. Snee y Piepel (2012) mencionan que los efectos individuales de los componentes en las mezclas, además de interpretarse en los gráficos de traza, también se pueden analizar estadísticamente (Cuadro 6).

Cuadro 6. Coeficientes y efectos de los componentes de las mezclas en las concentraciones de Ni, Fe, Zn y Mn en los frutos.
Table 6. Coefficients and effects of mixture components on Ni, Fe, Zn and Mn concentrations in fruits.

Componente	Coeficiente β	Efecto	$P > t $
Ni			
Ni-X1	5.19	2.32	0.0001
Fe-X2	2.80	-0.866	0.1243
Zn-X3	2.58	-1.16	0.0321
Mn-X4	3.23	-0.287	0.6076
Zn			
Ni-X1	18.81	-0.0229	0.9724
Fe-X2	15.68	-4.19	0.0008
Zn-X3	23.05	5.64	0.0221
Mn-X4	17.76	-1.42	0.2370
Mn			
Ni-X1	9.22	0.0336	0.9724
Fe-X2	7.84	-1.82	0.0676
Zn-X3	7.56	-2.19	0.0221
Mn-X4	12.18	3.97	0.0001

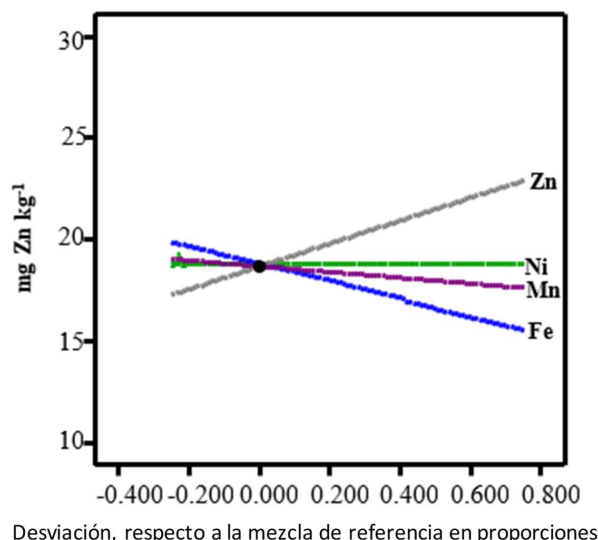


Figura 3. Gráfico de traza de Piepel para evaluar los efectos individuales de Ni^{2+} , Fe^{2+} , Zn^{2+} y Mn^{2+} sobre la concentración de Zn en frutos, respecto a la mezcla de referencia (0.25 Ni^{2+} : 0.25 Fe^{2+} : 0.25 Zn^{2+} : 0.25 Mn^{2+}).
Figure 3. Piepel trace plot to evaluate the individual effects of Ni^{2+} , Fe^{2+} , Zn^{2+} and Mn^{2+} on Zn concentration in fruits, with respect to the reference mixture (0.25 Ni^{2+} : 0.25 Fe^{2+} : 0.25 Zn^{2+} : 0.25 Mn^{2+}).

Para el análisis estadístico de los efectos, se utilizó la prueba “t” de Student, y se comparan dos medias de muestras. Por ejemplo, para el caso de la concentración de Ni se compara la diferencia entre el coeficiente del modelo (5.19), que representa la concentración predicha de Ni con solo ese componente en la mezcla, respecto al promedio de los restantes (2.87) y se obtiene 2.32, valor estadísticamente significativo ($p \leq 0.0001$). Cálculos similares se hacen para estimar los efectos para Zn y Mn. El rendimiento de tomate no fue afectado estadísticamente por las mezclas de Ni^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} y Zn^{2+} en las SN (Cuadro 7), sin embargo, el rendimiento

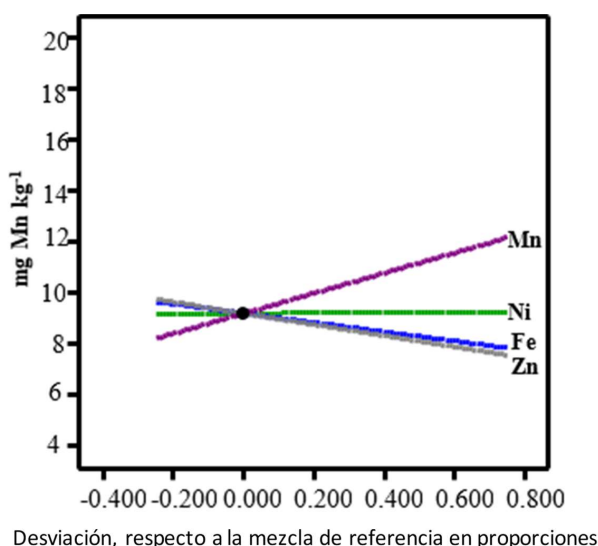


Figura 4. Gráfico de traza de Piepel para evaluar los efectos individuales de Ni^{2+} , Fe^{2+} , Zn^{2+} y Mn^{2+} sobre la concentración de Mn en frutos, respecto a la mezcla de referencia (0.25 Ni^{2+} : 0.25 Fe^{2+} : 0.25 Zn^{2+} : 0.25 Mn^{2+}).
Figure 4. Piepel trace plot to evaluate the individual effects of Ni^{2+} , Fe^{2+} , Zn^{2+} and Mn^{2+} on Mn concentration in fruits, with respect to the reference mixture (0.25 Ni^{2+} : 0.25 Fe^{2+} : 0.25 Zn^{2+} : 0.25 Mn^{2+}).

Cuadro 7. Efecto de las mezclas de Ni^{2+} , Fe^{2+} , Zn^{2+} y Mn^{2+} en soluciones nutritivas sobre el rendimiento de tomate.
Table 7. Effect of Ni^{2+} , Fe^{2+} , Zn^{2+} and Mn^{2+} mixtures in nutrient solutions on tomato yield.

Mezclas	Ni^{2+}	Mn^{2+}	Fe^{2+}	Zn^{2+}	Rendimiento
	----- me L ⁻¹ -----				Mg ha ⁻¹
1	3	3	3	3	63.5 a [†]
2	0	0	0	12	51.8 a
3	1.5	1.5	7.5	1.5	57.2 a
4	1.5	7.5	1.5	1.5	55.8 a
5	0	0	12	0	61.2 a
6	0	6	0	6	63.7 a
7	12	0	0	0	48.3 a
8	0	12	0	0	61.4 a
9	0	6	6	0	64.8 a
10	0	0	6	6	66.4 a
11	6	0	0	6	62.6 a
12	7.5	1.5	1.5	1.5	48.7 a
13	1.5	1.5	1.5	7.5	64.3 a
14	6	0	6	0	57.0 a
15	6	6	0	0	61.4 a

[†] Medias en la misma columna y con letras iguales se consideran estadísticamente iguales (Tukey; $p \leq 0.05$).

[†] Means in the same column followed by the same letter are considered statistically equal (Tukey; $p \leq 0.05$).

promedio de las mezclas fue 37.8% menor, respecto al obtenido por los productores de tomate, en condiciones de malla sombra en Sinaloa (SIAP, 2023). Esta reducción del rendimiento, es atribuido a la toxicidad en las plantas de tomate, provocados por las mezclas de Ni^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} y Zn^{2+} y está relacionado con la disminución de la intensidad de la fotosíntesis y por consiguiente del rendimiento (Kleiber y Grajek, 2015; Rengel *et al.*, 2022).

CONCLUSIONES

Las plantas de tomate irrigadas cada dos días, con 15 soluciones nutritivas con altas concentraciones de Ni^{2+} , Fe^{2+} , Zn^{2+} y Mn^{2+} , respecto a la solución universal de Steiner, presentaron síntomas visuales de toxicidad, que alteraron la morfología de todas las plantas. Además, aumentaron las concentraciones de Ni, Fe, Zn y Mn en los frutos de tomate, sin exceder los límites permitidos por organismos internacionales, para considerarse de riesgo para la salud humana. Los modelos de regresión lineal múltiple, estimados para predecir las concentraciones de Ni, Fe, Zn y Mn en los frutos de tomate fueron significativos estadísticamente ($p \leq 0.05$), pero tienen coeficientes de determinación (R^2) bajos ($R^2 \leq 0.30$) que explican máximo 30 % la variabilidad de los datos obtenidos, por lo que su uso con fines de predicción es limitado.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

No aplicable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FINANCIACIÓN

No aplicable.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: S.P.T., A.A.C. y C.F.L.R. Metodología: S.P.T., A.A.C. y J.E.C.O. Software: S.P.T. y P.P.R. Establecimiento del experimento: S.P.T., y C.F.L.R. Análisis de los datos: S.P.T. Control de plagas y enfermedades: C.F.L.R. y J.E.C.O. Escritura: preparación del borrador original: S.P.T.

AGRADECIMIENTOS

No aplicable.

LITERATURA CITADA

- Alengebaw, A., Abdelkhalek, S. T., Qureshi, S. R., & Wang, M. Q. (2021). Heavy metals and pesticides toxicity in agricultural soil and plant: Ecological risks and human health implication. *Toxics*, 9(3), 1-33. <https://doi.org/10.3390/toxics9030042>
- Angelova, V. R., Babrikov, T. D., & Ivanov, K. I. (2009). Bioaccumulation and distribution of lead, zinc, and cadmium in crops of Solanaceae family. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 40(13-14), 2248-2263. <https://doi.org/10.1080/00103620902961227>
- Bell, P. F., Chaney, R. L., & Angle, J. S. (1991). Free metal activity and total metal concentration as indices of micronutrient availability to barley (*Hordeum vulgare* L.). *Plant and Soil*, 130(1), 51-62. <https://doi.org/10.1007/BF00011855>
- Bini, C., Wahsha, M., Fontana, S., & Maleci, L. (2012). Effects of heavy metals on morphological characteristics of *Taraxacum officinale* growing on mine soils in NE Italy. *Journal of Geochemical Exploration*, 123, 101-108. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.07.009>
- Brown, P. H., Welch, R. M., & Cary, E. E. (1987). Nickel: A micronutrient essential for all higher plants. *Plant Physiology*, 85(3), 801-803. <https://doi.org/10.1104/pp.85.3.801>
- Chen, Z., Yan, W., Sun, L., Tian, J., & Liao, H. (2016). Proteomic analysis reveals growth inhibition of soybean roots by manganese toxicity: Association with alteration of cell wall structure and lignification. *Journal of Proteomics*, 143, 151-160. <https://doi.org/10.1016/j.jprot.2016.03.037>
- Codex Alimentarius Commission (1995). *General Standard for Contaminants and Toxins in Food and Feed (Codex Stan 193-1995)*. Rome, Italy: FAO-OMS.
- Colla, G., Rouphael, Y., Fallovo, C., Fanasca, S., & Cardarelli, M. (2008). Application of two mathematical methods for optimizing the macrocation proportions of hydroponically-grown tomatoes. *Advances in Horticultural Science*, 22(1), 38-42. <https://www.jstor.org/stable/42882609>
- Cornell, J. A. (2002). Experiments with mixtures: Designs, models, and the analysis of mixture data (3rd ed.). New York, USA: John Wiley & Sons.
- Corradi, M. G., Bianchi, A., & Albasini, A. (1993). Chromium toxicity in *Salvia sclarea*: Effects of hexavalent chromium on seed germination and seedling development. *Environmental and Experimental Botany*, 33(3), 405-413. [https://doi.org/10.1016/0098-8472\(93\)90043-F](https://doi.org/10.1016/0098-8472(93)90043-F)
- De Dordlot, S., Lutts, S., & Bertin, P. (2005). Effects of ferrous iron toxicity on the growth and mineral composition of an interspecific rice. *Journal of Plant Nutrition*, 28(1), 1-20. <https://doi.org/10.1081/PLN-200042144>
- De Oliveira-Jucoski, G., Cambraia, J., Ribeiro, C., de Oliveira, J. A., de Paula, S. O., & Oliva, M. A. (2013). Impact of iron toxicity on oxidative metabolism in young *Eugenia uniflora* L. plants. *Acta Physiologiae Plantarum*, 35, 1645-1657. <http://dx.doi.org/10.1007/s11738-012-1207-4>
- De Rijck, G., & Schrevens, E. (1998). Multifactorial optimization of the nutrient solution for hydroponically grown chicory plants. *Scientia Horticulturae*, 76(3-4), 149-159. [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(98\)00126-5](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(98)00126-5)
- De Rijck, G., & Schrevens, E. (1999). The guidelines to optimize the macrocation and macroanion composition of nutrient solutions using mixture theory. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 72(4), 355-362. <https://doi.org/10.1006/jaer.1998.0382>
- FAO & ITPS. (2015). *Status of the World's Soil Resources (SWSR) - Main Report*. Rome, Italy, Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils. <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/i5199e>
- Fatemeh, G., Reza, H., Rashid, J., & Latifeh, P. (2012). Effects of Ni²⁺ toxicity on Hill reaction and membrane functionality in maize. *Journal of Stress Physiology & Biochemistry*, 8(4), 55-61.
- Galvan, D., Eftting, L., Cremasco, H., & Conte, J. C. A. (2021). Recent applications of mixture designs in beverages, foods, and pharmaceutical health: A systematic review and meta-analysis. *Foods*, 10(8), 1-28. <https://doi.org/10.3390/foods10081941>
- Kleiber, T., & Grajek, M. (2015). Tomato reaction on excessive manganese nutrition. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 21(1), 118-125. <https://www.researchgate.net/publication/281400459>
- Li, X., Yang, Y., Jia, L., Chen, H., & Wei, X. (2013). Zinc-induced oxidative damage, antioxidant enzyme response and proline metabolism in roots and leaves of wheat plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 89, 150-157. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2012.11.025>
- Maksymiec, W. (2007). Signaling responses in plants to heavy metal stress. *Acta Physiologiae Plantarum*, 29, 177-187. <https://doi.org/10.1007/s11738-007-0036-3>

- Marín, M., Valdez-Aguilar, L. A., Castillo-Gonzalez, A. M., Pineda-Pineda, J., & Galvan-Luna, J. J. (2010). Modelling growth and ion concentration of *lilium* in response to nitrogen: potassium: calcium mixture solutions. *Journal of Plant Nutrition*, 34(1), 12-26. <https://doi.org/10.1080/01904167.2011.531355>
- Mensah, E., Kyei-Baffour, N., Ofori, E., & Obeng, G. (2009). Influence of human activities and land use on heavy metal concentrations in irrigated vegetables in Ghana and their health implications. In *Appropriate technologies for environmental protection in the developing world* (pp. 9-14). Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- Mukhopadhyay, M., Das, A., Subba, P., Bantawa, P., Sarkar, B., Ghosh, P., & Mondal, T. K. (2015). Structural, physiological, and biochemical profiling of tea plantlets under zinc stress. *Biologia Plantarum*, 57, 474-480.
- Nazir, R., Khan, M., Masab, M., Rehman, H. U., Rauf, N. U., Shahab, S., ... & Shaheen, Z. (2015). Accumulation of heavy metals (Ni, Cu, Cd, Cr, Pb, Zn, Fe) in the soil, water and plants and analysis of physico-chemical parameters of soil and water collected from Tanda Dam kohat. *Journal of Pharmaceutical Sciences Research*, 7(3), 89-97.
- Núñez-Ramos, P. A., Almonte, L., Pérez, A., Avilés-Quezada, E., López-Rodríguez, G., Martínez, C., & Ruiz- Najera, R. E. (2024). Presencia de Metales Pesados y Fósforo en Suelos en Ambiente Controlado de República Dominicana. *Terra Latinoamericana*, 42, 1-13. <https://doi.org/10.28940/terra.v42i0.1872>
- Parra-Terraza, S. (2024). Mixture design to optimize the proportions of K^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} in nutrient solution for hydroponically-grown tomato. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 30(2), 43-53. <https://doi.org/10.5154/r.rchsh.2023.07.005>
- Pequerul, A., Pérez, C., Madero, P., Val, J., & Monge, E. (1993). A rapid wet digestion method for plant analysis. In M. A. C. Fragoso, M. L. Van Beusichem, A. Houwers (Eds.). *Optimization of Plant Nutrition. Developments in Plant and Soil Sciences*, vol 53. Dordrecht Netherlands: Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-017-2496-8_1
- Peralta-Videa, J. R., Lopez, M. L., Narayan, M., Saupe, G., & Gardea-Torresdey, J. (2009). The biochemistry of environmental heavy metal uptake by plants: implications for the food chain. *The International Journal of Biochemistry & Cell Biology*, 41(8-9), 1665-1677. <https://doi.org/10.1016/j.biocel.2009.03.005>
- Rai, P. K. (2018). *Phytoremediation of Emerging Contaminants in Wetlands*. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press,
- Rengel, Z., Cakmak, I., & White, P. J. (2022). *Marschner's mineral nutrition of plants* (4.^a ed.). Cambridge, MA: Academic Press.
- Rodríguez-Eugenio, N., McLaughlin, M., & Pennock, D. (2019). *La contaminación del suelo: una realidad oculta*. Roma, FAO.
- SAS Institute Inc. (2013). *SAS® Procedures Guide: Version 9.4*. Cary, N.C.: SAS Institute Inc. Recuperado de <https://support.sas.com/documentation/cdl/en/proccstat/68142/HTML/default/viewer.htm>
- Secretaría de Economía. (2023). Ventas internacionales por entidad federativa. Gobierno de México. Data México. Consulta realizada el 19 de julio de 2024. <https://www.economia.gob.mx/datamexico>
- Shahid, M., Khalid, S., Abbas, G., Shahid, N., Nadeem, M., & Sabir, M. (2015). Heavy metal stress and crop productivity. En K. R. Hakeem (Ed.), *Crop production and global environmental issues* (pp. 1-25). Cham, Switzerland: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-23162-4>
- Shukla, R. (2010). Nickel level and toxicity and metabolism of potato. *International Journal of Vegetable Science*, 16(2) 160-166. <https://doi.org/10.1080/19315260903358174>
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2023). *Producción Agrícola*. Consultado el 19 de enero 2025, desde <https://www.gob.mx/agricultura/dgsiap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>
- Snee, R. D., & Piepel, G. F. (2012). Assessing component effects in formulation systems. *Quality Engineering*, 25(1), 46-53. <https://doi.org/10.1080/08982112.2012.731628>
- Stat-Ease, Inc. (2018). *Design Expert® (Version 11) User's Guide*. Minneapolis, MN, USA: Stat-Ease, Inc.
- Steiner, A. A. (1984). The universal nutrient solution. En *Proceedings of the Sixth International Congress on Soilless Culture* (pp. 633-649). Lunteren, The Netherlands: Secretariat of ISOSC.
- Valdez-Aguilar, L. A., & Reed, D. W. (2010). Growth and nutrition of young bean plants under high alkalinity as affected by mixtures of ammonium, potassium and sodium. *Journal of Plant Nutrition*, 33, 1472-1488 <https://doi.org/10.1080/01904167.2010.489985>