

Presencia de Metales Pesados y Fósforo en Suelos en Ambiente Controlado de República Dominicana Presence of Heavy Metals and Phosphorus in Soils in a Greenhouse Conditions of the Dominican Republic

Pedro Antonio Núñez-Ramos^{1,2†} , Isidro Almonte¹ , Aridio Pérez¹ ,
Elpidio Avilés-Quezada¹ , Glenny López-Rodríguez¹ ,
César Martínez¹ y Ramiro Eleazar Ruíz-Najera³

¹ Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales (IDIAF). Calle Rafael Augusto Sánchez No. 89. 10147 Ensanche Evaristo Morales, Santo Domingo, República Dominicana; (P.A.N.R.), (I.A.), (A.P.), (E.A.Q.), (G.L.R.), (C.M.).

² Universidad Autónoma de Santo Domingo (UASD), Facultad de Ciencias Agronómicas y Veterinarias. Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Alma Mater, Zona Universitaria. Apartado postal 355, Santo Domingo, República Dominicana; (P.A.N.R.).

³ Universidad Autónoma de Chiapas. Facultad de Ciencias Agronómicas. Carretera Ocozocoautla-Villaflores km 81. 30470 Villaflores, Chiapas, México; (R.E.R.N.).

[†] Autor para correspondencia: pnunez@idiaf.gov.do, pnunez25@uasd.edu.do, pnunez58@gmail.com

RESUMEN

El laboreo intensivo de suelos y el desarrollo de cultivos con uso excesivo de agroquímicos podrían producir un aumento de los contenidos de algunos metales pesados como cromo, níquel, cadmio y plomo. La determinación de estos elementos en condiciones de invernadero no ha sido debidamente evaluada en República Dominicana. Por lo que el objetivo de este estudio fue determinar las concentraciones de estos metales en suelos dedicados a la producción hortícola en condiciones controladas. Se evaluaron 40 suelos provenientes de invernaderos en cinco localidades: Jarabacoa, Constanza, Moca, Villa Trina y San José de Ocoa. Los datos se analizaron mediante estadísticas descriptivas, análisis de correlación de Pearson, análisis de varianza no paramétrico y prueba de Kruskal Wallis. Los valores promedios de Cr, Ni, Cd y Pb oscilaron entre 27.0 y 63.7, 30.0 y 77.8, < 0.002 y 1.8 y < 0.002 y 29.4 mg kg⁻¹, respectivamente. Los mayores contenidos promedios de Cr, Ni, Cd y Pb se encontraron en invernaderos de San José de Ocoa con 63.7, 77.8, 1.8 y 29.4 mg kg⁻¹, respectivamente. Los contenidos de Cd en las localidades restantes fueron < 0.002. El Mn y el Zn no presentan diferencias estadísticas significativas entre localidades ($P \leq 0.05$); sin embargo, el Zn se encuentra dentro de los niveles deseables (3-15 mg kg⁻¹). La variación de estas concentraciones podrían ser atribuidas al tipo de suelo y material de origen, aunque estos factores no fueron estudiados. Se concluye que los contenidos promedios de los metales pesados evaluados no excedieron los límites ambientales; siendo altas las concentraciones en algunos invernaderos, lo que debería llamar la atención por la posible acumulación de éstos en el suelo y consecuentemente en los cultivos.

Palabras clave: contaminación, fitotoxicidad, invernadero, vegetales.

SUMMARY

Intensive soil tillage and the development of crops with excessive use of agrochemicals could produce an increase in the content of some heavy metals such as chromium, nickel, cadmium and lead. The determination of these elements under greenhouse conditions has not been properly evaluated in the Dominican Republic. Therefore, the objective of this study was to determine the concentrations of these metals in soils dedicated to horticultural production under greenhouse conditions. The 40 soils from greenhouses in five locations were evaluated: Jarabacoa, Constanza,



Cita recomendada:

Núñez-Ramos, P. A., Almonte, I., Pérez, A., Avilés-Quezada, E., López-Rodríguez, G., Martínez, C., & Ruíz-Najera, R. E. (2024). Presencia de Metales Pesados y Fósforo en Suelos en Ambiente Controlado de República Dominicana. *Terra Latinoamericana*, 42, 1-13. e1872. <https://doi.org/10.28940/terra.v42i0.1872>

Recibido: 13 de diciembre de 2023.

Aceptado: 22 de febrero de 2024.

Artículo. Volumen 42.

Mayo de 2024.

Editor de Sección:

Dr. Pablo Preciado Rangel

Editor Técnico:

Dr. Fermín Pascual Ramírez

Dr. David Cristóbal Acevedo



Copyright: © 2024 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/>).

Moca, Villa Trina and San José de Ocoa. Data were analyzed using descriptive statistics, Pearson evaluation analysis, nonparametric analysis of variance, and Kruskal Wallis test. The average values of Cr, Ni, Cd, and Pb ranged from 27.0 to 63.7, 30.0 to 77.8, < 0.002 to 1.8, and < 0.002 to 29.4 mg kg⁻¹, respectively. The highest average contents of Cr, Ni, Cd and Pb were found in greenhouses in San José de Ocoa with 63.7, 77.8, 1.8 and 29.4 mg kg⁻¹, respectively. The Cd contents in the remaining localities were < 0.002. The Mn and Zn do not present significant statistical differences between locations ($P \leq 0.05$); however, Zn is within desirable levels (3-15 mg kg⁻¹). The variation in these concentrations could be attributed to the type of soil and source material, although these factors were not studied. It is concluded that the average contents of the heavy metals evaluated did not exceed the environmental limits. The concentrations are high in some greenhouses, which should draw attention to the possible accumulation of these in the soil and consequently in the crops.

Index words: contamination, phytotoxicity, greenhouse, vegetables.

INTRODUCCIÓN

La República Dominicana produce vegetales principalmente a campo abierto e inicia en 2004 una producción en condiciones de invernadero (agricultura protegida), logrando cambios sustanciales en el manejo de los cultivos, incidencia de plagas e incremento de los rendimientos (Maradiaga, 2016). La producción agrícola en condiciones de invernadero se ha convertido en la actividad más dinámica del sector agropecuario de República Dominicana. Según Severino (2016), el valor de las exportaciones de vegetales ha ido incrementando en base a las áreas en m², con ingreso de US\$471 millones en 2014 (Maradiaga, 2016).

La producción de vegetales en invernaderos se ha incrementado en el país, motivada por los rendimientos alcanzados que superan los niveles obtenidos por el productor convencional a campo abierto (PROMEFRIN, 2009). La superficie de siembra de República Dominicana se incrementó de 269 mil m² en 2004 a 11.1 millones de m² en 2018 (Severino, 2016; MARD, 2018) y bajando a 10.02 millones m² en 2022 (MARD, 2022). Según lo reportado por el Ministerio de Agricultura de la República Dominicana (MARD, 2019; 2020; 2023), las áreas de producción han incrementado, excepto en 2022. En ese sentido, la producción paso de aproximadamente 318 mil kg en 2004 a 29.4 millones de kg en 2019 (MARD, 2019).

Según Shen *et al.* (2021), la salud de los ecosistemas del suelo se han visto gravemente amenazada por el aporte de fertilizantes sintéticos y el monocultivo continuo en sistemas intensivos de producción basados en invernaderos. Sin embargo, estos sistemas, permiten mayores ingresos (MARD, 2013), diversidad de cultivo y siembras fuera de épocas. Mientras los sistemas de producción agrícola convencional buscan incrementar los rendimientos mediante el uso desmedido de fertilizantes y pesticidas reconocidos en conjunto como agroquímicos (Alloway, 2012). La agricultura dependiente de agroquímicos tiene efectos negativos en la microflora del suelo y produce toxicidad en los tejidos de los cultivos (Chaves-Bedoya, Ortíz y Ortiz, 2013). En ese sentido, Xu *et al.* (2015), estudió el estado de acumulación, las fuentes y la fitodisponibilidad de metales pesados en sistemas de producción de hortalizas en invernaderos en zonas periurbanas de Beijing, aunque reportan bajas concentraciones en la planta. Las acumulaciones de metales en los sistemas de producción se han convertido en un problema común, según Hu *et al.* (2014), se generan altas concentraciones de oligoelementos en suelos bajo producción intensiva de hortalizas.

De acuerdo con Cuellas (2017), la agricultura periurbana en invernaderos se maneja sin análisis de suelo; esto ha traído como consecuencia la acumulación de elementos tóxicos en el suelo y ambiente (Soledad-Rodríguez, 2011). En ese sentido, una de las mayores demandas de parte de los consumidores es la posibilidad de acceder a alimentos inocuos y de alta calidad, producidos bajo esquemas que sean amigables con el medio ambiente (Rodríguez-Sáenz y Riveros-Serrato, 2016).

Los sistemas de producción dependientes de agroquímicos son proclives a tener efectos negativos sobre la microflora del suelo, toxicidad de los tejidos del cultivo y generar un alto riesgo sobre la salud pública una vez transferidos a los productos alimenticios (Chaves-Bedoya *et al.*, 2013).

Alloway (2012) sostiene que el uso de tecnologías agrícolas incrementan los rendimientos y constituyen una fuente de metales pesados en el suelo, especialmente en zonas de intensa actividad. Por lo tanto, el uso excesivo de agroquímicos podrían convertirse en una fuente importante de aumento de los contenidos de algunos metales pesados en el suelo (Delince, Valdés, López, Guridi y Balbín, 2015), con incrementos en cromo (Cr),

níquel (Ni), cadmio (Cd), plomo (Pb), hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn) y magnesio (Mg) (Alloway, 2012; Cuellas, 2017). Arroyave y Restrepo (2009), señalan que la contaminación del suelo por el uso de plaguicidas afecta el acceso de los productos agrícolas a los mercados (nacional e internacional), lo que disminuye los beneficios económicos esperados (Alloway, 2012; Arroyave y Restrepo, 2009; Céspedes *et al.*, 2015).

El uso de plaguicidas y fertilizantes son tecnologías enfocadas hacia el aumento del rendimiento de los cultivos (Reyes, Vergara, Torres, Lagos y Jiménez, 2016), pero, estos han dañado la actividad agrícola (Zepeda-Jazo, 2018). Ya que, constituyen fuentes potenciales de contaminación por metales pesados y metaloides a recursos hídricos, suelos y aire; y esto compromete la seguridad alimentaria y la salud pública a todos los niveles (Reyes *et al.*, 2016).

Alloway (2013) demostró que Cd, Cr, Mo, Pb y Zn están directamente relacionados con fuentes de fertilizantes que contienen en su fórmula Cu, As, Hg, Pb, Mn y Zn, mientras que Cd, Cu, Ni, Pb y Zn se encontraron en compost derivados de residuos sólidos convencionales y, en el estiércol se ha encontrado Cu, As y Zn. Además de representar un alto riesgo en el equilibrio de los agroecosistemas con incorporación de agroquímicos (Delince *et al.*, 2015), incrementando los niveles de metales pesados en tejidos vegetales de arroz (*Oryza sativa* L.) y papa (*Solanum tuberosum* L.), sin presentar síntomas visibles de fitotoxicidad, lo que representa una alarma para los consumidores. Soledad-Rodríguez (2011), plantean la hipótesis de que existe el riesgo de incrementar las concentraciones de metales pesados, por el uso de agroquímicos en los invernaderos. Por lo que se podrían producir efectos sobre la salud humana y del ecosistema (Alengebaw, Abdelkhalek, Qureshi y Wang, 2021).

En la provincia La Vega, República Dominicana, los suelos dedicados a la producción de vegetales en invernaderos presentan niveles elevados de Cr, Cd, Pb y Ni (Almonte *et al.*, 2010¹); estos sistemas de producción agrícola, elevan el contenido de Pb, Ni, Cr, Cd, Fe, Cu, Zn y Mn en los suelos de acuerdo con los autores.

En la República Dominicana, los estudios de metales pesados en suelos agrícolas reportan niveles que exceden las normas de La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y otros estándares internacionales (Alberto Then *et al.*, 2023; Delanoy, Espinosa y Herrera, 2022a; 2022b; Delanoy, Matos y Santos, 2024). De acuerdo con Cuellas (2017), la agricultura en invernadero genera la acumulación de elementos tóxicos en el suelo y el ambiente (Soledad-Rodríguez, 2011). Sin embargo, hay poca información sobre la presencia de metales pesados en suelos de invernaderos. El objetivo de este trabajo fue determinar los contenidos de Cr, Ni, Cd, Pb, Fe, Cu, Zn, Mg y P, en suelos dedicados a la producción de tomate (*Solanum lycopersicum*), pepino (*Cucumis sativus*), ají dulce (*Capsicum annuum*) y pimentón (*Capsicum annuum*) en ambiente controlado en la región del Cibao Central (localidades Moca, Villa Trina, Constanza y Jarabacoa) y San José de Ocoa (Ocoa).

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación y Descripción de la Zona de Estudio

La investigación se llevó a cabo en la región del Cibao Central y San José de Ocoa de República Dominicana, donde predomina la producción de hortalizas bajo el sistema de agricultura protegida. Una descripción más detallada de las características de la zona de estudio se encuentra en el Cuadro 1. Se evaluaron suelos de las localidades de la región Cibao Central como Moca y Villa Trina (provincia Espaillat), Constanza y Jarabacoa (provincia La Vega) y la provincia San José de Ocoa (Cuadro 1). El estudio se realizó durante el periodo agosto 2009 a febrero 2010, en los cultivos de tomate (*Solanum lycopersicum*), pepino (*Cucumis sativus*) y ají dulce (*Capsicum annuum*), pimentón (*Capsicum annuum*), todos de importancia económica y social para el país.

Los suelos de los cinco sitios fueron clasificados por López, Almonte, Pérez, Sotomayor y Núñez (2014) en Entisol, Mollisol e Inceptisol, con presencia de Vertisol en la localidad de Moca, estos suelos fueron caracterizados en términos físicos, químicos y biológicos; el pH fue de ligeramente ácido a neutro hasta ligeramente básico, variando con la localidad y CE baja (Cuadro 2).

Número de Invernaderos Muestreados

Durante el período de agosto 2009 a febrero 2010, se realizaron muestreos de suelos en 40 invernaderos de tamaño entre 300 m² y 5000 m². La distribución fue del siguiente modo: quince en Jarabacoa, tres en Constanza, dos en Moca, trece en Villa Trina y siete en San José de Ocoa.

¹ Almonte, I., Pérez, A., Avilés, E., Martínez, C., López, G., & Núñez, P. (2010). Caracterización de suelos en la producción de vegetales en invernaderos. 46 Reunión anual de la Sociedad Caribeña de Cultivos Alimenticios (CFCS) (pp. 60-66). Hamaca, Boca Chica, República Dominicana: Proceeding of the Caribbean Food Society.

Cuadro 1. Localización de los sitios de estudio.**Table 1. Location of study sites.**

Localidad	Temperatura media	Precipitación media	Altura media	Latitud	Longitud
	°C	mm	m de Altitud		
Moca (M)	25	1750	970	19° 23' N	70° 31' O
Villa Trina (VT)	23	1750	969	19° 23' N	70° 31' O
Constanza (C)	18	1038	1190	19° 14' N	70° 31' O
Jarabacoa (J)	22	1250	529	19° 14' N	70° 31' O
San José de Ocoa (SJO)	23	1650.9	1850	18° 33' N	70° 30' O

Fuente: ONE (2013) e información levantada en la fase de campo. N = Latitud Norte; O = Longitud Oeste. Elaborado por los autores.

Source: ONE (2013) and information collected in the field phase. N = North Latitude; O = West Longitude. Prepared by the authors.

Muestreo de Suelo para la Separación de Metales Pesados y Micronutrientes

El muestreo de suelos se realizó con un barreno en el perfil a 0-15 cm. En cada invernadero se tomaron ocho submuestras de suelo, cuidando representatividad del inicio, el centro y el final para hacer una muestra compuesta de un kg (Núñez-Ramos, Almonte y Ureña, 2020). Las muestras fueron colocadas en bolsas plásticas y etiquetadas para su envío al laboratorio. En cada invernadero se tomaron ocho submuestras de suelo por cada muestra compuesta y tomando las mismas en lugares diferentes a lo largo de las hileras y zonas de cultivo (al inicio, centro y al final) del invernadero de acuerdo con lo descrito por Núñez *et al.* (2011) y Núñez-Ramos *et al.* (2020). La muestra tuvo un peso de un 1 kg para los análisis de metales pesados y micronutrientes.

Manejo de Muestras

Las muestras fueron debidamente identificadas, empacadas en una funda de polietileno con una capacidad de 2 kg y analizada en laboratorio (Núñez *et al.*, 2011; Núñez *et al.*, 2020).

Análisis de Laboratorio

Los metales pesados cuantificados en el suelo fueron: Cr, Ni, Cd y Pb, los micronutrientes Fe, Cu, Mn y Zn y el P. Se utilizó la metodología por digestión con agua regia y ácido perclórico y se llevó a cabo la determinación por espectrofotometría de absorción atómica a diferentes lecturas. Se usaron las longitudes de onda para cromo 357.9 nm, níquel 232.0 nm, cadmio 228.8 nm y plomo 217.0 nm. Las determinaciones fueron realizadas en el laboratorio de suelo del Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales (CENTA-IDIAF).

Cuadro 2. Características de los suelos.**Table 2. Soil characteristics.**

Localidad	Ordenes de suelo dominantes	Textura suelo dominante [†]	pH [‡]	Media de CE [‡]
				Mmhos cm ⁻¹
Moca	Inceptisol, Molisol, Vertisol	AL, A, FA	7.50±0.20 ab	1.01±0.06 ab
Villa Trina (VT)*	Inceptisol, Mollisol	AL	7.50±0.20 ab	0.74±0.15 ab
Constanza (C)	Mollisol, Entisol	F, FA	6.90±0.12 ab	0.30±0.12 a
Jarabacoa (J)	Mollisol, Entisol	F, FL	6.18±0.22 a	0.48±0.06 ab
San José de Ocoa (SJO)	Mollisol, Entisol	FA, FL	6.87±0.54 ab	1.20±0.12 b

[†] AL = arcillo-limosa; F = franco; FA = franco-arcillosa; FL = franco-limosa; A = arcillosa. Letras distintas indican diferencias significativas ($P \leq 0.05$) para pH y CE, análisis de varianza, separación de media, error estándar. [‡] Resultados de análisis de laboratorio. Elaborado por los autores. Fuente: López, Almonte, Pérez, Sotomayor y Núñez (2014).

[†] AL = silty clay; F = loam; FA = clay loam; FL = silt loam; A = clay. Different letters indicate significant differences ($P \leq 0.05$) for pH and EC, analysis of variance, mean separation, standard error. [‡] Laboratory analysis results. Prepared by the authors. Source: López, Almonte, Pérez, Sotomayor y Núñez (2014).

Los micronutrientes se determinaron por el método de digestión con ácido nítrico-perclórico seguido de cuantificación por absorción atómica (Núñez *et al.*, 2011). El análisis químico de P se determinó por la metodología de Olsen, Cole, Watanabe y Dean (1954) y se expresó en mg kg^{-1} , con pH en rango-promedio 6.18 a 7.50. Las concentraciones de metales fueron evaluadas con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelos del Perú D.S. N° 011- 2017 del Ministerio de Agricultura y Medio Ambiente del Perú (MINAM) y "Canadian Council of Ministers of the environment (CCME)" actualizado al 2018 (Cuadro 3). Se compararon las concentraciones de acuerdo con lo establecido por La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), métodos calibrados para niveles máximos en suelos agrícolas (Rodríguez-Eugenio, McLaughlin y Pennock, 2019) y concentraciones normales de metales pesados en suelos agrícolas (Kabata-Pendias, 2010; Kabata y Pendias, 2001).

Análisis Estadístico

Los datos obtenidos se analizaron para comparar las concentraciones entre sitios de muestreo. Debido a que los datos no provenían de una distribución normal (prueba de Shapiro-Wilks), se aplicó un análisis de varianza no paramétrico tipo Kruskal-Wallis (Kruskal y Wallis, 1952), que evalúa la hipótesis nula de igualdad para las medianas de los diferentes invernaderos muestreados para cada variable de respuesta, siendo $P \leq 0.05$. Esta prueba evalúa la hipótesis nula de igualdad para las medianas de los diferentes sitios de muestreo para cada variable de respuesta. Adicionalmente, se realizaron pruebas de correlación de Pearson entre los contenidos de metales pesados, micronutrientes y P para cada una de las zonas para conocer las posibles interacciones y relaciones. Los datos e informaciones técnicas obtenidas en la fase de campo y en los análisis de laboratorios fueron analizados mediante estadísticas descriptivas aplicando el software InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2008).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Contenidos de Plomo, Níquel, Cromo y Cadmio en Suelos Dedicados a la Producción Agrícola en Ambiente Controlado

El contenido de Cr y Pb no presentó diferencias significativas ($P = 0.1828$ y 0.1593 , respectivamente (Cuadro 4). En tanto que el Ni y Cd mostraron contenidos significativamente diferentes ($P = 0.0229$ y 0.0412 , respectivamente) entre invernaderos muestreados. Estos niveles de acumulación fueron muy inferiores al intervalo y valores límite de toxicidad en suelos de diferentes países (Smith, 1996; CCME 2023; MINAM, 2013a), con diferentes substratos orgánicos incorporados al suelo (Kwon *et al.*, 2012). Al comparar dichos valores obtenidos de Cr con los reportados por La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), y Rodríguez-Eugenio *et al.* (2019), se observa que se exceden los límites en la localidad de Constanza y en los demás casos están por debajo de 70 mg kg^{-1} . En el caso del Ni se exceden los niveles de la FAO en Moca, Constanza y San José de Ocoa, siendo un caso de preocupación para manejar esos contaminantes en invernaderos en estas tres localidades. Mientras en el caso del Cd, los niveles son excedidos en SJO.

Cuadro 3. Parámetros de calidad establecidos por el MINAM y CCME para límites máximos permisibles. Table 3. Quality parameters established by MINAM and CCME for maximum permissible limits.

Parámetros en mg kg^{-1} PS [†]	ECA para suelo Perú [‡]	CCME [§]
Arsénico	50	12
Bario	750	750
Cadmio	1.4	1.4
Cromo total	***	64
Cromo VI	0.4	0.4
Mercurio	6.6	6.6
Plomo	70	-

*** Parámetro no aplica para uso de suelo agrícola. † PS = peso seco; ‡ ECA para suelo Perú, Decreto Supremo No 011-2017 MINAM. § CCME Consejo Canadiense de Ministros de Medio ambiente, actualizado al 2018. Fuente: MINAM (2013b) y CCME (2023).

*** Parameter does not apply to agricultural land use. † DW = dry weight. ‡ ECA for Peru soil, Supreme Decree No 011-2017 MINAM. § CCME Canadian Council of Ministers of the Environment, updated as of 2018. Source: MINAM (2013b) and CCME (2023).

Cuadro 4. Comparación de medias del contenido promedio de cromo (Cr), níquel (Ni), cadmio (Cd) y plomo (Pb) de cinco sitios seleccionados para evaluar la presencia de metales pesados en República Dominicana.
Table 4. Comparison of means of the average content of chromium (Cr), nickel (Ni), cadmium (Cd) and lead (Pb) of five sites selected to evaluate the presence of heavy metals in the Dominican Republic.

Localidades	Metales pesados encontrados en suelos*			
	Cr [†]	Ni [‡]	Cd [§]	Pb [¶]
	----- mg kg ⁻¹ -----			
Villa Trina	39.52±4.55 a	40.2±4.62 a	< 0.002±0 a	0.06±0.06 a
Moca	39.60±7.8 a	50.1±2.5 ab	< 0.002±0 a	< 0.002±0 a
Constanza	77.00±12.7 a	53.67±19.03 ab	< 0.002±0 a	< 0.002±0 a
San José de Ocoa	63.71±8.71 a	77.8±11.92 b	0.77±0.58 a	29.44±25.64a
Jarabacoa	57.28±19.18 a	30.38±9.35 a	< 0.002±0 a	0.5±0.48 a
Rangos deseados para zonas agrícolas	10-100	10-50	3-15	3-15
FAO, (Rodríguez-Eugenio, McLaughlin y Pennock 2019)	70	50	0.2	35
Kabata-Pendias (2010) y Kabata y Pendias (2001).	50-200	20-60	0.001-2.7#	20-300

* Medias con una letra común entre valores de la misma columna indican diferencias significativas ($P \leq 0.05$). [†] Cr con mediana de 25.0, 14.43, 39.6, 61.4 y 39.4 para Constanza, Jarabacoa, Moca, SJO y Villa Trina, respectivamente. [‡] Ni con mediana de 60.0, 10.05, 50.1, 97.6 y 37.1 para Constanza, Jarabacoa, Moca, SJO y Villa Trina, respectivamente. [§] Cd con mediana de < 0.002 en todas las localidades. [¶] Pb con mediana de 0.0002 en todas las localidades. Fuente: Elaborado por los autores. # Kabata y Pendias (2001), rango en intervalo para diferentes suelos.

* Means with a common letter between values in the same column indicate significant differences ($P \leq 0.05$). [†] Cr with median of 25.0, 14.43, 39.6, 61.4 and 39.4 for Constanza, Jarabacoa, Moca, SJO and Villa Trina, respectively. [‡] Ni with median of 60.0, 10.05, 50.1, 97.6 and 37.1 for Constanza, Jarabacoa, Moca, SJO and Villa Trina, respectively. [§] Cd with median of < 0.002 in all locations. [¶] Pb with median of 0.0002 in all locations. Source: Prepared by the authors. # Kabata and Pendias (2001), range in interval for different soils.

En el caso del Pb, ocurrió lo contrario, por ejemplo, en San José de Ocoa, su contenido fue de 29.44 mg kg⁻¹, superior a la tasa permisible acumulable de metales en suelos de Estados Unidos, Canadá (Kabata y Pendias, 1984) y el estado de Hidalgo, México (Vázquez-Alarcón *et al.*, 2005). Estos valores no exceden los límites de contaminación establecidos por Rodríguez-Eugenio *et al.* (2019), Kabata-Pendias (2010) y Kabata y Pendias (2001) para suelos agrícolas. En suelos dedicados a la producción de arroz en Bonao, Provincia Monseñor Nouel, República Dominicana (sitios influenciados por la minería), Alberto Then *et al.* (2023), presentan valores de Cr (347 mg kg⁻¹) y Ni (92 mg kg⁻¹), muy superiores a lo reportado en este estudio y en el caso de Pb (10 mg kg⁻¹) muy inferiores en comparación con la concentración obtenida en SJO. Estos resultados sugieren que las zonas de producción de arroz de Bonao están cercanas a la minería e incrementan en algunos metales pesados, también sugieren efectos del manejo del cultivo y material parental.

Se presume que la alta presencia de metales pesados obedece al manejo de los sistemas productivos, con especial atención a los plaguicidas, y las fuentes de riego, máxime cuando se han documentado altos niveles precisamente de estos metales pesados en las aguas de los principales ríos usados para la agricultura en la República Dominicana, de acuerdo a los sugerido por Alberto Then *et al.* (2023).

El mayor contenido de Ni (77.8 mg kg⁻¹) se encontró en el suelo de SJO y el menor en Jarabacoa (30.38 mg kg⁻¹), en situación similar al contenido de Villa Trina que fue 40.2 mg kg⁻¹. Estos dos suelos en cuanto al contenido de Ni se encuentran en los límites deseables; en cambio, los suelos de Moca, Constanza y San José de Ocoa, se encuentran con contenidos de Ni (53.67 y 77.8 mg kg⁻¹, respectivamente) que superan el límite superior del rango deseable (Cuadro 4). La concentración de 50.1 mg kg⁻¹ se encuentra en el límite y debería ser considerado para futuros monitoreos y posibles estrategias de remediación. Mientras Delanoy *et al.* (2022b), reportaron concentraciones mayores de Cr, Pb y Ni en suelos cultivados con arroz de San Francisco de Macorís y La Vega, atribuyendo los mismos efectos a las actividades mineras y de manejo del cultivo. Por otro lado, Delanoy *et al.* (2022a), en Castañuela y Esperanza en suelo bajo producción de arroz reportan mayores valores de Cr y Pb e inferiores de Ni, variando con las localidades y suelos. En estudio realizado en suelos agrícolas de azua, Barahona, San Juan de la Maguana, San Jose de Ocoa, Jarabacoa y Constanza, Delanoy *et al.* (2024), reportaron gran variabilidad en las concentraciones de Cr, Ni y Pb, siendo superiores a lo reportado en la Cuadro 4.

En el Cuadro 5, se observa que el Cr excede el límite en los suelos de Jarabacoa, el Ni en Jarabacoa y Constanza, el Cd y Pb en San José Ocoa, pero para estos resultados no se realizó comparación de medias por el amplio rango entre valores mínimos y máximos, debido a la diversidad de suelos y, porque las muestras fueron tomadas entre sitios diferentes y distantes entre sí, como fueron Moca y Villa Trina (provincia Espaillat), Constanza y Jarabacoa (provincia La Vega) y la provincia San José de Ocoa.

Cuadro 5. Concentraciones máximas y mínimas de cromo, níquel, cadmio y plomo en suelos provenientes de invernaderos del Cibao Central (Moca, Villa Trina, Constanza y Jarabacoa) y San José de Ocoa.†
Table 5. Maximum and minimum concentrations of chromium, nickel, cadmium and lead in soils from greenhouses in Cibao Central (Moca, Villa Trina, Constanza y Jarabacoa) and San José de Ocoa.†

Localidad	Concentraciones mínimas y máximas [§] obtenidas [‡]			
	Cr	Ni	Cd	Pb
	----- mg kg ⁻¹ -----			
Villa Trina	10-60	16-61	0.001-0.002	0.002-0.8
Moca	31-47	47-53	0.001-0.002	0.001-0.002
Constanza	7-49	18-83	0.001-0.002	0.001-0.002
Jarabacoa	0.002-233	0.002-118	0.001-0.002	0.001-7.7
San José de Ocoa	17-84	24-104	0.001-4.1	0.002-182.1
Nivel deseado [†]	100	2-100	1-2	10-150
FAO, (Rodríguez-Eugenio <i>et al.</i> , 2019)	70	50	0.2	35
Kabata-Pendias (2010) y Kabata y Pendias (2001)	50-200	20-60	0.001-2.7 [#]	20-300

Cr = cromo; Ni = níquel; Cd = cadmio; Pb = plomo. † Para zonas agrícolas de la República Dominicana. ‡ Por el amplio rango de variabilidad de los datos entre los límites mínimos y máximos no se indican las diferencias estadísticas y en el Cuadro 4 se establecen los análisis para las medias. § Primer valor mínimo y segundo valor máximo (x-x). # Kabata y Pendias (2001), rango en intervalo para diferentes suelos. Elaborado por los autores.

Cr = chromium; Ni = nickel; Cd = cadmium; Pb = lead. † For agricultural areas of the Dominican Republic. ‡ Due to the wide range of variability of the data between the minimum and maximum limits, statistical differences are not indicated and Table 4, establishes the analyzes for the means. § First minimum value and second maximum value (x-x). # Kabata and Pendias (2001), range in interval for different soils. Prepared by the authors.

Los resultados muestran una tendencia a altas concentraciones de Pb y Ni en ambientes protegidos, por encima de los límites permitidos. Además de las posibles fuentes expresadas por Liu, Fan, Cheng y Zeng (2020) y Quispe-Yana *et al.* (2019), estos encontraron que las aguas de regadío son las principales fuentes de contaminación de suelo en producción agrícola en ambiente protegido. En ese sentido, se han hallado contenidos elevados de Ni asociado a actividades mineras en varios ríos de República Dominicana (ejemplo Río Yuna), uno de los principales tributarios de agua de riego para cultivos a cielo abierto en los valles centrales del país. Por otro lado, Cajuste, Alarcón, Grabach, González y de la Isla (2001), mostraron que la acumulación de Pb y Ni en suelos agrícolas, se debe al agua de riego con altos contenidos de estos contaminantes. Los metales se acumulan en el suelo y no suelen movilizarse a los horizontes más profundos, por lo que son disponibles en las capas superficiales donde crecen los vegetales, como lo sugiere Businelli, Massaccesi, Said y Gigliotti (2009). El suelo incrementa las concentraciones de metales pesados cuando se utilizan fertilizantes y plaguicidas para aumentar la producción de los cultivos (Alengebawy *et al.*, 2021). En ese sentido, los suelos con metales pesados tienen el potencial de seguir contaminando las fuentes hídricas durante muchos ciclos productivos.

La correlación entre los contenidos de Zn, P y Fe en el suelo en todas las localidades (Cuadro 6) fue positiva, pero no hubo significancia estadística ($r = 0.12$ a 0.15 ; $P < 0.05$). Lo mismo ocurrió con el Cu y Cr con el Ni, con alta correlación, sin ser estadísticamente diferentes, pues las probabilidades son superiores al $P > 0.05$. El Fe en condiciones hidromórficas consigue formar en el suelo óxidos, hidróxidos y oxihidróxidos, sobre todo en suelos cultivados con arroz (Méndez-Romero, Blanquer, García y Marqués 2003). En ese sentido, Alberto Then *et al.* (2023), reportaron alta correlación entre las concentraciones de metales pesados y las propiedades fisicoquímicas del suelo, lo que podría explicar las correlaciones altamente significativas del Cr, Cu, Zn, Ni y P, mientras que, Méndez-Romero *et al.* (2003) lo asocian a las propiedades edáficas.

En los suelos de Jarabacoa, se encontró correlación positiva de alta significancia entre los contenidos de P con Cu y Zn, Zn con Cu y Ni con Cr ($P \leq 0.05$), en el resto de los casos las correlaciones fueron negativas o inferiores a 0.11 (Cuadro 7). En San José de Ocoa fue una correlación positiva alta y significativa entre Pb con Cd, Mn con Fe y Cd con Cu (Cuadro 8), ($P \leq 0.05$). En Villa Trina-Moca, se observó correlación altamente significativa entre Ni con Cr ($P \leq 0.05$) y significativa el Zn con Fe y P con Cu con correlaciones entre 0.75 y 0.72, respectivamente ($P \leq 0.05$), mientras que en un rango de correlaciones de 0.59 y 0.66 y con significancia estadísticas, se presentan las correlaciones Cr con Cu y P, así como Ni con Cu y P y por último Pb con Cu (Cuadro 9), ($P \leq 0.05$). Estos resultados son explicados con base en lo reportado por Alberto Then *et al.* (2023), en suelos bajo producción de arroz y con pH ácido, donde encontraron que la presencia de metales pesados depende de las propiedades fisicoquímicas del suelo, así como del material parental y el manejo de la plantación. En ese sentido, Méndez-Romero *et al.* (2003), asocian dichos contenidos a las propiedades edáficas.

Cuadro 6. Correlación de Pearson para metales pesados, micronutrientes y P en suelos procedentes de invernaderos de Constanza.
Table 6. Pearson's correlation for heavy metals, micronutrients and P in soils from greenhouses in Constanza.

	Fe	Mn	Cu	Zn	P	Cr	Ni
Fe	1	0.7	0.54	0.12	0.15	0.9	0.74
Mn	-0.46	1	0.76	0.57	0.55	0.4	0.56
Cu	0.66**	0.37	1	0.66	0.69	0.36	0.2
Zn	0.98*	-0.62	0.5	1	0.03	0.98	0.87
P	0.97*	-0.65	0.46	1	1	0.95	0.89
Cr	0.16	0.81**	0.84**	-0.04	-0.08	1	0.16
Ni	0.39	0.64**	0.95*	0.21	0.17	0.97*	1

Fe = hierro; Mn = manganeso; Cu = cobre; Zn = zinc; P = fósforo; Cr = cromo; Ni = níquel. *Alta correlación positiva de Pearson; **Correlación positiva de Pearson entre 0.64 y 0.84. Elaborado por los autores.

Fe = iron; Mn = manganese; Cu = copper; Zn = zinc; P = phosphorus; Cr = chromium; Ni = nickel. *High positive Pearson correlation; **Positive Pearson correlation between 0.64 and 0.84. Prepared by the authors.

Los suelos de Constanza y San José de Ocoa son los que presentaron mayor contaminación por Cr, Ni y Pb. El estudio de Delanoy *et al.* (2024), demuestra esto, ya que reporta concentraciones promedios de Cr de 249 y 257 mg kg⁻¹ para suelos agrícolas de Constanza y Jarabacoa respectivamente; también reporta valores superiores para Ni y Pb, lo que coincide con lo reportado en este estudio. Esto, se encaja en las causas sugeridas por Alloway (2012), para incrementar los contenidos de metales pesados en el suelo (pedogenéticos y antropogénicos). Además, Abollino *et al.* (2002), sugiere la toxicidad de los metales en los tejidos de las plantas o animales o humanos depende no sólo de su concentración, sino también de su movilidad y reactividad, (excepto el Ni y Pb) con otros componentes del ecosistema.

Liu *et al.* (2020), compararon las concentraciones de diversos metales pesados en suelos de producción de vegetales a campo abierto y ambiente protegido, sobresaliendo las concentraciones de Pb, Cr, Cu, Zn, Cd y arsénico (As), resultando los suelos bajo condiciones de invernadero, con concentraciones superiores a los cultivos a cielo abierto; atribuyen esto al incremento de acidez, producida por nitrificación, oxidación de azufre orgánico, oxidación de hierro o manganeso, anaeróbica descomposición de sustancias orgánicas y la amonificación de la urea y otros fertilizantes. Los trabajos de Ming, Tao, Quan, Hui y Jinxia (2016) en China, mostraron la presencia de contaminación por metales pesados en suelos dedicados a la producción de vegetales en ambiente protegido.

Cuadro 7. Correlación de Pearson para metales pesados, micronutrientes y P de suelos procedentes de invernaderos de Jarabacoa.
Table 7. Pearson's correlation for heavy metals, micronutrients, and P in soils from greenhouses in Jarabacoa.

	Fe	Mn	Cu	Zn	P	Cr	Ni	Pb
Fe	1	0.53	0.72	0.7	0.52	0.09	0.04	0.83
Mn	0.17	1	0.69	0.66	0.25	0.39	0.48	0.7
Cu	-0.1	0.11	1	4.30E-04	7.30E-05	0.24	0.87	0.75
Zn	-0.1	-0.12	0.77*	1	5.50E-06	0.16	0.56	0.92
P	-0.17	-0.3	0.83*	0.88*	1	0.24	0.85	0.99
Cr	-0.44	-0.23	-0.31	-0.37	-0.31	1	2.70E-04	0.7
Ni	-0.51	-0.19	-0.04	-0.16	-0.05	0.79*	1	0.8
Pb	-0.06	-0.1	-0.09	-0.03	2.20E-03	-0.1	-0.07	1

Fe = hierro; Mn = manganeso; Cu = cobre; Zn = zinc; P = fósforo; Cr = cromo; Ni = níquel; Pb = plomo. * Alta correlación positiva de Pearson entre 0.77 y 0.88 ($P \leq 0.05$). Elaborado por los autores.

Fe = iron; Mn = manganese; Cu = copper; Zn = zinc; P = phosphorus; Cr = chromium; Ni = nickel; Pb = lead. * High positive Pearson correlation between 0.77 and 0.88 ($P \leq 0.05$). Prepared by the authors.

Cuadro 8. Correlación de Pearson para metales pesados, micronutrientes y P de suelos procedentes de invernaderos de San Jose de Ocoa.
Table 8. Pearson's correlation for heavy metals, micronutrients, and P in soils from greenhouses in San Jose de Ocoa.

	Fe	Mn	Cu	Zn	P	Cr	Ni	Cd	Pb
Fe	1	0.01	0.56	0.35	0.18	0.78	0.45	0.55	0.49
Mn	0.87*	1	0.37	0.36	0.1	0.49	0.28	0.47	0.48
Cu	-0.27	-0.4	1	0.2	0.87	0.31	0.58	0.03	0.08
Zn	-0.42	-0.41	-0.55	1	0.27	0.79	0.77	0.33	0.52
P	-0.57	-0.66	-0.08	0.49	1	0.84	0.21	0.41	0.35
Cr	0.13	0.31	-0.45	-0.13	-0.09	1	0.06	0.88	0.91
Ni	0.34	0.48	-0.26	-0.14	-0.54	0.73**	1	0.6	0.48
Cd	-0.28	-0.33	0.80*	-0.43	-0.37	-0.07	0.24	1	9.60E-05
Pb	-0.31	-0.32	0.70**	-0.30	-0.42	-0.05	0.32	0.98*	1

Fe = hierro; Mn = manganeso; Cu = cobre; Zn = zinc; P = fósforo; Cr = cromo; Ni = níquel; Cd = cadmio; Pb = plomo. * Alta correlación positiva de Pearson entre 0.80 y 0.98 ($P \leq 0.05$); ** Correlación positiva de Pearson entre 0.70 y 0.73 ($P \geq 0.05$). Elaborado por los autores.

Fe = iron; Mn = manganese; Cu = copper; Zn = zinc; P = phosphorus; Cr = chromium; Ni = nickel; Cd = cadmium; Pb = lead. * High positive Pearson correlation between 0.80 and 0.98 ($P \leq 0.05$); ** Positive Pearson correlation between 0.70 and 0.73 ($P \geq 0.05$). Prepared by the authors.

Contenidos de Hierro, Cobre, Zinc, Manganeso y Fósforo en Suelos Dedicados a la Producción de Vegetales en Invernadero

En relación con los resultados del análisis de micronutrientes determinado en las diferentes localidades; se tiene que Jarabacoa presentó un contenido de Fe (98.18 mg kg^{-1}) superior al que presentaron las demás localidades. Sin embargo, este valor se encuentra dentro del rango deseable ($10\text{-}100 \text{ mg kg}^{-1}$). Mientras, Villa Trina presentó contenido promedio de 7.55 mg kg^{-1} , y el nivel más bajo de Fe, el cual además está por debajo del nivel mínimo deseable (10 mg kg^{-1}), al igual que Moca (Cuadro 10).

El Mn y el Zn no presentaron diferencias estadísticas significativas ($P \leq 0.05$) entre localidades y se encuentran dentro de los niveles deseables ($3 \text{ a } 15 \text{ mg kg}^{-1}$) en todos los sitios. El Mg para Jarabacoa es la excepción, su contenido (37.12 mg kg^{-1}) se encuentra dentro del límite deseable por encima de 10 mg kg^{-1} , límite mínimo deseable. Villa Trina y Moca presentan niveles de Mn por debajo del nivel mínimo deseable (Cuadro 10).

Cuadro 9. Correlación de Pearson para metales pesados, micronutrientes y P de suelos procedentes de invernaderos de Villa Trina-Moca.
Table 9. Pearson's correlation for heavy metals, micronutrients and P in soils from greenhouses in Villa Trina-Moca.

	Fe	Mn	Cu	Zn	P	Cr	Ni	Pb
Fe	1	0.18	0.28	2.90E-03	0.22	0.7	0.47	0.23
Mn	0.39	1	0.75	0.15	0.33	0.97	0.82	0.31
Cu	0.32	-0.1	1	0.3	0.01	0.02	0.03	0.01
Zn	0.75**	0.42	0.31	1	0.59	0.72	0.5	0.18
P	0.37	0.29	0.72**	0.17	1	0.02	0.01	0.07
Cr	-0.12	0.01	0.65**	-0.11	0.64**	1	1.20E-05	0.27
Ni	-0.22	-0.07	0.59**	-0.21	0.69**	0.91*	1	0.11
Pb	0.36	-0.31	0.66**	0.39	0.52	0.33	0.47	1

Fe = hierro; Mn = manganeso; Cu = cobre; Zn = zinc; P = fósforo; Cr = cromo; Ni = níquel; Pb = plomo. * Alta significancia correlación positiva de Pearson ($P \leq 0.05$). ** Correlación positiva significativa de Pearson entre 0.59 y 0.75 ($P \leq 0.05$). Elaborado por los autores.

Fe = iron; Mn = manganese; Cu = copper; Zn = zinc; P = phosphorus; Cr = chromium; Ni = nickel; Pb = lead. * High significance positive Pearson correlation ($P \leq 0.05$). **Significant positive Pearson correlation between 0.59 and 0.75 ($P \leq 0.05$). Prepared by the authors.

Cuadro 10. Comparación de medias de las concentraciones de micronutrientes y fósforo (P) de cinco sitios seleccionados en República Dominicana.
Table 10. Comparison of means of micronutrient and phosphorus (P) concentrations of five selected sites in the Dominican Republic.

Localidades	Concentraciones de medias encontradas (mg kg ⁻¹) en suelo ^{††}				
	Fe [†]	Mn [†]	Cu [§]	Zn [¶]	P [#]
Villa Trina	7.55±1.45 a	1.93±0.42 a	2.89±0.45 a	3.63±0.44 a	184.77±58.4 ab
Moca	8.8±6.50 a	0.95±0.45 a	5.35±0.55 ab	3.10±0.90 a	507.5±125.5 ab
Constanza	17.97±7.22 a	3.90±0.46 ab	2.93±0.72 a	4.63±1.99 a	103.0±3.0 a
SJO	34.4±14.99 a	30.0±13.5 a	7.74±0.41 ab	3.31±0.57 a	540.29±117.88 ab
Jarabacoa	98.18±15.67 b	37.12±17.91 b	9.91±1.75 b	7.93±1.56 a	519.81±126.36 b
Rangos deseados	10-100	10-50	3-15	3-15	>28

SJO = San José de Ocoa; ^{††} Medias con una letra común entre valores de la misma columna indican diferencias significativas ($P \leq 0.05$). [†] Fe con mediana de 13.9, 87.4, 8.8, 9.1 y 5.4 para Constanza, Jarabacoa, Moca, SJO y Villa Trina, respectivamente. [‡] Mg con mediana de 3.6, 9.75, 0.95, 9.5 y 1.5 para Constanza, Jarabacoa, Moca, SJO y Villa Trina, respectivamente. [§] Cu con mediana de 3.6, 8.85, 5.35, 7.1 y 3.0 para Constanza, Jarabacoa, Moca, SJO y Villa Trina, respectivamente. [¶] Zn con mediana de 3.44, 6.25, 1.27, 1.51 y 1.58 para Constanza, Jarabacoa, Moca, SJO y Villa Trina, respectivamente. [#] P con mediana de 100.0, 303.5, 507.5, 696.0 y 69.0 para Constanza, Jarabacoa, Moca, SJO y Villa Trina, respectivamente. Elaborado por los autores.

SJO = San José de Ocoa; ^{††} Means with a common letter between values in the same column indicate significant differences ($P \leq 0.05$). [†] Fe with median of 13.9, 87.4, 8.8, 9.1 and 5.4 for Constanza, Jarabacoa, Moca, SJO and Villa Trina, respectively. [‡] Mg with median of 3.6, 9.75, 0.95, 9.5 and 1.5 for Constanza, Jarabacoa, Moca, SJO and Villa Trina, respectively. [§] Cu with median of 3.6, 8.85, 5.35, 7.1 and 3.0 for Constanza, Jarabacoa, Moca, SJO and Villa Trina, respectively. [¶] Zn with median of 3.44, 6.25, 1.27, 1.51 and 1.58 for Constanza, Jarabacoa, Moca, SJO and Villa Trina, respectively. [#] P with median of 100.0, 303.5, 507.5, 696.0 and 69.0 for Constanza, Jarabacoa, Moca, SJO and Villa Trina, respectively. Prepared by the authors.

El cobre en los suelos presentó contenido (9.91 mg kg⁻¹) significativamente superior ($P \leq 0.05$) en Jarabacoa en comparación con el contenido de Villa Trina (2.89 mg kg⁻¹) y Constanza (2.93 mg kg⁻¹) y similar al contenido de Moca (5.35 mg kg⁻¹) y Ocoa (7.74 mg kg⁻¹). El P presentó diferencia estadística en San José de Ocoa con 540.29 mg kg⁻¹, superior al de Constanza (103 mg kg⁻¹) y similar al de las demás localidades. Sin embargo, el contenido de P en los suelos, en todas las localidades, fue muy alto en relación con los niveles deseables (> 28 mg kg⁻¹), esto podría ser atribuido a la frecuencia y dosis de aplicación. No obstante, cabe recordar que, este mineral puede ser un elemento constitutivo natural de los suelos (Martínez-Cruz, Ortiz y Raigón 2017), por lo que se descartan los altos valores debido a la incidencia de fuentes externas. El P puede estar secuestrado en minerales como la fosforita, o inclusive en formas libres en la solución del suelo, por lo que en este estudio su alto contenido no se asocia con una alarma. Mientras, López *et al.* (2014), encontraron un rango de 10.3 a 49.48 mg kg⁻¹ y promedio de 29.89 mg kg⁻¹ por debajo de lo encontrado en este estudio, mientras que los contenidos de Fe, Mn, Cu y Zn fueron similares. Liu *et al.* (2020), reportaron niveles superiores de estos micronutrientes en suelos provenientes de ambiente protegidos en comparación con el sistema de campo abierto, y caso contrario reporta para el Ni, y es posible que este asociado con la dosis y fuente de fertilizante aplicado. Esto podría ser explicado en función del tipo de suelo y sus propiedades, por lo tanto, esto incide en las concentraciones de los elementos analizados. Además, Ming *et al.* (2016), reportan que el Zn es el micronutriente en menor concentración en suelos de China dedicados a la producción de vegetales en invernaderos, con tendencias similares a las obtenidas en este estudio.

CONCLUSIONES

Los resultados mostraron que, en los suelos de muestras provenientes de los sistemas de producción en ambiente protegido, hay altas concentraciones de los metales pesados Pb y Ni, y del elemento P, por encima de los límites permitidos. En algunas localidades (Cr en Constanza, Ni en Moca-Constanza-San José de Ocoa (SJO), Cd en SJO y Pb en SJO), se excedieron los límites establecidos por la FAO para estos metales pesados en suelos agrícolas y otros estándares internacionales establecidos por diversos autores y reportados en este estudio. En ese sentido no es un tema de alarma para este tipo de estudio por la cantidad de muestras analizadas, pero si se constituye una alerta para estos sistemas de producción en ambiente protegido, pues en estos se produce alimento y son productos de exportación. Esto por el entendido de que en la investigación se muestran evidencias de concentraciones altas de Cr, Ni, Pb y otros microelementos en varios estudios realizados en el país. En ese sentido, por la incidencia de este sistema productivo en las exportaciones y la generación de divisas y considerando las exigencias de inocuidad esto debería mover a nuevas investigaciones en un área mayor en sistemas y áreas.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos utilizados o analizados durante el estudio actual están disponibles por el autor correspondiente a solicitud razonable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Administración del proyecto, adquisición de fondos, formulación de la investigación, ejecución en campo, análisis de datos, preparación del borrador original, sometimiento y seguimiento a la revista: P.A.N.R. Participó en la fase de campo, organización de data y revisión de borrador: I.A. Responsable fase de campo y revisión de borrador: E.A.Q. Responsable de tabulación y análisis de datos y revisión borrador: A.P. Planificación de muestreos de suelos, análisis de laboratorio y revisión de borrador: G.L.R. Responsable del análisis de datos y revisión borrador: C.M. Colaborador en la preparación del borrador original, revisión y edición final para el sometimiento: C.M., R.E.R.N.

AGRADECIMIENTOS

Al Ministerio de Educación Superior Ciencia y Tecnología (MESCyT) por el financiamiento del proyecto FONDOCYT "Caracterización de suelos y sustratos en la producción de vegetales en invernaderos del Cibao Central y San José de Ocoa (MESCyT-IDIAF-2008-2-D3-027), dentro del cual se realizó esta investigación, a través del Fondo Nacional de Innovación y Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDOCYT). Se agradece a los 40 productores de vegetales en invernaderos de las cinco localidades por permitir los muestreos de suelo en sus infraestructuras. Se agradece al investigador Victor Camilo Pulido-Blanco por la revisión del escrito en todas sus partes.

LITERATURA CITADA

- Abollino, O., Aceto, M., Malandrino, M., Mentaste, E., Sarzanini, C., & Barberis, R. (2002). Distribution and mobility of metals in contaminated sites. Chemometric Investigation of Pollutant Profiles. *Environmental Pollution*, 119(2), 177-193. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00333-5](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00333-5)
- Alberto Then, N. M., Delanoy, R., Rodríguez-Alberto, D., Méndez-Henández, R., Díaz-Rizo, O., & Bello, L. (2023). Heavy Metal Pollution Assessment in the Agricultural Soils of Bonao, Dominican Republic. *Sustainability*, 15(23), 16510. <https://doi.org/10.3390/su152316510>
- Alengebawy, A., Abdelkhalek, S. T., Qureshi, S. R., & Wang, M. Q. (2021). Heavy metals and pesticides toxicity in agricultural soil and plants: Ecological risks and human health implications. *Toxics*, 9(3), 1-33. <https://doi.org/10.3390/toxics9030042>
- Alloway, B. J. (2012). *Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability*. United Kingdom: Springer Science & Business Media.
- Alloway, B. J. (2013). *Heavy metals in soils, trace metals and metalloids in soils and their bioavailability* (3^{ra} ed.). Reading, United Kingdom: Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4470-7>
- Arroyave-Silva, M. S., & Restrepo-Correa, F. J. (2009). Análisis de la contaminación del suelo: revisión de la normativa y posibilidades de regulación económica. *Semestre Económico*, 12(23), 13-34.
- Businelli, D., Massaccesi, L., Said-Pullicino, D., & Gigliotti, G. (2009). Long-term distribution, mobility and plant availability of compost-derived heavy metals in a landfill covering soil. *Science of the Total Environment*, 407(4), 1426-1435. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.10.052>
- Cajuste, L. J., Alarcón, A. V., Grabach, C. D. S., González, G. A., & de la Isla, M. D. L. (2001). Cadmio, níquel y plomo en agua residual, suelo y cultivos en el Valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Agrociencia*, 35(3), 267-274.
- CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment). (2023). Scientific Criteria Document for the Development of the Canadian Soil and Groundwater Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health: Perfluorooctane sulfonate (PFOS). Consultada el 21 de noviembre, 2023, desde <https://ccme.ca/en/resources/soil-and-groundwater>

- Céspedes, D. G., Calderón, P. A., Romero, J. L. S., Gutiérrez, L. R., Cazorla, L. L., Luna, L. G., & Rieumont, S. O. (2015). Evaluación de la gestión ambiental en agroecosistemas con potencial de riesgos para la salud por presencia de metales pesados. *Revista Científica Interdisciplinaria Investigación y Saber*, 4(1), 45-56.
- Chaves-Bedoya, G., Ortiz-Moreno, M. L., & Ortiz-Rojas, L. Y. (2013). Efecto de la aplicación de agroquímicos en un cultivo de arroz sobre los microorganismos del suelo. *Acta Agronómica*, 62(1), 66-72.
- Cuellas, M. V. (2017). Horticultura periurbana, análisis de la fertilidad de los suelos en invernaderos. *Chilean Journal of Agricultural and Animal Sciences*, 33(2), 163-173. <http://dx.doi.org/10.4067/S0719-38902017005000502>
- Delanoy, R., Espinosa, C. M., & Herrera, Y. (2022a). Heavy metals in the northwest agricultural region dominican republic. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 10(5), 16-24. <https://doi.org/10.4236/gep.2022.105002>
- Delanoy, R., Espinosa, C. M., & Herrera, Y. (2022b). Heavy metals in agricultural soils of San Francisco de Macorís and La Vega, Dominican Republic. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 10(10), 54-65. <https://doi.org/10.4236/gep.2022.1010005>
- Delanoy, R., Matos-Espinosa, C., & Santos, Y. (2024). Heavy metals in agricultural soils of Constanza, Jarabacoa, San José de Ocoa, Azua, Barahona and San Juan de la Maguana, Dominican Republic, 2022. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 12, 64-79. <https://doi.org/10.4236/gep.2024.121005>
- Delince, W., Valdés-Carmenate, R., López-Morgado, O., Guridi-Izquierdo, F., & Balbín-Arias, M. I. (2015). Riesgo agroambiental por metales pesados en suelos con Cultivares de *Oryza sativa* L y *Solanum tuberosum* L. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 24(1), 44-50.
- Di Rienzo, J. A., Balzarini, M. G., González, L., Casanoves, F., Tablada, M., & Robledo, C. W. (2008). *InfoStat. Manual del Usuario*. Córdoba, Argentina: Editorial Brujas.
- Hu, X. F., Jiang, Y., Shu, Y., Hu, X., Liu, L., & Luo, F. (2014). Effects of mining wastewater discharges on heavy metal pollution and soil enzyme activity of the paddy fields. *Journal of Geochemical Exploration*, 147, 139-150.
- Kabata, P. A., & Pendias, H. (1984). *Trace elements in soils and plants*. Boca Ratón, FL, USA: CRC Press.
- Kabata-Pendias, A., & Pendias, H. (2001). *Trace elements in soil and plants* (3rd Ed.). Boca Ratón, FL, USA: CRC press LLC.
- Kabata-Pendias, A. (2010). *Trace elements in soil and plants*. (4th Ed.). Boca Raton, FL, USA: CRC press. ISBN 9781420093704.
- Kruskal, W. H., & Wallis, W. A. (1952). Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. *Journal of the American Statistical Association*, 47(260), 583-621.
- Kwon, S. I., Jang, Y. A., Kim, K. H., Jung, G. B., Kim, M. K., Hwang, H., ... & Kim, K. R. (2012). Heavy metal chemistry in soils received long-term application of organic wastes. *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*, 1(1), 1-9. <https://doi.org/10.4236/jacen.2012.11001>
- Liu, Q., Fan, C., Cheng, F., & Zeng, J. (2020). Health risk assessment of heavy metals in suburban vegetable soils from open fields and greenhouses in Jilin City, an Industrial City in China. *Journal of Environmental Health*, 83(3), 14-21.
- López, G., Almonte, I., Pérez, A., Sotomayor-Ramírez, D., & Núñez, P. A. (2014). Caracterización biológica de suelos y sustratos empleados en la producción de vegetales en invernaderos. *Revista Argentina de la Ciencia del Suelo*, 32(1), 29-39.
- Maradiaga, G. (2016). *Análisis de la cadena de valor de vegetales de invernadero en la República Dominicana*. Santo Domingo, República Dominicana: IESC Consultado el 8 de febrero, 2024, desde https://adoexpo.org/wp-content/uploads/2022/06/Informe_VegInvernaderos_ECI_3v-2.pdf
- Martínez-Cruz, M., Ortiz-Pérez, R., & Raigón, M. D. (2017). Contenido de fósforo, potasio, zinc, hierro, sodio, calcio y magnesio, análisis de su variabilidad en accesiones cubanas de maíz. *Cultivos Tropicales*, 38(1), 92-101.
- Méndez-Romero, F., Blanquer, J. G., García-Díaz, J., & Marqués-Mateu, Á. (2003). Relación estadística entre metales pesados y propiedades de suelos de cultivo regados con aguas residuales no depuradas. *Interciencia*, 28(5), 281-286.
- Ming, C., Tao, Y., Quan, Y., Hui, X., & Jinxia, N. (2016). Characterization of heavy metal pollution in vegetable field soils and health risk assessment in Dayu County, China. *INMATEH-Agricultural Engineering*, 48(1), 1-8.
- MARD (Ministerio de Agricultura de la República Dominicana). (2013). Agricultura inicia cosecha de invierno de vegetales en invernaderos. Noticias. Santo Domingo, República Dominicana. Consultada el 20, marzo, 2021 desde <http://agricultura.gob.do/noticia/agricultura-inicia-cosecha-de-invierno-de-vegetales-en-invernaderos/>
- MARD (Ministerio de Agricultura de la República Dominicana). (2018). Memoria Institucional 2018. Santo Domingo, República Dominicana. Consultada el 8, febrero, 2021 desde <https://agricultura.gob.do/transparencia/categoria/memorias-institucionales/>
- MARD (Ministerio de Agricultura de la República Dominicana). (2019). Memoria Institucional 2019. Consultada el 15, febrero, 2021, desde <https://agricultura.gob.do/transparencia/categoria/memorias-institucionales/>
- MARD (Ministerio de Agricultura de la República Dominicana). (2020). Memoria Institucional 2020. Consultada el 15, febrero, 2021, desde <https://agricultura.gob.do/transparencia/categoria/memorias-institucionales/>
- MARD (Ministerio de Agricultura de la República Dominicana). (2022). Memoria Institucional 2022. Consultada el 15, febrero, 2021, desde <https://agricultura.gob.do/transparencia/categoria/memorias-institucionales/>
- MARD (Ministerio de Agricultura de la República Dominicana). (2023). Memoria Institucional 2023. Consultada el 15, febrero, 2023, desde <https://agricultura.gob.do/transparencia/categoria/memorias-institucionales/>
- MINAM (Ministerio del Ambiente). (2013a). *Cuadernillo de Normas Legales, Decreto supremo N° 002-2013-MINAM*. Consultado el 8 de noviembre, 2013, desde <https://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2013/10/D-S-N-002-2013-MINAM>.
- MINAM (Ministerio del Ambiente). (2013b). *Normas Legales. Estándar de Calidad Ambiental (ECA) como la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el aire, agua o suelo*. Lima, Perú: MINAM. Consultado el 25, noviembre, 2023 desde <https://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2013/10/D-S-N-002-2013-MINAM.pdf>
- Núñez, P., Pimentel, A., Almonte, I., Sotomayor-Ramírez, D., Martínez, N., Pérez, A., & Céspedes, C. (2011). Soil fertility evaluation of coffee (*Coffea* spp.) production systems and management recommendations for the Barahona province, Dominican Republic. *Journal Soil Science and Plant Nutrition*, 11(1), 127-140. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162011000100010>
- Núñez-Ramos, P. A., Almonte, I., & Ureña, J. M. (2020). *Caracterización de suelos en tres zonas forestales de República Dominicana*. Concepción de la Vega, República Dominicana: Instituto Dominicano de Investigaciones Agropecuarias y Forestales.
- Olsen, S. R., Cole, C. V., Watanabe, F. S., & Dean, L. A. (1954). *Estimation of available phosphorus in soil by extraction with sodium bicarbonate*. Washington, D.C., USA: USDA.
- ONE (Oficina Nacional de Estadísticas de la República Dominicana). (2013). Estadísticas. Consultado el 10, junio, 2021 desde <https://www.one.gob.do/>

- PROMEFRIN (Programa de Mercadeo de Frigoríficos e Invernaderos). (2009). Estadísticas. Consultado el 10, junio, 2021 desde <https://agricultura.gob.do/category/estadisticas-agropecuarias/>
- Quispe-Yana, R. F., Belizario-Quispe, G., Chui-Betancur, H. N., Huaquisto-Cáceres, S., Calatayud-Mendoza, A. P., & Yábar Miranda, P. S. (2019). Concentración de metales pesados: cromo, cadmio y plomo en los sedimentos superficiales en el río Coata, Perú. *Revista Boliviana de Química*, 36(2), 83-90.
- Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Lagos, M. D., & Jiménez, E. E. G. (2016). Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Ingeniería Investigación y Desarrollo: I2+ D*, 16(2), 66-77.
- Rodríguez-Sáenz, D., & Riveros-Serrato, H. (2016). Esquemas de comercialización que facilitan la vinculación de productores agrícolas con los mercados. San José, Costa Rica: IICA. Consultado el 14 de noviembre, 2021, desde <https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/8680/BVE20027741e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rodríguez-Eugenio, N., McLaughlin, M., & Pennock, D. (2019). *La contaminación del suelo: Una realidad oculta*. Roma, Italia: FAO. ISBN: 978-92-5-131639-9
- Severino, J. (2016). Invernaderos, principal activo de la agricultura dominicana. Consultada el 15 de mayo, 2021, desde <https://eldinero.com.do/24724/invernaderos-principal-activo-de-la-agricultura-dominicana/>
- Shen, W., Hu, M., Qian, D., Xue, H., Gao, N., & Lin, X. (2021). Microbial deterioration and restoration in greenhouse-based intensive vegetable production systems. *Plant and Soil*, 463, 1-18.
- Smith, S. R. (1996). *Agricultural recycling of sewage sludge and the environment*. Wallingford, United Kingdom: CAB-International.
- Soledad-Rodríguez, B. E. (2011). *La contaminación ambiental y sus consecuencias toxicológicas*. España: Editorial Lulu.
- Vázquez-Alarcón, A., Cajuste, L. J., Carrillo-González, R., Zamudio-González, B., Álvarez-Sánchez, E., & Castellanos-Ramos, J. Z. (2005). Límites permisibles de acumulación de cadmio, níquel y plomo en suelos del Valle del Mezquital, Hidalgo. *Terra Latinoamericana*, 23(4), 447-455.
- Xu, L., Lu, A., Wang, J., Ma, Z., Pan, L., Feng, X., & Luan, Y. (2015). Accumulation status, sources and phytoavailability of metals in greenhouse vegetable production systems in Beijing, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 122, 214-220.
- Zepeda-Jazo, I. (2018). Manejo sustentable de plagas agrícolas en México. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 15(1), 99-108.