

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA



**EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE ELEMENTOS TRAZA EN
ENMIENDAS ORGÁNICAS PARA SUELOS COMERCIALIZADAS EN CHILLÁN**

POR

VICENTE IGNACIO BELTRÁN MORAGA

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

CHILLÁN – CHILE
2026

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA

**EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE ELEMENTOS TRAZA EN
ENMIENDAS ORGÁNICAS PARA SUELOS COMERCIALIZADAS EN CHILLÁN**

POR

VICENTE IGNACIO BELTRÁN MORAGA

**MEMORIA PRESENTADA A LA
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÓNOMO.**

CHILLÁN – CHILE
2026

Aprobada por:

Profesor Asistente. Winfred Espejo C.
Médico Veterinario, Dr.

Guía

Profesor Asociado, Marco Sandoval E.
Ing. Agrónomo, Dr.

Asesor

Profesor Asociado. Christian Guajardo F.
Ing. Agrónomo, Dr.

Asesor

Profesor Asociado, Manuel Faúndez.
Ing. Agrónomo, M. Sc.

Decano

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
Resumen.....	1
Summary.....	1
Introducción.....	2
Materiales y métodos.....	7
Resultados y discusión.....	10
Conclusiones.....	24
Referencias.....	25

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

		Página
Tabla 1	Rangos fisicoquímicos de referencia NCh 2880	5
Tabla 2	Concentraciones máximas de metales pesados permitidas en compost Clase A NCh 2880	6
Tabla 3	Concentraciones máximas de metales pesados permitidas en compost Clase B NCh 2880	6
Tabla 4	Enmiendas orgánicas: Asignación numérica, tipo de enmienda y origen	8
Tabla 5	Análisis químicos de enmiendas orgánicas	11
Tabla 6	Concentración de elementos traza en enmiendas orgánicas. Medida resumen y análisis de la varianza	12
Figura 1	Análisis de componentes principales PCA	14

EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE ELEMENTOS TRAZA EN ENMIENDAS ORGÁNICAS PARA SUELOS COMERCIALIZADAS EN CHILLÁN

ASSESSMENT OF TRACE ELEMENT CONCENTRATIONS IN COMMERCIALLY MARKETING ORGANIC SOIL AMENDMENTS IN CHILLÁN

Palabras índice adicionales: Metales pesados; Compost; Riesgo ambiental; Abono; Normativa ambiental; Compostaje.

RESUMEN

La creciente comercialización de enmiendas orgánicas en la agricultura chilena, especialmente en Chillán, ha generado la necesidad de evaluar su calidad química y su impacto ambiental. Se planteó que estas presentan alta variabilidad fisicoquímica y en metales. El objetivo fue evaluar estos parámetros y compararlos con la norma NCh 2880. Se analizaron pH, conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (MO), carbono orgánico y humedad, junto con cuantificación multielemental por espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES). El 90% de las muestras cumplió con el pH normativo, aunque el 60% presentó alta salinidad, destacando M7 (7,47 dS/m). Todas superaron el 20% de MO, con M8 alcanzando 54,7%. Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Níquel (Ni) y Plomo (Pb) estuvieron bajo límites de Clase A, mientras Cobre (Cu) y Zinc (Zn) mostraron mayor variabilidad clasificándose como Clase B. El análisis de componentes principales (PCA) explicó el 86,4% de la variabilidad, diferenciando productos según carga metálica. Se concluye que existe alta heterogeneidad composicional, reforzando la necesidad de monitoreo y cumplimiento de la Ley 21.349 para asegurar la inocuidad química.

SUMMARY

The increasing commercialization of organic amendments in Chilean agriculture, particularly in Chillán, has created the need to evaluate their chemical quality and environmental impact. It was hypothesized that these materials exhibit high physicochemical and metal-related variability. The objective was to assess these

parameters and compare them with the Chilean standard NCh 2880. Key properties analyzed included pH, electrical conductivity (EC), organic matter (OM), organic carbon, and moisture content, along with multielemental quantification using inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES). Results showed that 90% of the samples met the regulatory pH range; however, 60% exhibited high salinity, with sample M7 reaching 7.47 dS/m. All samples exceeded the minimum OM requirement of 20%, with M8 attaining 54.7%. Trace elements Cadmium (Cd), Chrome (Cr), Nickel (Ni), and Lead (Pb) were below Class A limits, whereas Copper (Cu) and Zinc (Zn) showed greater variability, classifying several samples as Class B. Principal component analysis (PCA) explained 86.4% of the total variance, allowing differentiation of products based on their metal load. It is concluded that there is substantial compositional heterogeneity among commercially available amendments, highlighting the need for individual monitoring and compliance with Law 21,349 to ensure chemical safety.

INTRODUCCIÓN

Una enmienda orgánica se define legalmente como cualquier producto o mezcla de sustancias de origen orgánico que, al incorporarse al suelo, tiene como objetivo modificar o mejorar sus características físicas, químicas o biológicas, aumentando su estabilidad estructural, la retención de agua y la disponibilidad de nutrientes esenciales (Tsabedze *et al.*, 2025). Durante el proceso, estos materiales experimentan transformaciones químicas y biológicas que determinan su madurez y su capacidad para aportar nutrientes sin producir efectos fitotóxicos (Bernal & Albuquerque., 2009). Por su parte, el compost es específicamente el producto resultante del proceso de compostaje, compuesto por materia orgánica estabilizada y madura, donde ya no se reconoce el origen de sus materias primas debido a su degradación en partículas finas y oscuras. La principal diferencia radica en que el término "enmienda orgánica" es una categoría amplia que engloba a diversos mejoradores de suelo (incluyendo abonos y productos orgánicos), mientras que el compost es un tipo particular de enmienda orgánica que ha pasado por un proceso biológico controlado de estabilización e higienización. No obstante, su aporte no

siempre está exento de riesgos, pues diversos estudios han demostrado que las enmiendas orgánicas pueden contener concentraciones detectables de elementos traza, dependiendo del tipo de residuo utilizado y del proceso de elaboración (Rodríguez *et al.*, 2014). Estos elementos, al acumularse en el suelo, pueden afectar la microbiota, la disponibilidad de nutrientes y la absorción por los cultivos, especialmente en suelos contaminados o de historial agrícola intensivo (Madejón *et al.*, 2008).

Los elementos traza son un grupo de elementos químicos que pueden ser tóxicos para el medioambiente y la salud humana (Alloway., 2012), entre estos elementos se encuentran el Cadmio (Cd), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Níquel (Ni), Plomo (Pb) y Zinc (Zn). Corresponden a elementos presentes en bajas concentraciones, pero cuya acumulación puede representar riesgos ambientales y sanitarios. La acumulación de estos elementos en suelos puede derivar en riesgos para la salud humana a través de la cadena alimentaria o por exposición directa, especialmente en el caso de elementos como Pb, Cr y Ni, reconocidos por su potencial tóxico (Domingo & Nadal, 2009). En este contexto, la evaluación específica de elementos traza en enmiendas orgánicas comerciales resulta fundamental para garantizar su uso seguro y evitar incrementos indeseados en la carga metálica de los suelos agrícolas (Ding *et al.*, 2017). A nivel del suelo, estos elementos pueden incrementar su concentración debido a diversas fuentes antropogénicas como fertilizantes, estiércoles, emisiones industriales y pesticidas, constituyendo un problema global que afecta la calidad del suelo, el rendimiento agrícola y la salud humana (Wan *et al.*, 2024). La calidad de las enmiendas orgánicas también es un factor determinante, ya que productos comerciales pueden presentar variabilidad significativa en su contenido de elementos traza, lo que subraya la necesidad de regulaciones estrictas y evaluaciones periódicas de su inocuidad antes de su uso agrícola (Tomati *et al.*, 2002). Estudios sobre la dinámica química de la MO extraíble en enmiendas orgánicas muestran que parámetros como el pH, la CE y el contenido de MO influyen de manera directa en la movilidad, especiación y comportamiento de elementos traza en las enmiendas, afectando su estabilidad y disponibilidad en el suelo (Said-Pullicino *et al.*, 2006). El pH es uno de

los factores más determinantes, pues incrementos en su valor favorecen la adsorción y retención de metales en las fases sólidas, reduciendo su movilidad y la cantidad disponible para las plantas (Kargar *et al.*, 2016). Por su parte, la MO cumple un rol clave en inmovilizar elementos traza a través de la formación de compuestos más complejos con grupos funcionales orgánicos y humificados, redistribuyendo los elementos desde fracciones intercambiables o solubles hacia fracciones unidas a la MO o a sustancias húmicas más estables, este proceso disminuye su disponibilidad biológica y su movilidad en el suelo. (Ma *et al.*, 2023). En contraste, la CE, asociada a la concentración de sales solubles, puede influir negativamente en la retención de elementos traza y afectar la fisiología vegetal. Estudios indican que aumentos en la CE explican más del 50 % de los efectos negativos observados en suelos enmendados, debido a que las sales solubles afectan procesos de absorción y competencia iónica (Hong-tao Liu & Guo, 2020). Niveles de CE elevados pueden generar efectos fitotóxicos asociados a estrés salino, condicionando la absorción vegetal y exacerbando la acumulación de metales en tejidos vegetales cuando existe competencia iónica desfavorable (Agnew & Leonard, 2003).

La regulación de las concentraciones de elementos traza y los parámetros pH, CE y MO en enmiendas orgánicas son un componente esencial para asegurar su uso seguro en suelos agrícolas y ambientales, debido a su potencial toxicidad y capacidad de acumulación en el sistema suelo-planta. La Norma Chilena NCh 2880 establece la clasificación y los requisitos de calidad para el compost, incluyendo límites estrictos para las concentraciones máximas de metales pesados o elementos traza para asegurar que el producto no represente un riesgo. El uso de esta norma como parámetro para evaluar enmiendas orgánicas comerciales se justifica bajo la Ley 21.349, la cual regula la composición y comercialización de fertilizantes, incluyendo explícitamente a las enmiendas en su alcance. Esta ley exige que los fabricantes informen sobre la presencia de impurezas o contaminantes en las etiquetas y faculta al Servicio Agrícola y Ganadero (SAG) para determinar los parámetros de calidad y los rangos de tolerancia aplicables. Dado que la NCh 2880 es la referencia técnica oficial en Chile para productos orgánicos estabilizados, sus

criterios de inocuidad química proporcionan el respaldo técnico necesario para cumplir con el objetivo de la ley de prevenir riesgos para la salud humana, animal o la sanidad vegetal.

En la NCh 2880, la calidad y aptitud de los compost destinados a su aplicación en suelos se evalúan mediante un conjunto de parámetros fisicoquímicos y límites de contaminantes establecidos en la normativa vigente. Entre los principales indicadores se consideran el pH, el contenido de MO, la CE y la humedad, los cuales permiten determinar su estabilidad y valor agronómico (Tabla 1). Asimismo, la normativa define concentraciones máximas permisibles de metales pesados en base seca, diferenciando entre compost de Clase A y Clase B según su nivel de restricción y potencial riesgo ambiental. La Clase A presenta límites más estrictos, lo que permite un uso más amplio y seguro, mientras que la Clase B admite mayores concentraciones, condicionando su aplicación (Tablas 2 y 3). En conjunto, estos criterios contribuyen a resguardar la calidad del suelo y prevenir efectos adversos sobre el medio ambiente.

Tabla 1. Rangos fisicoquímicos de referencia NCh 2880

Parámetros	Rangos
pH	5,0-8,5
Materia orgánica MO (%)	>20
Conductividad eléctrica CE (dS/m)	Clase A <3 Clase B ≤8
Carbono orgánico (%)	---
Humedad (%)	30-45

Muchos países emplean estándares que clasifican compost según riesgo, como los de la Unión Europea, Canadá y Estados Unidos, que establecen rangos de referencia de Cd entre 0,7 – 10 mg/kg, Cu entre 70 – 600 mg/kg y Zn entre 210 – 4000 mg/kg, utilizados como marco comparativo cuando no existen normas locales (Manungufala *et al.*, 2007). Desde esta perspectiva, la norma chilena se inserta en un marco regulatorio internacional que busca minimizar riesgos ambientales y promover el uso seguro del compost como enmienda orgánica.

Tabla 2. Concentraciones máximas de metales pesados permitidas en compost Clase A NCh 2880

Metal pesado	Concentración máxima mg/kg (base seca)
Cadmio	2
Cobre	100
Cromo	120
Níquel	20
Plomo	100
Zinc	200

Tabla 3. Concentraciones máximas de metales pesados permitidas en compost Clase B NCh 2880

Metal pesado	Concentración máxima mg/kg (base seca)
Cadmio	8
Cobre	1000
Cromo	600
Níquel	80
Plomo	300
Zinc	2000

La ciudad de Chillán, caracterizada por una importante actividad agrícola y suelos de uso intensivo, presenta condiciones que favorecen la incorporación de enmiendas orgánicas como estrategia para mejorar la fertilidad, estructura y capacidad de retención de agua del suelo. En este contexto, el uso de compost y otros materiales orgánicos comercializados en la zona se ha incrementado como alternativa sostenible para el manejo de nutrientes y la recuperación de suelos degradados.

La relevancia de esta investigación radica en la necesidad crítica de asegurar la calidad química e inocuidad de los insumos utilizados en la agricultura moderna, en un contexto de transición hacia prácticas más sostenibles y de economía circular. Realizar este estudio en la ciudad de Chillán adquiere una importancia estratégica, dado que es el núcleo administrativo y productivo de la Región de Ñuble, una zona con una profunda vocación agrícola. Al evaluar las enmiendas que se comercializan

localmente, se genera información técnica esencial para proteger la productividad de los suelos de la región y se garantiza que el beneficio de la MO no se vea comprometido por la presencia de contaminantes. Esto permite, además, proporcionar un respaldo científico que oriente a los agricultores de la zona en la utilización segura de insumos, contribuyendo directamente a la seguridad alimentaria y a la protección de los ecosistemas locales.

HIPOTESIS

Las enmiendas orgánicas comercializadas en la ciudad de Chillán presentan una variabilidad significativa en sus propiedades fisicoquímicas y concentraciones de elementos traza, existiendo productos que no cumplen con los límites máximos permitidos por la normativa chilena NCh 2880.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar las propiedades fisicoquímicas y la concentración de elementos traza de diversas enmiendas orgánicas comerciales, contrastando los resultados con los parámetros establecidos en la Norma Chilena NCh 2880.

Objetivos específicos

1. Caracterizar las propiedades fisicoquímicas (pH, CE, contenido de MO y humedad) de las enmiendas orgánicas comercializadas en Chillán.
2. Cuantificar, las concentraciones totales de Cd, Cu, Cr, Ni, Pb y Zn de cada enmienda orgánica, mediante ICP-OES.
3. Comparar las concentraciones detectadas con los niveles máximos permitidos para compost Clase A y Clase B según la norma NCh 2880.

MATERIALES Y MÉTODOS

Las enmiendas orgánicas fueron obtenidas en el comercio en la ciudad de Chillán, en viveros, casas comerciales y un productor casero, se analizaron 10 enmiendas orgánicas de las cuales 4 son compost clase A, 3 son compost, 1 compost casero,

1 fertilizante natural y 1 sustrato a base de compost. Las muestras fueron tomadas por el método de cuarteo para obtener una muestra representativa, una vez obtenida la muestra representativa esta fue llevada a secar en horno por 24 horas a una temperatura de 65 °C hasta llegar a peso constante, luego de secar las muestras, estas fueron molidas en un mortero de cerámica. Una vez molidas las muestras, estas se depositaron en bolsas, donde se les asignó un etiquetado numérico para simplificar el proceso y asegurar su correcta identificación y trazabilidad durante las etapas posteriores de análisis.

Tabla 4. Enmiendas orgánicas: Asignación numérica, tipo de enmienda y origen

Muestra	Tipo de enmienda orgánica	Origen declarado
M1	Compost clase A	Residuos agroindustriales
M2	Compost clase A	Residuos domiciliarios
M3	Compost clase A	Residuos domiciliarios
M4	Compost	Residuos industriales
M5	Compost	Residuos domiciliarios
M6	Compost clase A	Residuos industriales
M7	Compost casero	Residuos domiciliarios
M8	Fertilizante natural	Residuos agroindustriales
M9	Sustrato a base de compost	No especifica
M10	Compost	Residuos forestales

El número asignado a cada enmienda se utiliza de forma correlativa para facilitar la presentación de resultados en las tablas subsiguientes. La clasificación de "Compost Clase A" refiere al cumplimiento declarado por el fabricante según la normativa chilena vigente.

Análisis de elementos traza en enmiendas orgánicas

Para cada muestra, se pesaron 250 mg de la enmienda orgánica seca y se colocaron en vasos de teflón de 50 mL. Se adicionaron 2,5 mL de ácido nítrico (HNO_3) en dilución 1:1, se mezcló cuidadosamente, se cubrió con vidrio reloj y se calentó a 95 °C durante 15 minutos, evitando la ebullición. Luego, las muestras se dejaron enfriar. Posteriormente, se agregaron 1,25 mL de HNO_3 concentrado, se cubrió nuevamente con vidrio reloj y se realizó reflujo por 30 minutos. Transcurrido este tiempo, las muestras se calentaron a 95 °C durante 2 horas y luego se dejaron enfriar nuevamente. Se añadió entonces 0,25 mL de agua grado 1 y 0,75 mL de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) al 30 %. Las muestras se cubrieron con vidrio reloj hasta que la efervescencia disminuyera y se dejaron enfriar. A continuación, se

continuó añadiendo H_2O_2 al 30 % en alícuotas de 0,25 mL, con calentamiento, hasta que la efervescencia fuera mínima. Luego, las muestras se cubrieron con vidrio reloj y se calentaron a 95 °C durante 2 horas más. Posteriormente, se agregaron 2,5 mL de ácido clorhídrico (HCl) concentrado, se cubrieron nuevamente y se calentaron a 95 °C durante 15 minutos, para luego dejar enfriar. El líquido resultante fue filtrado utilizando papel Whatman® N°41. El filtrado se colectó en matraces aforados de 25 mL. La cuantificación de los elementos traza (Cd, Cu, Cr, Pb, Ni, Zn) se realizó mediante ICP-OES, el análisis se realizó conforme a la norma chilena NCh 3634, en el Laboratorio de Biogeoquímica Aplicada del Departamento de Suelos y Recursos Naturales, Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción, Campus Chillán.

Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA) para determinar la existencia de diferencias significativas entre las distintas enmiendas orgánicas evaluadas. En los casos donde se detectaron diferencias significativas ($P \geq 0,05$) se procedió a realizar una prueba de comparación de medias de Tukey. Todos los procedimientos estadísticos, incluyendo el cálculo de medidas de resumen (promedios y desviaciones estándar), se ejecutaron utilizando el software estadístico InfoStat, permitiendo así la discriminación jerárquica de las concentraciones de elementos traza y parámetros químicos mediante la asignación de grupos de significancia.

Análisis de componentes principales (PCA)

Con el propósito de sintetizar la variabilidad y determinar las interrelaciones de las concentraciones de elementos traza evaluados (Cd, Cu, Cr, Ni, Pb y Zn), se realizó un PCA. Este análisis multivariado permitió reducir la dimensionalidad de los datos y facilitar la discriminación jerárquica de los productos según su carga total. El procedimiento se ejecutó mediante el software estadístico R, utilizando una matriz de correlación para estandarizar las variables y asegurar que cada elemento contribuyera de manera equitativa al análisis independientemente de su magnitud.

Los resultados fueron interpretados a través de la varianza acumulada por los dos primeros componentes principales y visualizados mediante un gráfico de biplot para identificar las correlaciones espaciales entre las muestras y los vectores de cada elemento traza.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La caracterización fisicoquímica de las enmiendas orgánicas comerciales analizadas, que incluye la evaluación de parámetros clave como pH, MO, CE, carbono orgánico y humedad, se presenta en la Tabla 5. En cuanto al pH, la mayoría de los productos (90%) se encuentran dentro del rango de referencia de 5,0 a 8,5 establecido por la norma chilena NCh 2880, con una tendencia general hacia la neutralidad y alcalinidad moderada. La única excepción fue el compost casero (M7), que con un pH de 8,86 superó el límite máximo permitido, lo que podría indicar una alta concentración de bases o inestabilidad en su proceso de elaboración. Respecto a la salinidad, medida a través de la CE, se observó que el 60% de las muestras superaron el límite para compost Clase A (<3 dS/m), clasificándose mayoritariamente como Clase B (≤ 8 dS/m); destaca nuevamente la muestra M7 con el valor más elevado (7,47 dS/m), lo que representa un riesgo potencial de fitotoxicidad si no se gestiona adecuadamente. Por otro lado, todas las enmiendas cumplieron satisfactoriamente con el requisito mínimo de MO ($>20\%$), con valores que oscilaron entre el 22% (M10) y el 54,7% (M8), demostrando una alta riqueza orgánica apta para la mejora de suelos. Finalmente, parámetros como el carbono orgánico y la humedad también mostraron variabilidad, con la muestra M8 registrando el mayor contenido de carbono (30,4%) y la M7 el nivel más alto de humedad (59,9%), superando los rangos ideales de referencia. En conjunto, estos resultados evidencian una heterogeneidad significativa en la calidad fisicoquímica de las enmiendas evaluadas, lo que refuerza la necesidad de un control más estricto en su producción y comercialización. Asimismo, las desviaciones observadas en ciertos parámetros podrían influir directamente en la respuesta agronómica de los suelos, condicionando su manejo y aplicación, así como la eficiencia de las prácticas de rehabilitación y productividad asociadas a estos sistemas edáficos.

Tabla 5. Análisis químicos de enmiendas orgánicas

Enmienda	Tipo	pH	MO (%)	CE (dS/m)	Carbono orgánico (%)	Humedad (%)
M1	Compost clase A	7,19	34	4,56	18,88	24
M2	Compost clase A	7,41	31,3	3,43	17,37	34,1
M3	Compost clase A	7,24	33,9	3,17	18,83	24,4
M4	Compost clase B	7,42	45,2	4,03	25,12	38,3
M5	Compost	6,98	29,1	2,71	16,14	18,1
M6	Compost clase A	6,81	37,7	2,57	20,94	28,3
M7	Compost casero	8,86	38,3	7,47	21,25	59,9
M8	Fertilizante natural	7,27	54,7	5,4	30,4	51,3
M9	Sustrato a base de compost	6,17	38,4	1,96	21,32	29,1
M10	Compost clase B	8,16	22	1,7	12,23	34,5

MO: Materia Orgánica; CE: Conductividad Eléctrica; dS/m: deciSiemens por metro. Los valores corresponden a la caracterización física y química de las muestras secas a 65°C hasta peso constante. Los análisis se realizaron en el Laboratorio de suelo de la Universidad de Concepción.

El análisis estadístico evidenció que las enmiendas orgánicas (M1–M10) presentaron diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0,05$) en las concentraciones de todos los metales evaluados (Cd, Cu, Cr, Ni, Pb y Zn), lo que indica una marcada heterogeneidad en su composición química, probablemente asociada al origen y a las características propias de cada material (Tabla 6). En el caso del (Cd), las concentraciones variaron significativamente entre las enmiendas, con valores promedio que oscilaron entre 0,11 mg/kg(M6) y 0,25 mg/kg (M8). El análisis estadístico permitió identificar a M8 como la enmienda con concentraciones significativamente superiores al resto, mientras que la enmienda 6, 5 y 9 presentaron los valores más bajos, sin diferencias significativas entre ellas.

Para el Cu, se observaron diferencias altamente significativas entre enmiendas, con un rango amplio de concentraciones 29,78 mg/kg (M10) hasta 197,84 mg/kg (M8). Las enmiendas M10, M6, M5 y M7 conformaron el grupo de menor

concentración, mientras que M8 presentó valores significativamente superiores, diferenciándose estadísticamente de todas las demás enmiendas. Las enmiendas M1, M2, M3 y M4 mostraron concentraciones intermedias.

Tabla 6. Concentración de elementos traza en enmiendas orgánicas (mg/kg): promedio y coeficiente de variación.

Enmienda	Cd	Cu	Cr	Ni	Pb	Zn
M1	0,15 ± 0,02 ^{abc}	121,21 ± 6,86 ^{bc}	24,62 ± 1,43 ^e	9,70 ± 0,27 ^{cd}	9,56 ± 0,80 ^{ef}	158,27 ± 3,11 ^{de}
M2	0,16 ± 0,03 ^{bc}	132,92 ± 7,47 ^{bc}	20,80 ± 1,40 ^d	9,88 ± 0,73 ^{cd}	9,52 ± 0,19 ^{ef}	138,64 ± 3,49 ^{cd}
M3	0,17 ± 0,02 ^{bc}	140,52 ± 2,24 ^c	17,67 ± 0,88 ^{cd}	8,66 ± 0,64 ^{bc}	8,33 ± 0,63 ^{de}	127,19 ± 0,26 ^c
M4	0,19 ± 0,03 ^c	149,00 ± 3,49 ^c	20,89 ± 1,56 ^d	9,58 ± 0,70 ^{cd}	8,95 ± 0,43 ^{ef}	162,13 ± 11,41 ^e
M5	0,12 ± 0,02 ^{ab}	43,13 ± 5,25 ^a	11,70 ± 1,33 ^{ab}	6,81 ± 1,32 ^{ab}	5,83 ± 0,20 ^c	66,43 ± 4,61 ^a
M6	0,11 ± 0,01 ^a	30,74 ± 4,28 ^a	14,56 ± 2,28 ^{bc}	9,44 ± 1,38 ^c	3,26 ± 0,57 ^b	77,84 ± 1,90 ^{ab}
M7	0,16 ± 0,01 ^{bc}	58,01 ± 2,93 ^a	18,22 ± 0,48 ^d	4,60 ± 0,12 ^a	7,16 ± 0,18 ^{cd}	192,40 ± 9,92 ^f
M8	0,25 ± 0,01 ^d	197,84 ± 15,30 ^d	25,68 ± 0,43 ^e	10,87 ± 0,81 ^{cd}	9,90 ± 0,80 ^f	214,07 ± 4,40 ^g
M9	0,14 ± 0,02 ^{ab}	102,73 ± 34,71 ^b	9,99 ± 0,78 ^a	6,20 ± 0,49 ^a	6,24 ± 0,18 ^c	88,90 ± 15,04 ^b
M10	0,17 ± 0,02 ^{bc}	29,78 ± 1,34 ^a	14,38 ± 0,39 ^{bc}	11,73 ± 0,03 ^d	1,77 ± 0,32 ^a	69,87 ± 2,11 ^{ab}

Los valores se presentan como la media de las repeticiones ± la desviación estándar. Concentraciones expresadas en mg/kg. Letras distintas en una misma columna indican diferencias estadísticamente significativas según la prueba de análisis de varianza (ANOVA) y test de comparación de medias ($P \leq 0,05$).

El Cr también mostró variabilidad significativa entre enmiendas, con concentraciones promedio entre 9,99 mg/kg (M9) y 25,68 mg/kg (M8). Las enmiendas M1 y M8 presentaron las concentraciones más elevadas y

estadísticamente similares entre sí, mientras que la enmienda M9 y M5 registraron los valores más bajos.

En relación con el Ni, las concentraciones oscilaron entre 4,60 mg/kg (M7) y 11,73 mg/kg (M10). Las enmiendas M7, M9 y M5 conformaron el grupo de menor concentración, mientras que M10 presentó valores significativamente superiores, seguido por M8, M2 y M1, que no difirieron estadísticamente entre sí.

El Pb, presentó diferencias altamente significativas entre enmiendas, con valores que variaron desde 1,77 mg/kg (M10) hasta 9,90 mg/kg en (M8). Las enmiendas M10 y M6 presentaron las concentraciones más bajas, mientras que las enmiendas M8, M1, M2 y M4 registraron los valores más altos, conformando los grupos estadísticamente superiores.

Finalmente, el Zn presentó la mayor variabilidad entre enmiendas, con concentraciones promedio entre 66,43 mg/kg (M5) y 214,07 mg/kg (M8). Destacándose las enmiendas M8 y M7 como las enmiendas con concentraciones significativamente mayores, mientras que las enmiendas M5, M10 y M6 presentaron los valores más bajos.

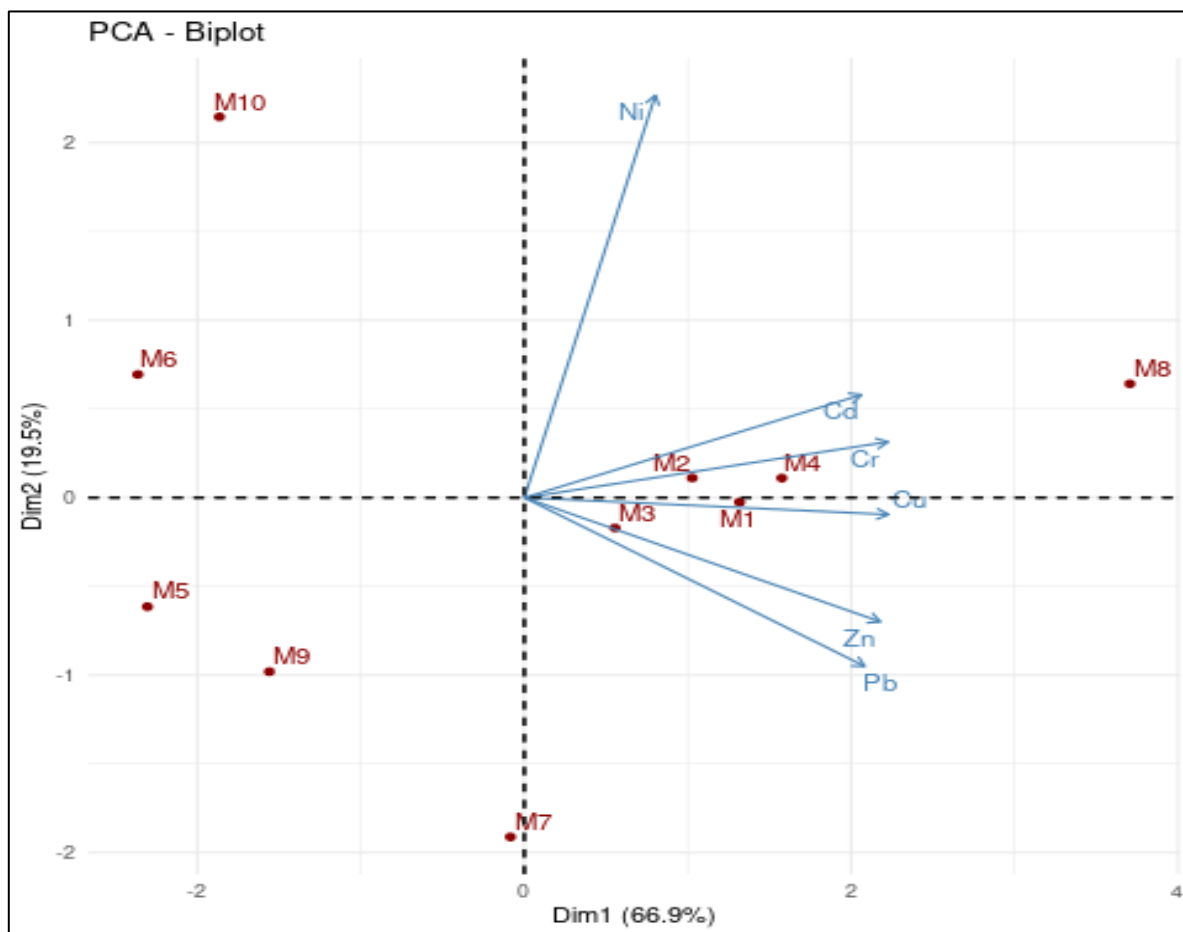
Los resultados demuestran que las diferentes enmiendas orgánicas presentan composiciones contrastantes, lo que resalta la importancia de su caracterización individual previa a su aplicación, particularmente en contextos donde existen riesgos potenciales de acumulación de metales en el suelo

El PCA (Figura 1) permitió sintetizar la variabilidad de las concentraciones de metales pesados en las enmiendas orgánicas (M1 - M10). Los dos primeros componentes explicaron en conjunto 86,4 % de la variabilidad total, siendo el Componente Principal 1 (Dim1) responsable del 66,9 % y el Componente Principal 2 (Dim2) del 19,5 %

El eje Dim1 está dominado principalmente por Zn, Pb y Cu, cuyos vectores presentan alta contribución y orientación similar, indicando una fuerte correlación positiva entre estos metales. En este eje se separan claramente las enmiendas con mayor carga metálica, destacándose M8, ubicada hacia valores positivos elevados de Dim1, asociada a altas concentraciones de Zn, Pb y Cu. En contraste, M5, M6 y M9 se posicionan en el extremo negativo del eje, reflejando bajas concentraciones

relativas de estos metales, lo que sugiere una menor presión potencial por metales pesados. Las enmiendas M1, M2, M3 y M4 se agrupan en posiciones intermedias del eje, indicando composiciones metálicas similares y concentraciones moderadas de Zn, Pb y Cu.

Figura 1. Análisis de Componentes Principales (PCA) basado en las concentraciones de elementos traza determinadas en enmiendas de suelos.



El eje Dim2 está principalmente influenciado por el Ni, cuyo vector se orienta casi verticalmente, evidenciando una baja correlación con Zn, Pb y Cu. Este componente permite discriminar enmiendas según su contenido relativo de Ni. En este contexto, M10 se asocia fuertemente a valores positivos de Dim2, indicando una mayor contribución de Ni, mientras que M7 se ubica en valores negativos, reflejando un comportamiento opuesto.

La proximidad angular entre los vectores de Zn y Pb indica una correlación

positiva muy alta, sugiriendo un origen común o un comportamiento geoquímico similar en las enmiendas orgánicas. El Cu muestra una correlación positiva moderada con ambos metales, mientras que Cd y Cr presentan asociaciones más débiles, situándose en posiciones intermedias del plano factorial. El Ni, en cambio, muestra una relación independiente, contribuyendo principalmente a la variabilidad explicada por Dim2.

En conjunto, el PCA evidencia que las enmiendas orgánicas presentan composiciones metálicas contrastantes, permitiendo identificar materiales con mayor potencial de acumulación de metales pesados (especialmente M8) y otros con menor carga metálica (M5, M6 y M9). Estos resultados resaltan la utilidad del PCA como herramienta exploratoria para la clasificación y selección de enmiendas orgánicas, particularmente en contextos donde es necesario minimizar riesgos asociados a la incorporación de metales pesados al suelo.

El análisis del pH en las enmiendas orgánicas evaluadas reveló una tendencia hacia la neutralidad y la alcalinidad ligera, con valores que oscilaron entre 6,17 (M9) y 8,86 (M7). Al contrastar estos resultados con la norma nacional NCh 2880, la cual establece un rango de referencia de 5,0 a 8,5, se observa que el 90 % de las muestras comerciales cumplen con el estándar de calidad para su uso agrícola. No obstante, la enmienda 7 (Compost casero) registró un pH de 8,86, superando el límite máximo permitido, lo que sugiere una posible inestabilidad en el proceso de compostaje o una alta concentración de bases. Los valores de pH obtenidos para las enmiendas orgánicas comerciales exceptuando M7 son consistentes con lo reportado por Rotondo *et al.* (2009), quienes en su estudio sobre enmiendas orgánicas en cultivos hortícolas observaron valores de pH estables entre 7,4 y 7,8 para compost y cama de pollo. Esta coincidencia refuerza la idea de que los procesos industriales de compostaje tienden a estabilizar el material en rangos de alcalinidad moderada, lo cual es beneficioso para la mayoría de los suelos agrícolas de la zona central y sur de Chile que presentan tendencias hacia la acidez. Desde una perspectiva de seguridad ambiental, el pH de las enmiendas juega un rol crítico en la dinámica de los elementos traza analizados en este estudio. Según Huaraca-Fernandez *et al.* (2020) el pH es uno de los factores más influyentes en la

biodisponibilidad de metales pesados como Cd. Un incremento en el pH favorece la adsorción y retención de estos metales por los coloides del suelo, reduciendo su movilidad y absorción por parte de las plantas. En este sentido, el carácter ligeramente alcalino de muestras como M10 (8,16) y la misma M7 (8,86) podría actuar como un mecanismo de mitigación de la fitotoxicidad al promover la formación de complejos y precipitados menos solubles de elementos como Cu, Zn, Cd y Pb (Huaraca-Fernandez *et al.*, 2020).

La CE es un indicador indirecto de la concentración de sales solubles en las enmiendas, un parámetro crítico para evitar el estrés osmótico en los cultivos. Según la norma chilena NCh 2880, el límite máximo para compost Clase A es de 3dS/m y de compost Clase B ≤ 8 dS/m. Los resultados obtenidos muestran que el 60% de las muestras analizadas superan este umbral, ubicándose en el parámetro establecido para compost Clase B ≤ 8 , destacando negativamente la enmienda M7 (7,47 dS/m). En contraste, solo las muestras M5 (2,71 dS/m), M6 (2,57 dS/m), M9 (1,96 dS/m) y M10 (1,70 dS/m) cumplen satisfactoriamente con la normativa para Clase A. La elevada salinidad en M7 (Compost casero) puede atribuirse al origen de sus materias primas. Como señalan Aimituma-Franco *et al.* (2023), las enmiendas derivadas de estiércoles animales suelen presentar una alta carga iónica debido a las sales presentes en las dietas de los animales, las cuales se concentran durante el proceso de descomposición. Estos valores elevados representan un riesgo potencial de fitotoxicidad; una CE superior a los límites permitidos puede alterar la estabilidad estructural del suelo, aumentando su densidad aparente y reduciendo la permeabilidad (Zhang *et al.*, 2015). No obstante, la aplicación de estas enmiendas en suelos ya degradados por salinidad presenta una dualidad técnica. Si bien M7 aporta una carga salina inicial alta, estudios realizados por Zhang *et al.* (2015) sugieren que, a largo plazo, el aporte de MO mejora la porosidad y la lixiviación de sales en suelos salinos costeros, permitiendo una reducción neta de la CE del suelo tras procesos de riego. Este efecto de biorremediación también es respaldado por Aimituma-Franco *et al.* (2023), quienes observaron que la incorporación de enmiendas orgánicas facilita el intercambio catiónico. A pesar de estos beneficios potenciales en suelos específicos, para un uso general en

horticultura, los valores registrados en muestras como la M7 obligarían a los productores a realizar aplicaciones fraccionadas o lavados de sales para evitar daños en plántulas sensibles.

En cuanto a la MO, todas las enmiendas evaluadas cumplieron con el requisito mínimo de >20% de MO establecido por la norma chilena NCh 2880 para compost Clase A y B. Los valores registrados fluctuaron entre un 22% (M10) y un 54,7% (M8), lo que demuestra una amplia variabilidad en la riqueza orgánica de los productos comerciales disponibles en Chillán. Esta variabilidad está estrechamente relacionada con el origen de las materias primas y el proceso de estabilización. Según Huerta *et al.* (2010), el uso de fracciones orgánicas recogidas selectivamente (FORM) tiende a generar un compost con MO más estable y de mejor calidad en comparación con aquellas separadas mecánicamente. En este sentido, la enmienda 8 destacó por presentar el mayor contenido de MO (54,7%), aunque también registró las concentraciones más elevadas de metales como Cu, Cr y Pb, lo que sugiere que un alto contenido de MO no garantiza por sí solo la inocuidad del producto si la materia prima original está cargada de elementos traza. El rol de la MO en la mitigación de riesgos ambientales es crítico. Kwiatkowska-Malina. (2018), señala que los ácidos húmicos y fúlvicos presentes en la MO poseen una alta capacidad de sorción, lo que permite la inmovilización de metales pesados y reduce su biodisponibilidad. Este proceso de formación de complejos estables con sustancias húmicas es vital para proteger las aguas subterráneas y la cadena alimentaria. No obstante, la eficacia de esta inmovilización depende del grado de madurez del material. Al respecto, Clemente *et al.* (2006), demostraron que los compost con un alto grado de madurez presentan una mineralización de carbono significativamente menor (3,8%) en comparación con materiales frescos como el estiércol (24%), lo que favorece una redistribución de los metales hacia fracciones menos móviles y más estables asociadas a la MO. En consecuencia, si bien todas las muestras cumplen con la normativa nacional en cuanto a cantidad de MO, la estabilidad de esta fracción orgánica es la que finalmente determinará el comportamiento de los elementos traza tras su aplicación al suelo. Las enmiendas con mayores porcentajes de MO, M8 y M4 poseen un mayor potencial teórico para

formar complejos de metales, siempre y cuando su proceso de humificación haya sido completo, evitando así la liberación de metales que suele ocurrir durante las etapas iniciales de degradación de la materia orgánica fresca.

Las concentraciones de Cd fueron significativamente bajas, con un rango que osciló entre 0,11 mg/kg (M6) y 0,25 mg/kg (M8). Al contrastar estos resultados con el marco regulatorio nacional, se confirma que todos los productos cumplen holgadamente con los límites de la NCh 2880, que establece un máximo de 2 mg/kg para la Clase A y 8 mg/kg para la Clase B. Estos niveles son notablemente inferiores a los reportados por Tapia *et al.* (2010), quienes, al evaluar diversos materiales compostados para la inmovilización de metales, encontraron concentraciones de hasta 1,63 mg/kg en compost de biosólidos, valor que, aunque superior a los de este estudio, seguía considerándose seguro para aplicaciones agrícolas. La baja presencia de Cd en las muestras analizadas es un indicador positivo de la calidad de las materias primas utilizadas en las enmiendas comercializadas en Chillán. No obstante, más allá de la concentración total, la importancia de estas enmiendas radica en su capacidad para gestionar el Cd ya presente en el suelo. Ahmad *et al.* (2014) sostienen que las enmiendas orgánicas, como el compost, no solo mejoran el estado nutricional del suelo, sino que también pueden mitigar la toxicidad del Cd mediante la formación de complejos estables, reduciendo su disponibilidad para las plantas. Esto sugiere que productos como la M8, que presentó el mayor contenido de MO (54,7%) junto con la mayor concentración de Cd (0,25 mg/kg), podrían paradójicamente ofrecer una mayor protección contra la fitotoxicidad gracias a su alta capacidad de formación de complejos organometálicos. Este comportamiento se alinea con lo observado por Shuman (1998), quien investigó el efecto de enmiendas orgánicas en las fracciones de Cd en el suelo. Sus hallazgos indican que la adición de materiales orgánicos como el compost de champiñón o estiércol tiende a redistribuir el Cd desde las fracciones más lábiles o intercambiables hacia fracciones más estables asociadas a la MO y óxidos. El uso de las enmiendas orgánicas comerciales evaluadas en este análisis no solo representa un aporte despreciable de Cd al sistema, sino que, debido a su composición orgánica, podrían actuar como agentes de estabilización para los elementos traza, disminuyendo el

riesgo de lixiviación o absorción vegetal, tal como lo proponen Tapia *et al.* (2010), al destacar al compost como una herramienta eficaz para la recuperación de suelos contaminados por Cd.

El análisis del contenido de Cr en las enmiendas orgánicas evaluadas arrojó valores que fluctuaron entre 9,99 mg/kg (M9) y 25,68 mg/kg (M8). Al contrastar estos resultados con los criterios de calidad de la NCh 2880, se determina que la totalidad de las muestras cumple con el límite máximo para el Compost Clase A (120 mg/kg) y, por tanto, se sitúan muy por debajo del límite de la Clase B (600 mg/kg). Estos niveles indican que las enmiendas comerciales disponibles en la zona de Chillán presentan un bajo riesgo de fitotoxicidad por Cr y son seguras para su uso en agricultura intensiva. Bolan *et al.* (2003) demostraron que la aplicación de diversas enmiendas orgánicas, como el compost de biosólidos y estiércoles, acelera significativamente la tasa de reducción de Cr(VI) a Cr(III), la relevancia del Cr en el suelo no solo depende de su concentración total, sino de su estado de oxidación, siendo el Cr(VI) altamente tóxico y móvil en comparación con el Cr(III). La adición de MO juega un rol remediador fundamental. Este proceso está estrechamente ligado al contenido de carbono orgánico disuelto (COD), el cual actúa como agente reductor, transformando la forma más peligrosa del metal en una forma menos soluble y disponible para las plantas (Bolan *et al.*, 2003). Asimismo, la incorporación de estas enmiendas induce cambios en la partición del Cr en el suelo. Rendina *et al.* (2011) observaron que las enmiendas orgánicas favorecen el paso de Cr desde las fracciones más lábiles (extraíbles con agua o sales) hacia fracciones unidas a la MO y óxidos de hierro. Este mecanismo de redistribución hacia formas más estables coincide con la naturaleza de las muestras analizadas en este estudio, donde el aporte de MO estable, (especialmente en muestras con altos porcentajes de MO como (M8), no solo aporta nutrientes, sino que refuerza la función de barrera del suelo contra la lixiviación de metales (Rendina *et al.*, 2011). Al comparar los resultados de este análisis con la literatura internacional, se observa que las concentraciones de Cr obtenidas (9,99 a 25,68 mg/kg) son similares a las reportadas en estudios de caracterización de enmiendas similares. Por ejemplo, Bolan *et al.* (2003) reportaron niveles de Cr que variaron desde 9 mg/kg en estiércol

de caballo hasta 23 mg/kg en compost de biosólidos. Esto es crucial, ya que niveles bajos de Cr total, sumados a la capacidad reductora de la MO descrita por Bolan *et al.* (2003), garantizan que la disponibilidad de formas tóxicas como el Cr(VI) sea prácticamente nula en estos productos.

El Cues un micronutriente esencial para el desarrollo vegetal, pero en concentraciones elevadas puede inducir fitotoxicidad y afectar la microbiota del suelo. Los resultados obtenidos en este estudio para las diez enmiendas orgánicas muestran una alta variabilidad, con concentraciones que fluctúan entre 29,78 mg/kg (M10) y 197,84 mg/kg (M8). Al contrastar estos valores con la Norma Chilena NCh 2880, se observa un panorama heterogéneo. Las muestras (M5, M6, M7 y M10) cumplen con el límite de la Clase A (100 mg/kg). No obstante, las muestras M1 (121,21 mg/kg), M2 (132,92 mg/kg), M3 (140,52 mg/kg), M4 (149,00 mg/kg), M8 (197,84 mg/kg), M9 (102,73 mg/kg) clasifican como Clase B (límite 300 mg/kg). Esta disparidad en los resultados es notable al compararlos con estudios similares. Dueñas-Rivadeneira y Flor (2022) reportaron en su evaluación de abonos orgánicos concentraciones de Cu significativamente menores, 0,4949 mg/kg en humus y 0,4557 mg/kg en compost, lo que sugiere que las materias primas de algunas enmiendas comercializadas en Chillán tienen un origen con mayor carga de este metal, posiblemente vinculado a residuos de actividades ganaderas donde se utilizan suplementos cúpricos o aplicaciones fitosanitarias intensivas. A pesar de las altas concentraciones totales en algunas muestras, la dinámica del Cu está fuertemente influenciada por la matriz orgánica. Jones *et al.* (2016), señalan que la aplicación de compost y biochar mejora la inmovilización de Cu(II) en el suelo debido a la alta afinidad de este metal por los grupos funcionales de las sustancias húmicas. En este sentido, el alto contenido de MO observado en las muestras podría mitigar la disponibilidad inmediata del metal. Janoš *et al.* (2010) refuerzan esta idea al demostrar, mediante extracciones secuenciales, que el Cu tiende a asociarse preferentemente a la fracción orgánica del suelo, reduciendo su lixiviación en comparación con otros metales como el Cd. Desde la perspectiva de la conservación del suelo, Montoya *et al.* (2019) destacan que, si bien las enmiendas orgánicas son fundamentales para mejorar las propiedades fisicoquímicas y la

fertilidad, su uso debe ser monitoreado para evitar la acumulación de metales a largo plazo. En consecuencia, aunque el aporte de MO es beneficioso, el exceso de Cu detectado en muestras etiquetadas como compost Clase A representa un riesgo potencial de acumulación en el perfil del suelo si se realizan aplicaciones reiteradas, lo que resalta la importancia de cumplimientos bajo la NCh 2880 para proteger la sostenibilidad de los sistemas agrícolas locales.

Las concentraciones de Ni detectadas en las diez enmiendas orgánicas comerciales mostraron un rango que varió entre 4,60 (M7) y 11,73 mg/kg (M10). Al evaluar estos resultados bajo la Norma Chilena NCh 2880, se observa que la totalidad de los productos analizados cumplen estrictamente con el límite establecido para el Compost Clase A (20 mg/kg) y, por consiguiente, para la Clase B (80 mg/kg). López-Núñez *et al.* (2020), analizaron una amplia gama de enmiendas donde los niveles de Ni alcanzaron desde 1,23 mg/kg en fertilizantes orgánicos hasta 134.1 mg/kg en lodos de depuradora, valores que superan ampliamente los detectados en las muestras M1 a M10. Incluso al comparar con compost de residuos municipales procesados bajo normativas europeas, los niveles de este análisis son bajos. López *et al.* (2014), reportaron que, tras años de mejora en la recolección selectiva en Sevilla, los niveles de Ni descendieron de 60 mg/kg a 36,5 mg/kg, cifra que aún duplica el promedio de las enmiendas evaluadas en este análisis. Por otro lado, los resultados de este análisis se alinean estrechamente con estudios de enmiendas de alta calidad o de origen específico. Asimismo, Welikala *et al.* (2018), encontraron concentraciones de 13,0 a 15,0 mg/kg en compost de residuos verdes y biosólidos, valores que son prácticamente idénticos a los obtenidos en la mayoría de las muestras. La baja presencia de Ni en las muestras es un indicador de la gestión adecuada de las materias primas. En este sentido, López *et al.* (2014), destacan que la implementación de sistemas de recolección selectiva de residuos sólidos urbanos ha permitido reducir significativamente contenido de Ni en los compost a lo largo de una década. Desde el punto de vista de la dinámica del metal en el suelo, el uso de estas enmiendas ofrece ventajas significativas para la seguridad ambiental. Welikala *et al.* (2018), señalan que, la presencia de sustancias orgánicas aromáticas en el compost reduce la movilidad del Ni, limitando su

biodisponibilidad para las plantas. Por lo tanto, el aporte de estas enmiendas al suelo no solo representa un riesgo nulo de contaminación por Ni, sino que la matriz orgánica que las compone favorece la retención y estabilización del metal, disminuyendo su potencial fitotóxico en el agroecosistema.

Las concentraciones de Pb determinadas en las enmiendas evaluadas 1,77 mg/kg (M10) a 9,90 mg/kg (M8) se encuentran significativamente por debajo de los niveles de alerta ambiental y muestran una consistencia notable con enmiendas de origen orgánico controlado. Al comparar estos resultados con los obtenidos por Wang *et al.* (2024), se observa una coincidencia estrecha con sus hallazgos en compost de residuos de cultivo de hongos (14,09 mg/kg) y biochar (30,98 mg/kg), lo que sugiere que las enmiendas comerciales de la zona de Chillán mantienen estándares de pureza comparables a insumos diseñados específicamente para la inmovilización de metales. Asimismo, Pichtel & Bradway (2008) reportaron niveles de Pb de 4,5 mg/kg en estiércol de granja y 6,5 mg/kg en turba compostada. Por el contrario, el contraste es drástico al comparar con compost derivado de residuos sólidos municipales (RSU) sin una separación en origen rigurosa. Zennaro *et al.* (2005) documentaron en plantas de compostaje en Italia concentraciones de Pb que oscilan entre 73 y 276 mg/kg. El hecho de que los valores de este análisis, en promedio, 15 veces menores a los reportados por Zennaro *et al.* (2005), subraya la alta calidad de las materias primas utilizadas en la fabricación de las enmiendas locales y garantiza que su aplicación prolongada no representaría un riesgo de acumulación de Pb en el perfil del suelo. El impacto de las enmiendas no se limita a la cantidad total del metal, sino a su distribución en las fracciones del suelo. Estudios realizados por Pichtel & Bradway (2008), demuestran que la aplicación de materiales orgánicos estabilizados, como la turba compostada, induce un desplazamiento del Pb desde las fracciones más lábiles (intercambiables y ligadas a carbonatos) hacia fracciones menos biodisponibles, principalmente la fracción ligada a la MO y la fracción residual. En sus experimentos, el uso de enmiendas permitió que el Pb se mantuviera en formas geoquímicas estables, incluso en suelos con niveles críticos de contaminación, lo que valida la seguridad del uso de las enmiendas analizadas en este trabajo para prevenir la lixiviación de metales. La

dinámica del Pb también está fuertemente influenciada por el pH del sistema. La incorporación de enmiendas orgánicas suele ejercer un efecto amortiguador (buffer) o, en muchos casos, un incremento del pH edáfico. Zennaro *et al.* (2005), señalan que, en procesos de compostaje de residuos sólidos municipales, la maduración del producto es clave: un compost bien estabilizado favorece la formación de complejos organometálicos insolubles. En el caso de las muestras de Chillán, el hecho de ser enmiendas comerciales sugiere un grado de madurez que, sumado a sus bajos niveles de Pb, garantiza que el metal presente se encuentre en formas altamente estables, minimizando el riesgo de traslocación hacia los tejidos vegetales de cultivos destinados al consumo humano.

Respecto a las concentraciones de Zn encontradas en las enmiendas orgánicas analizadas, los valores oscilaron entre 66,43 mg/kg (M5) y 214,07 mg/kg (M8). Al contrastar estos resultados con los límites establecidos por la norma chilena NCh 2880 (2004), se observa que casi la totalidad de las muestras se encuentran por debajo del límite máximo para Compost Clase A (200 mg/kg), con excepción de la muestra M8 (Fertilizante natural), la cual excedió levemente dicho umbral con un valor de 214,07 mg/kg. No obstante, todas las muestras, incluyendo M8 y la muestra M7 (192,40 mg/kg), se mantienen significativamente por debajo del límite para Clase B (2000 mg/kg), lo que permite su uso en diversas aplicaciones agrícolas bajo las restricciones que la norma impone para dicha categoría. Cuske *et al.* (2017), reportó bajas concentraciones de Zn desde 8 mg/kg hasta 89,7 mg/kg en enmiendas orgánicas. El Zn es un elemento traza particular, ya que, a diferencia de metales como Pb o Cd, cumple un rol esencial como micronutriente para el crecimiento vegetal y el metabolismo enzimático (Dawar *et al.*, 2022). En este sentido, concentraciones moderadamente elevadas en enmiendas orgánicas pueden ser beneficiosas en suelos con deficiencias nutricionales. Al respecto, Dawar *et al.* (2022), señalan que la aplicación conjunta de compost y niveles adecuados de Zn mejora significativamente el rendimiento y los componentes de producción en cultivos como el trigo, sugiriendo que el aporte de este metal a través de enmiendas orgánicas puede actuar como una estrategia de fertilización de liberación lenta. Sin embargo, la disponibilidad de este elemento para las plantas está fuertemente

mediada por la fracción orgánica de la enmienda. Según Shuman *et al.* (2001), el compost posee una alta capacidad de intercambio catiónico (CIC) y un elevado contenido de carbono orgánico, lo cual favorece la formación de complejos estables con el Zn, reduciendo su fitotoxicidad inmediata. Esta capacidad de "secuestro" o binding del Zn en fracciones menos bioestimulables es crucial; Maqueda *et al.* (2015) refuerzan esta idea al indicar que, aunque las enmiendas orgánicas pueden incrementar el contenido total de Zn en el suelo, la MO tiende a retener el metal en formas ligadas a óxidos o fracciones orgánicas, limitando su lixiviación y su absorción excesiva por parte de la biota.

CONCLUSIONES

1. A diferencia de los productos industriales que tienden a la neutralidad, el compost casero (M7) evidenció un desequilibrio químico significativo, con un pH de 8,86 y una CE de 7,47 dS/m, ambos valores por encima de los límites de referencia de la norma NCh 2880. Esto permite concluir que, en producciones no controladas, la salinidad y la alcalinidad extrema pueden representar un riesgo fitotóxico inmediato mayor que la propia presencia de metales pesados.
2. La cuantificación multielemental, reveló una marcada heterogeneidad en la composición química de las enmiendas con diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0,05$) para todos los elementos evaluados. Estos resultados confirman que el contenido de elementos traza en las enmiendas comerciales de la zona de Chillán es altamente variable y depende directamente de la naturaleza y origen de la materia prima utilizada en su elaboración.
3. La comparación con la norma NCh 2880 reveló que, si bien la totalidad de las enmiendas evaluadas cumple con los límites de Clase B, existe un incumplimiento significativo de los estándares de Clase A condicionado por los niveles de Cu y Zn, incumplimientos presentes en enmiendas etiquetadas como compost Clase A. Estos resultados validan la necesidad de un monitoreo individualizado y el uso de herramientas estadísticas multivariadas para garantizar la seguridad alimentaria en la aplicación de enmiendas comerciales.

REFERENCIAS

1. Agnew, J., & Leonard, J. (2003). The Physical Properties of Compost. *Compost Science & Utilization*, 11(3), 238-264. <https://doi.org/10.1080/1065657x.2003.10702132>
2. Ahmad, I., Akhtar, M. J., Zahir, Z. A., & Mitter, B. (2014). Organic amendments: effects on cereals growth and cadmium remediation. *International Journal Of Environmental Science And Technology*, 12(9), 2919-2928. <https://doi.org/10.1007/s13762-014-0695-8>
3. Aimituma-Franco, K. M., Llanqui-Ticona, S. E., & Fernández-Rojas, H. (2023). Biorremediación de suelos salinos con enmiendas orgánicas de estiércol de cuy y vacuno, Cusco-Perú. *Revista Amazónica de Ciencias Ambientales y Ecológicas*, 2(1), e388. <https://doi.org/10.51252/reacae.v2i1e388>
4. Alloway, B. J. (2012). Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability (Third edition).
5. Bernal, M., Albuquerque, J., & Moral, R. (2009). Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource Technology*, 100(22), 5444-5453. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.027>
6. Bolan, N. S., Adriano, D. C., Natesan, R., & Koo, B. (2003). Effects of Organic Amendments on the Reduction and Phytoavailability of Chromate in Mineral Soil. *Journal Of Environmental Quality*, 32(1), 120. <https://doi.org/10.2134/jeq2003.0120>
7. Clemente, R., Escolar, Á., & Bernal, M. P. (2006). Heavy metals fractionation and organic matter mineralisation in contaminated calcareous soil amended with organic materials. *Bioresource Technology*, 97(15), 1894-1901. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.08.012>
8. Cuske, M., Karczewska, A., & Galka, B. (2017). Speciation of Cu, Zn, and Pb in Soil Solutions Extracted from Strongly Polluted Soils Treated with Organic Materials. *Polish Journal Of Environmental Studies*, 26(2), 567-575. <https://doi.org/10.15244/pjoes/66710>
9. Dawar, K., Ali, W., Bibi, H., Mian, I. A., Ahmad, M. A., Hussain, M. B., Ali, M., Ali, S., Fahad, S., Rehman, S. u., Datta, R., Syed, A., & Danish, S. (2022). Effect of different levels of zinc and compost on yield and yield components of wheat. *Agronomy*, 12(7), 1562. <https://doi.org/10.3390/agronomy12071562>
10. Ding, F., He, Z., Liu, S., Zhang, S., Zhao, F., Li, Q., & Stoffella, P. J. (2016). Heavy metals in composts of China: historical changes, regional variation,

and potential impact on soil quality. *Environmental Science And Pollution Research*, 24(3), 3194-3209. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8057-3>

11. Domingo, J. L., & Nadal, M. (2008). Domestic waste composting facilities: A review of human health risks. *Environment International*, 35(2), 382-389. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2008.07.004>
12. Dueñas-Rivadeneira, J. P., & Flor, F. G. I. (2022). Contenido de metales pesados (Cu, Pb, Ni, Cd) en abonos orgánicos y las materias primas para su elaboración. *La Técnica Revista de las Agrociencias* ISSN 2477-8982, 27(1), 26-35. https://doi.org/10.33936/la_tecnica.v0i27.3674
13. Huaraca-Fernandez, J. N., Pérez-Sosa, L., Bustinza-Cabala, L. S., & Pampa-Quispe, N. B. (2020). Enmiendas orgánicas en la inmovilización de cadmio en suelos agrícolas contaminados: una revisión. *Información Tecnológica*, 31(4), 139-152. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642020000400139>
14. Huerta, O., Martínez, X., Gallart, M., Soliva, M., & López, M. (2010). El uso de compost de residuos sólidos municipales como enmienda orgánica: aportaciones de diferentes componentes según origen. *Residuos*, 112, 22-29. Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/11516>
15. Instituto Nacional de Normalización. (2005). NCh 2880:2005 Compost—Requisitos de calidad. INN. Recuperado el 20 de abril de 2026, de <https://www.inn.cl>
16. Janoš, P., Vávrová, J., Herzogová, L., & Pilařová, V. (2010). Effects of inorganic and organic amendments on the mobility (leachability) of heavy metals in contaminated soil: A sequential extraction study. *Geoderma*, 159(3-4), 335-341. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.08.009>
17. Jones, S., Bardos, R. P., Kidd, P. S., Mench, M., De Leij, F., Hutchings, T., Cundy, A., Joyce, C., Soja, G., Friesl-Hanl, W., Herzig, R., & Menger, P. (2016). Biochar and compost amendments enhance copper immobilisation and support plant growth in contaminated soils. *Journal Of Environmental Management*, 171, 101-112. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.01.024>
18. Kwiatkowska-Malina, J. (2018). Functions of organic matter in polluted soils: The effect of organic amendments on phytoavailability of heavy metals. *Applied Soil Ecology*, 123, 542-545. doi:10.1016/j.apsoil.2017.06.021

19. Ley N° 21.349. Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, Chile, 26 de junio de 2021.
20. López, R., Burgos, P., Madrid, F., & Camuña, I. (2014). Source Separate Collection of Recyclables Reduces Chromium and Nickel Content in Municipal Solid Waste Compost. *CLEAN - Soil Air Water*, 43(3), 427-433. <https://doi.org/10.1002/clen.201300821>
21. López-Núñez, R., Ajmal-Poley, F., & Burgos-Doménech, P. (2020). Prediction of As, Cd, Cr, Hg, Ni, and Se Concentrations in Organic Amendments Using Portable X-ray Fluorescence and Multivariate Modeling. *Applied Sciences*, 10(17), 5726. <https://doi.org/10.3390/app10175726>
22. Madejón, E., Madejón, P., Burgos, P., De Mora, A. P., & Cabrera, F. (2008). Trace elements, pH and organic matter evolution in contaminated soils under assisted natural remediation: A 4-year field study. *Journal Of Hazardous Materials*, 162(2-3), 931-938. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.05.119>
23. Manungufala, T., Chimuka, L., & Maswanganyi, B. (2007). Evaluating the quality of communities made compost manure in South Africa: A case study of content and sources of metals in compost manure from Thulamela Municipality, Limpopo province. *Bioresource Technology*, 99(5), 1491-1496. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.02.006>
24. Maqueda, C., Morillo, E., Lopez, R., Undabeytia, T., & Cabrera, F. (2015). Influence of organic amendments on Fe, Cu, Mn, and Zn availability and clay minerals of different soils. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 61(5), 599–613. <https://doi.org/10.1080/03650340.2014.946409>
25. Montoya, S. A. M., Mora, A. M., & Vásquez, C. J. F. (2019). La importancia de las enmiendas orgánicas en la conservación del suelo y la producción agrícola. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 7(1), 58-68. <https://doi.org/10.23850/24220582.2503>
26. Pichtel, J., & Bradway, D. J. (2008). Conventional crops and organic amendments for Pb, Cd and Zn treatment at a severely contaminated site. *Bioresource Technology*, 99(5), 1242-1251. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.02.042>
27. Puyuelo, B., Arizmendiarieta, J. S., Irigoyen, I., & Plana, R. (2019). Quality assessment of composts officially registered as organic fertilisers in Spain. *Spanish Journal Of Agricultural Research*, 17(1), e1101.

- <https://doi.org/10.5424/sjar/2019171-13853>
28. Rendina, A., Barros, M. J., & De Iorio, A. F. (2011). Changes in the speciation, partitioning and phytoavailability of chromium induced by organic soil amendments. *Chemical Speciation And Bioavailability*, 23(1), 53-60. <https://doi.org/10.3184/095422911x12971977268431>
 29. Rodríguez Ortiz, J. C., Alcalá Jáuregui, J. A., Hernández Montoya, A., Rodríguez Fuentes, H., Ruiz Espinoza, F. H., García Hernández, J. L., & Díaz Flores, P. E. (2014). Elementos traza en fertilizantes y abonos utilizados en agricultura orgánica y convencional. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(4), 695–701.
 30. Rotondo, R., Firpo, I. T., Ferreras, L., Toresani, S., Fernández, S. y Gómez, E. (2009). Efecto de la aplicación de enmiendas orgánicas y fertilizante nitrogenado sobre propiedades edáficas y productividad en cultivos hortícolas. *Horticultura Argentina*, 28(66), 18-25.
 31. Said-Pullicino, D., Erriquens, F. G., & Gigliotti, G. (2006). Changes in the chemical characteristics of water-extractable organic matter during composting and their influence on compost stability and maturity. *Bioresource Technology*, 98(9), 1822-1831. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.06.018>
 32. Shuman, L. M. (1998). Effect of organic waste amendments on cadmium and lead in soil fractions of two soils. *Communications In Soil Science And Plant Analysis*, 29(19-20), 2939-2952. <https://doi.org/10.1080/00103629809370167>
 33. Shuman, L. M., Dudka, S., & Das, K. (2001). Zinc forms and plant availability in a compost amended soil. *Water, Air, & Soil Pollution*, 128(1), 1–11. <https://doi.org/10.1023/A:1010319206273>
 34. Tapia, Y., Cala, V., Eymar, E., Frutos, I., Gárate, A., & Masaguer, A. (2010). Chemical characterization and evaluation of composts as organic amendments for immobilizing cadmium. *Bioresource Technology*, 101(14), 5437-5443. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.034>
 35. Tomati, U., Belardinelli, M., Andreu, M., Galli, E., Capitani, D. y Proietti, N. (2002). Evaluation of commercial compost quality. *Waste Management & Research*, 20, 389-397. Recuperado de <https://about.ebsco.com/es/productos/bases-de-datos>.
 36. Tsabedze, S. A., Otieno, B., Thomas, A. R., & Getahun, S. T. (2025).

- Phytotoxicity and quality in compost: a concise review of Sewage Sludge and Green Waste applications. *Journal Of Material Cycles And Waste Management*, 27(6), 4041-4058. <https://doi.org/10.1007/s10163-025-02334-0>
37. Wan, Y., Liu, J., Zhuang, Z., Wang, Q., & Li, H. (2024). Heavy Metals in Agricultural Soils: Sources, Influencing Factors, and Remediation Strategies. *Toxics*, 12(1), 63. <https://doi.org/10.3390/toxics12010063>
 38. Wang, X., Chen, J., An, J., Wang, X., & Shao, Y. (2024). Comparison of the effects of different organic amendments on the immobilization and phytoavailability of lead. *Sustainability*, 16(7), 2981. <https://doi.org/10.3390/su16072981>
 39. Welikala, D., Hucker, C., Hartland, A., Robinson, B. H., & Lehto, N. J. (2018). Trace metal mobilization by organic soil amendments: Insights gained from analyses of solid and solution phase complexation of cadmium, nickel and zinc. *Chemosphere*, 199, 684-693. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.02.059>
 40. Zhang, T., Wang, T., Liu, K. S., Wang, L., Wang, K., & Zhou, Y. (2015). Effects of different amendments for the reclamation of coastal saline soil on soil nutrient dynamics and electrical conductivity responses. *Agricultural Water Management*, 159, 115-122. doi:10.1016/j.agwat.2015.06.003
 41. Zennaro, M., Cristofori, F., Formigoni, D., Frignani, F., & Pavoni, B. (2005). Heavy metal contamination in compost: A possible solution. *Annali di Chimica*, 95(3-4), 221-235. <https://doi.org/10.1002/adic.200590033>