

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN DE LOS SUELOS PARA LAS COMUNAS DE QUINTERO Y PUCHUNCAVÍ, REGIÓN DE VALPARAISO

K. Barrueto Moraga¹, P. Tume Zapata² y A. Navarro Alarcón³

RESUMEN:

Se analizan los elementos del grupo de los metales pesados asociados a muestras de suelos en las comunas de Quintero y Puchuncaví, de la región de Valparaíso, Chile. Esta zona puede verse afectada por actividades antropogénicas, ya que se ubica el Complejo Industrial Ventanas, el cual reúne catorce empresas, destinadas a la generación de energía, fundición, refinación de cobre, actividad relacionada a la industria química, almacenamiento de gas y petróleo, entre otras. Es por esto que el propósito de este estudio será determinar y evaluar las concentraciones de metales pesados, junto con su grado de contaminación.

Se utilizó la base de datos del estudio organizado por el Ministerio de Medio Ambiente, llamado “Muestreo de suelos para las comunas de Quintero y Puchuncaví, región de Valparaíso”, obteniéndose 565 muestras en total (zona urbana y rural), donde 361 son muestras urbanas y 204 rurales. Además, con 16 muestras geológicas, se determinó, mediante un análisis estadístico los valores de fondo de metales presentes en el suelo.

Aplicando estadística multivariada, se estableció la relación que existe entre, arsénico (As), cadmio (Cd), cobre (Cu), manganeso (Mn), molibdeno (Mo), níquel (Ni), hierro (Fe), vanadio (V), zinc (Zn), pH, (MO) materia orgánica y obtener la fuente del origen de los metales (antropogénica o geogénica).

Los valores de fondo del suelo fueron obtenidos a través de diferentes métodos, Upper Whisker, promedio + 2*S (Coeficiente de variación), pero luego utilizando el principio de precaución se utilizó el que sigue la siguiente forma; mediana + 2*MAD (Desviación absoluta de la mediana). La evaluación de la contaminación del suelo se estimó mediante, el índice de geoacumulación, factor de enriquecimiento, factor de contaminación y el índice de contaminación integrado.

Los valores de fondo asociados a muestras geológicas se calcularon mediante, mediana + 2*MAD (Desviación absoluta de la mediana) de los cuales se obtienen en (mg kg^{-1}): As=31.6, Cd=0.7, Cu=295.5, Fe=7.4%, Mn=1423, Mo=2.1, Ni=16.9, Pb=48.6, V=199 y Zn=192. Los cálculos obtenidos de IGEO, EF, CDEG, IPI, revelaron impactos ecológicos significativos.

Del resultado obtenido se concluye que, los metales pesados estudiados provienen de fuente antropogénica, en mayor cantidad Pb, Cu, As y Cd, y se obtiene que aquellas muestras con mayor grado de contaminación son las que se encuentran alrededor del complejo industrial Ventanas, lo que puede afectar a la salud de los habitantes y el medio ambiente, por tanto, se recomienda tomar medidas que puedan mitigar éstos resultados.

PALABRAS CLAVES: Valores de fondo; estadística multivariada; metales pesados.

SUMMARY:

Heavy metals samples in soils of the districts of Quintero and Puchuncaví, Valparaíso region in Chile are analysed. This zone can be affected by anthropogenic activities, as it is located the “Complejo Industrias Ventanas”, which brings together fourteen companies, destined to the generation of energy, smelting, copper

¹ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, kparrueto@ing.ucsc.cl

² Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, ptume@ucsc.cl

³ Profesor Informante, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, arielnavarro@ucsc.cl

refinery, activity related to chemical industry, gas and oil storage, among other. Therefore, the purpose of this study is to determine and evaluate concentrations of heavy metals along with their degree of contamination. A database of the study organised by the Ministry of the Environment, called "Soil sampling for the districts of Quintero and Puchuncaví, Valparaíso region", was used obtaining 565 samples in total (urban and rural), where 361 were urban samples and 204 were rural samples. In addition, with 16 geological samples, an exhaustive analysis of the background values of metals present in the soil could be carried out.

A multivariate statistics analysis was performed, the relationship between arsenic (As), cadmium (Cd), copper (Cu), manganese (Mn), molybdenum (Mo), nickel (Ni), iron (Fe), vanadium (V), zinc (Zn), pH, (OM) organic matter and determine the source of the origin of metals (anthropogenic or geogenic). Soil bottom values were obtained through different methods, Upper Whisker, mean + 2*S (Variation Coefficient), but then using the precautionary principle was used the following form; median + 2*MAD (Median Absolute Deviation). The assessment of soil contamination was estimated by the geo-accumulation index, enrichment factor, pollution factor and the integrated pollution index.

The background values associated with geological samples were calculated by means of a median + 2 * MAD (Median Absolute Deviation) obtained as (mg kg⁻¹): As = 31.6, Cd = 0.7, Cu = 295.5, Fe = 7.4%, Mn = 1423, Mo = 2.1, Ni = 16.9, Pb = 48.6, V = 199 and Zn = 192. Calculations obtained from IGEO, EF, CDEG, IPI revealed significant ecological impacts.

From the result obtained, it is concluded that the heavy metals studied come from anthropogenic source, in greater quantity Pb, Cu, As and Cd, and it is obtained that those samples with greater degree of contamination are those that are around "Complejo Industrial Ventanas", which can affect the health of the inhabitants and the environment, therefore, it is recommended to take measures that might mitigate these results.

KEY WORDS: Background values; Multivariate statistics; Heavy metals.

1. INTRODUCCIÓN

El suelo en general actúa como una barrera protectora, filtrando, descomponiendo, neutralizando o almacenando contaminantes y evitando en gran parte su biodisponibilidad, ésta capacidad que presenta depende de diversos factores, uno de ellos es el contenido de materia orgánica, ya que es considerada como un indicador de salud del suelo, pero cuando éste presenta características físicas, químicas o biológicas que han sido alteradas negativamente por la presencia de componentes de carácter peligroso, se califica como un suelo contaminado, que puede representar un riesgo para la salud y el medio ambiente (Salmani-Ghabeshi, y otros, 2016).

Por tanto, el suelo puede almacenar metales pesados, los cuales pueden ser de origen geogénico o antropogénico. Aquellos que proceden de la primera fuente, son originarios de la roca madre, actividad volcánica o lixiviación de mineralizaciones, a diferencia de los metales pesados antropogénicos que derivan de residuos peligrosos, procedentes de actividades industriales, minería e industria agrícola y residuos sólidos urbanos (Galán & Romero, 2008).

Los metales pesados pueden abandonar el suelo por volatilización, disolución, lixiviado o erosión (Figura 1) y pasar a los organismos cuando pueden ser asimilables. En general, la movilidad de estos elementos es baja, quedando acumulados en los primeros centímetros del horizonte superficial, otro de los factores que influye es la textura del mismo, ya que suelos arcillosos retienen más metales por absorción que suelos arenosos ya que estos últimos carecen de capacidad de fijación y puede contaminar el nivel freático.

El porcentaje de arcilla en el suelo, es de 13-18%, arena 65-74% y cieno 13-17% (Salmanighabeshi & Palomo-Martín, 2015).

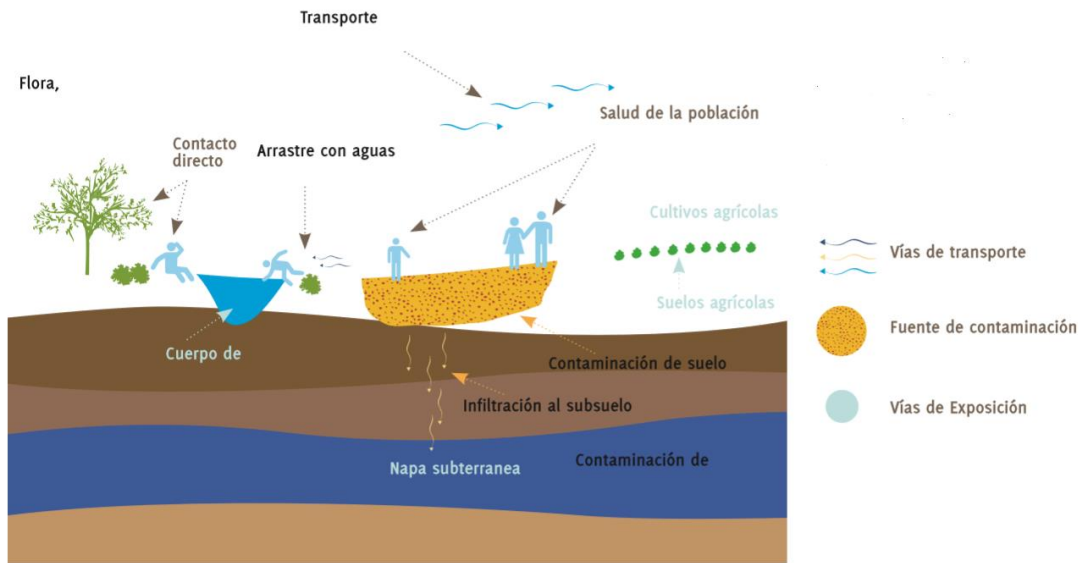


Figura 1: Vías de exposición a fuentes contaminantes. (MMA)

En las comunas de Quintero y Puchuncaví, de la región de Valparaíso, Chile, se estudiarán muestras de los metales pesados, éstos metales son de larga vida y su naturaleza es no biodegradable, por lo tanto, puede afectar de forma significativa la salud humana y animal. Además, en Chile no existe una normativa específica para suelos contaminados, lo que aumenta su vulnerabilidad.

Las actividades industriales en la zona de estudio, lo componen las empresas de CODELCO, AES GENER S.A., COPEC, Planta de resinas y terminal marítimo OXIQUM, Planta de Gas Natural Licuado Quintero (GNL), GASMAR, Terminal acopio cemento Melón, ENAP (Hidrocarburos), entre otras (Figura 2), en este sector se producen descargas de residuos líquidos al mar, emisiones atmosféricas, depósitos de cenizas al suelo. A ello además se le suma el transporte de cargas peligrosas, uso de agroquímicos, etc., es necesario destacar que, al estar ubicadas en el litoral de Chile, los vientos costeros aumentan la dispersión de partículas.

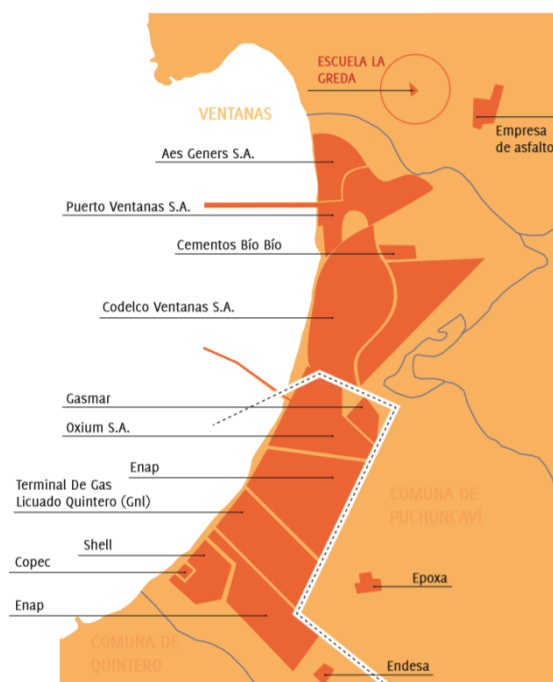


Figura 2: Polo Industrial de Puchuncaví. (MMA)

De estudios realizados en campañas anuales desde 2007-2011, puso de manifiesto que la evolución de los contaminantes ha disminuido. Aseveración que se confirma en el presente análisis ya que estos resultados provienen de muestras tomadas desde el año 2014-2015. Los metales que han disminuido sus concentraciones promedias son Pb, Ni, Zn y Cu, y puede estar relacionado con la mejora de las tecnologías ambientales adoptadas por las industrias en los últimos años (Salmanighabeshi & Palomo-Martín, 2015).

Este análisis tiene como objetivo, (1) Evaluar las concentraciones de metales pesados en los suelos. (2) Evaluar el uso del suelo en las concentraciones de metales pesados. (3) Determinar valores de fondo de la concentración de As, Cd, Cu, Mn, Mo, Ni, Pb, V y Zn y los elementos que superen estas estimaciones. (4) Determinar los índices de riego ecológico. (5) Determinar la relación de pH y materia orgánica con los metales pesados y entre metales pesados.

2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde a las Comunas de Quintero y Puchuncaví de la región de Valparaíso, Chile. Y la zona de estudio corresponde las siguientes localidades, La Greda (267797.02, 6374097.68, 19H), Pueblo de Puchuncaví (273980, 6376966, 19H), Rungue (323170.97, 6346448.74, 19H) Las Ventanas (266805.54, 6374430.82, 19H), Horcón (266900.79, 6377494.45, 19H), y Loncura (265347.43, 6369457.61, 19H).

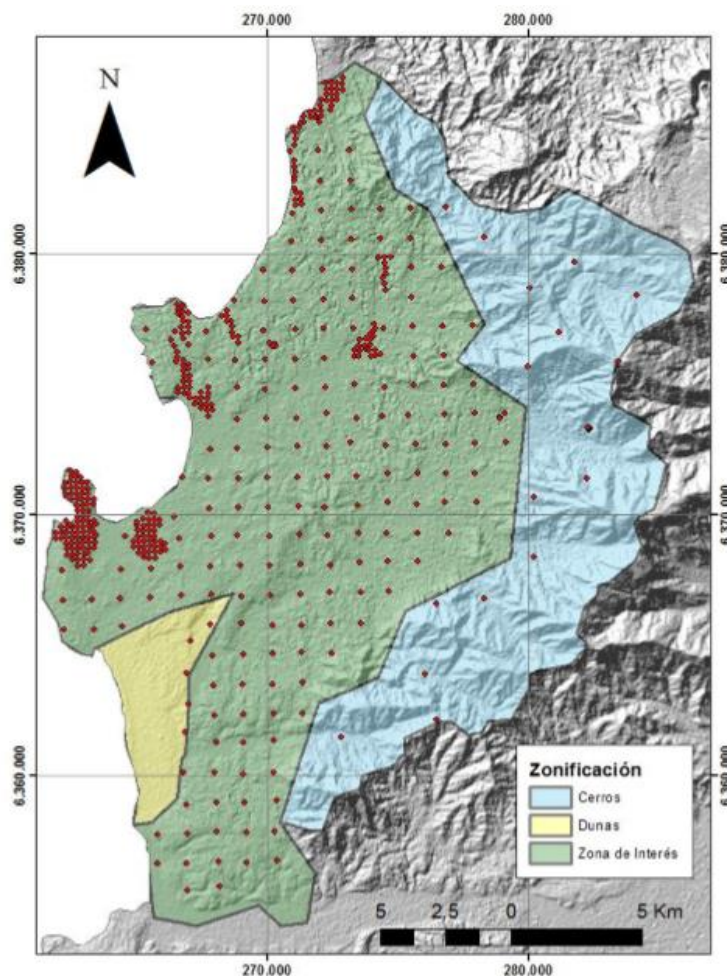


Figura 3: Puntos muestreados, de zona urbana-rural. (MMA)

Su tipo climático se clasifica como templado cálido con lluvias invernales, estación seca prolongada y gran nubosidad, presente en toda la costa de la región, siendo perceptible incluso hacia el interior, y a través de los

valles. Este clima se caracteriza por débiles oscilaciones térmicas diarias y anuales, además de altos valores de humedad relativa y precipitaciones (MMA).

Los vientos predominantes se presentan en la dirección S-W (Salmanighabeshi & Palomo-Martín, 2015).

3. MÉTODOS

Se estudiaron 581 muestras (muestra urbana, muestra rural y muestra geológica) obtenidas de la base de datos del estudio organizado por el Ministerio del Medio Ambiente, llamado “Muestreo de suelos para las comunas de Quintero y Puchuncaví”.

En el caso de la muestra geológica, las principales formaciones geológicas corresponden a rocas intrusivas, volcánicas jurásicas e intrusivos paleozoicos.

En cada sitio las muestras se recogieron en base a un círculo de 1 metro de radio, donde submuestras fueron recogidas en el centro del círculo y se tomaron 4 muestras a lo largo del radio de éste. Cada una de ellas fue tomada en un rango de 0 a 15 centímetros de profundidad, además se recogió un 6% de duplicados.

Las muestras fueron analizadas en el laboratorio “ActLabs”, en la ciudad de Coquimbo para determinar las concentraciones de Cu, As, Zn, V, Ni, Cd, Mn, Hg, Pb, Fe, Mo, Se, Sb, Te, pH y MO. El método utilizado es el de Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente, técnica de análisis inorgánico que posee límites de detección bajos para la mayoría de los elementos de la tabla periódica, permitiendo determinar las concentraciones de metales pesados. Selenio, antimonio, mercurio y telurio presentaron porcentajes bajo el límite de detección, los cuales fueron, 15.9%, 13.1%, 62.1% y 13.2%; por lo tanto, éstos elementos no se consideraron para el análisis.

3.1 Estadística multivariada

Para las zonas de estudio (zona rural-urbana, zona urbana, zona rural y zona geológica) se realiza estadística multivariada, que es un conjunto de técnicas que permiten interpretar y visualizar los conjuntos de datos estudiados, permitiendo relacionar sus variables, entre ellas las más importantes son, análisis exploratorio de datos, promedio muestral, varianza muestral, correlación muestral, componentes principales y análisis Clúster (Tukey, 1977) que se representa a través de tres gráficos, (histograma, diagrama de caja y diagrama de distribución acumulada), todo esto realizado por el programa SPSS 24 y Minitab 17. Posteriormente para probar si los datos provienen de distintas poblaciones, se utiliza el método Kruskal – Wallis.

3.2 Valores de fondo

La estimación de los valores de fondo, se realizó en base a las condiciones propuestas por la USEPA:

1. Área que no haya recibido contaminación del sitio de estudio.
2. Área que presente las mismas características básicas en el sitio en cuestión.

Las muestras obtenidas de la zona rural, fueron extraídas fuera del área de influencia (Complejo industrial Ventanas), este sector además de estar protegido por la existencia de cadenas montañosas, las que sirvieron como barreras físicas, cumple con las condiciones propuestas por la USEPA.

Luego de obtenidos los resultados de las muestras de la zona rural, se realizan los siguientes métodos para obtener los valores de fondo.

La aproximación original, para el cálculo de los valores de fondo se observa en la ecuación (1), donde \bar{X} (promedio) y S (desviación estándar). Este procedimiento se desarrolló en geoquímica de exploración para detectar datos de valores extremos. En éste caso solo se utilizó como medio de comparación, ya que éste enfoque no es adecuado (Reimann, Filzmoser, & Garrett, 2004).

$$\bar{X} + 2 * S \quad (1)$$

Se sugirió sustituir la ecuación (1) por la (2), donde Me (mediana) y MAD (desviación absoluta de la mediana). Se utiliza el procedimiento (2), cuando los valores atípicos superan el 20%, y a diferencia con la primera los resultados son más robustos contra el efecto de valores atípicos. Su desventaja se debe a que proporciona valores umbral muy conservadores.

$$Me + 2 * MAD \quad (2)$$

El tercer procedimiento, se basa en Box-Plot, éste es un método más informativo, si el número real de datos aislados es inferior al 10%. Por último, la organización mundial de normalización (ISO 2005, Anexo B) propuso detectar valores atípicos basados en la técnica de Upper Whisker, su ventaja se basa en el diagrama de caja y éste depende únicamente de la distribución de los datos. El cual se calcula de la siguiente forma:

$$TIF = Q_3 + 1.5 * (Q_3 - Q_2) \quad (3)$$

Donde Q_3 y Q_2 equivale al percentil 75, 25 y la multiplicación de 1.5 se basa en el supuesto, de que la distribución de los datos es simétrica.

3.3 Índices de riesgo ecológico

A continuación, se presentan los índices de riesgo ecológico, que se utilizaron como medida del estado de contaminación del suelo. (1) Índice de Geoacumulación, (2) Factor de Enriquecimiento, (3) Factor de Contaminación, (4) Índice de contaminación integrada.

El índice de geoacumulación permite informar de un valor numérico que presenta un intervalo donde el suelo puede considerarse contaminado por sustancias orgánicas e inorgánicas. Éste índice se calcula mediante la siguiente formula:

$$IGEO = \log_2 \frac{C_i}{1.5C_b} \quad (4)$$

Donde C_i , es la concentración promedia del elemento particular en el suelo y C_b , es el valor natural del suelo. Los resultados obtenidos en el IGEO para cada elemento presentan la siguiente interpretación, ($IGEO \leq 0$) No contaminado, ($0 < IGEO \leq 1$) Ligeramente contaminado, ($1 < IGEO \leq 2$) Moderadamente contaminado, ($2 < IGEO \leq 3$) Moderadamente a muy contaminado, ($3 < IGEO \leq 4$) Fuertemente contaminado, ($4 < IGEO \leq 5$) Muy contaminado, ($IGEO > 5$) Extremadamente contaminado.

El factor de enriquecimiento, considera los elementos más abundantes de la corteza terrestre, en este estudio se consideró al Fe como referencia al considerarse como uno de los principales componentes de la corteza terrestre. (Otros elementos que se pueden tomar como referencia son, Sc, Mn, Ti y Al). El factor de enriquecimiento se presenta como:

$$EF = \left[\frac{C_i}{CFe_i} / \frac{C_b}{CFe_b} \right] \quad (5)$$

Donde C_i es la concentración del elemento, CFe_i , es el contenido de Fe como elemento de referencia, C_b valor natural del suelo y CFe_b , valor de referencia del Fe. De los resultados obtenidos se considera, ($EF \leq 2$) enriquecimiento mínimo, ($2 < EF \leq 5$) enriquecimiento moderado, ($5 < EF \leq 20$) enriquecimiento significativo, ($20 < EF \leq 40$) enriquecimiento muy alto y ($EF > 40$) enriquecimiento extremadamente alto.

El factor de contaminación se calcula con la siguiente ecuación:

$$CF = \frac{C_i}{C_b} \quad (6)$$

Del cual, C_i corresponde a la concentración promedio del elemento particular en el suelo y C_b , es el valor natural del suelo. Los resultados obtenidos en CF, tiene la siguiente interpretación, ($CF \leq 1$) contaminación baja, ($1 < CF \leq 3$) contaminación moderada, ($3 < CF \leq 6$) contaminación considerable, ($CF > 6$) muy alto factor de contaminación. (Jiang, Lu, Zhao, Yang, & Yang, 2014)

El grado de contaminación se calcula de la siguiente forma:

$$CDEG = \sum CF \quad (7)$$

Los resultados obtenidos en CDEG, se divide en cuatro grupos, ($CDEG \leq 8$) baja contaminación, ($8 < CDEG \leq 16$) contaminación moderada, ($16 < CDEG \leq 32$) contaminación considerable y ($CDEG > 32$) muy alta contaminación. El índice de contaminación integrada, representa el promedio de la contaminación calculado para cada oligoelemento. Los resultados obtenidos se dividen en 4 categorías, ($IPI \leq 1$) bajo nivel de contaminación, ($1 < IPI \leq 2$) nivel de contaminación moderada, ($2 < IPI \leq 5$) alto nivel de contaminación y ($IPI > 5$) contaminación extremadamente alta.

4. RESULTADOS

Se realiza estadística multivariada para todas las zonas de estudio, de las cuales los resultados obtenidos para la zona urbana, zona rural y geológica se encuentra en el Anexo del presente estudio.

La descripción gráfica de los contenidos de As, Cd, Cu, Mn, Mo, Ni, Fe, V y Zn, se ve reflejada a continuación (Gráfico 1-3), a través del histograma, diagrama de caja y distribución acumulada, de los cuales se observan valores extremos en todos los metales pesados estudiados, esto puede deberse a las influencias antropogénicas en la zona de estudio.

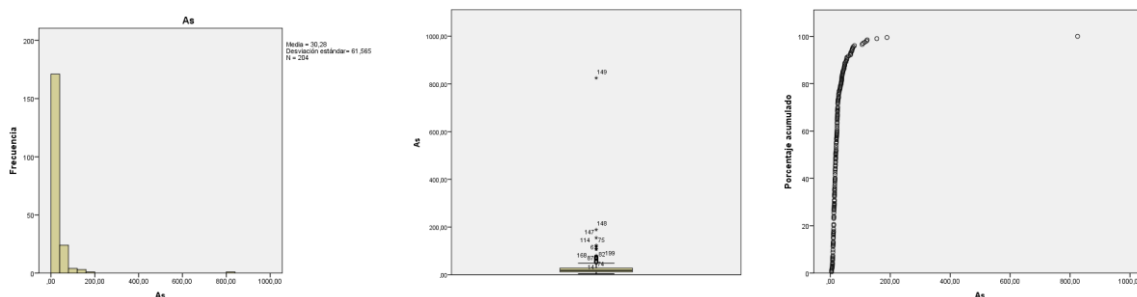


Gráfico 1: Descripción de los contenidos de As, a través de histograma, diagrama de caja, y diagrama de distribución acumulada, zona urbana-rural (elaboración propia).

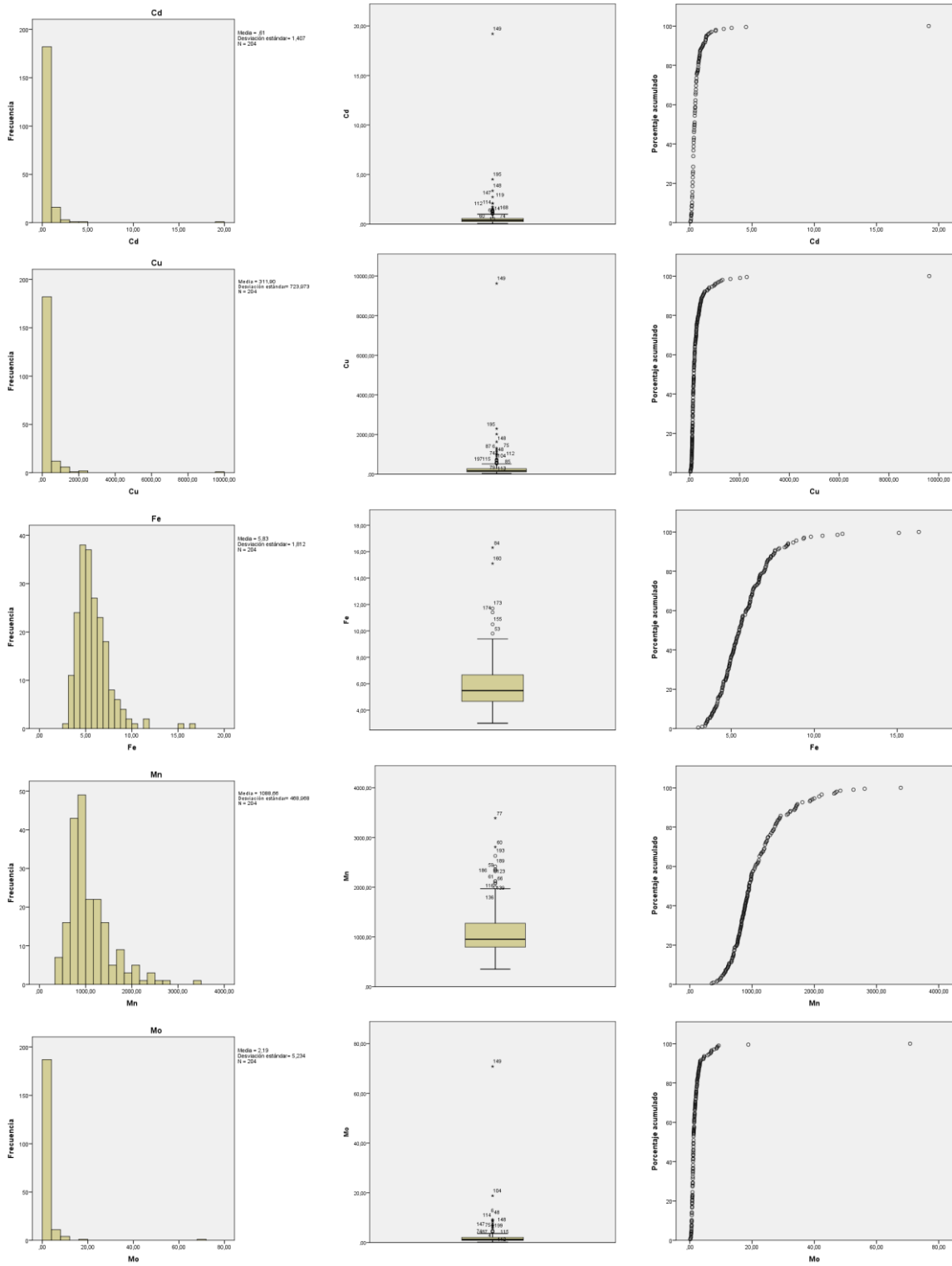


Gráfico 2: Descripción de los contenidos de Cd, Cu, Fe, Mn, Mo; a través de histograma, diagrama de caja, y diagrama de distribución acumulada, zona urbana-rural (elaboración propia).

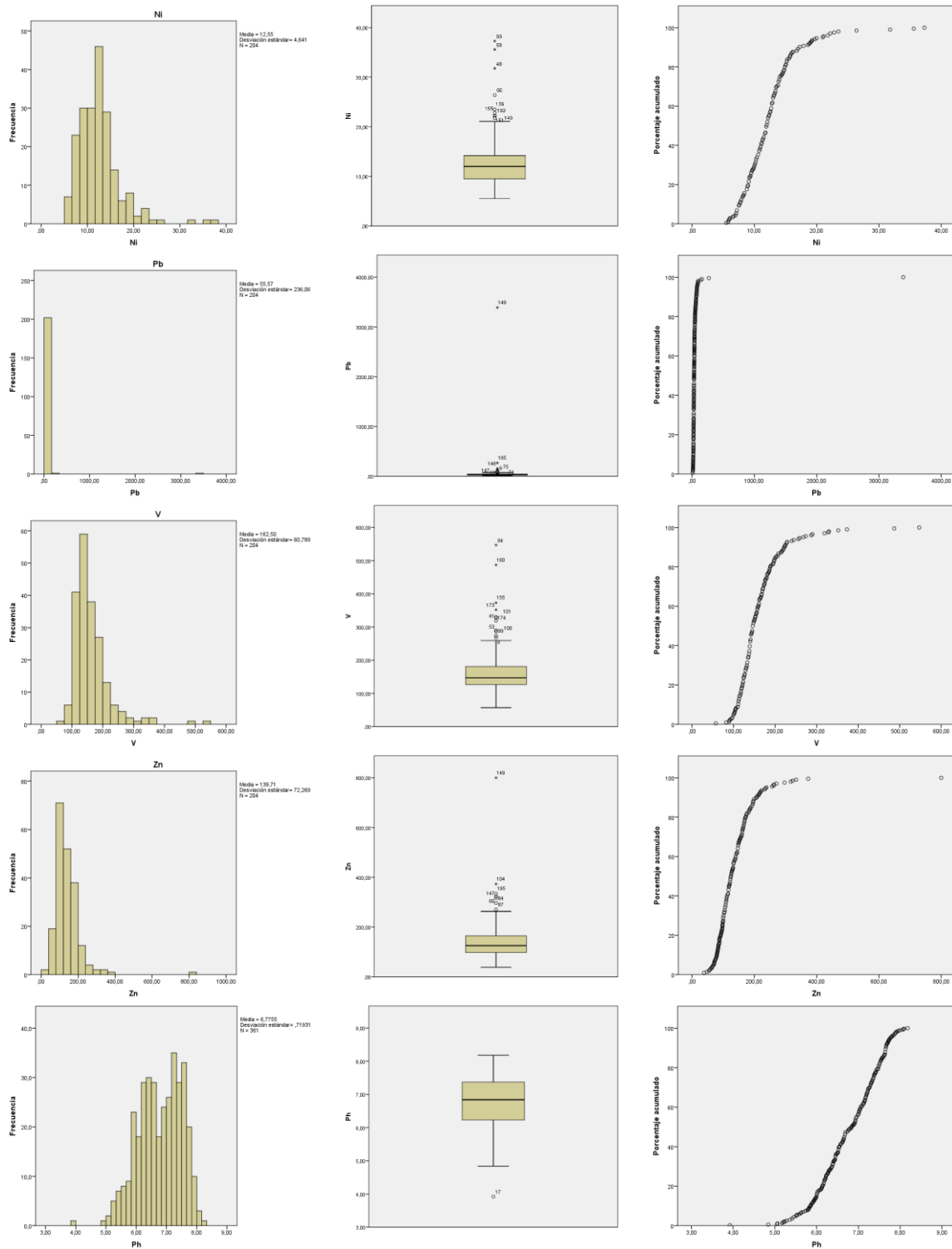


Gráfico 3: Descripción de los contenidos de Ni, Pb, V, Zn y pH; a través de histograma, diagrama de caja, y diagrama de distribución acumulada, zona urbana-rural (elaboración propia).

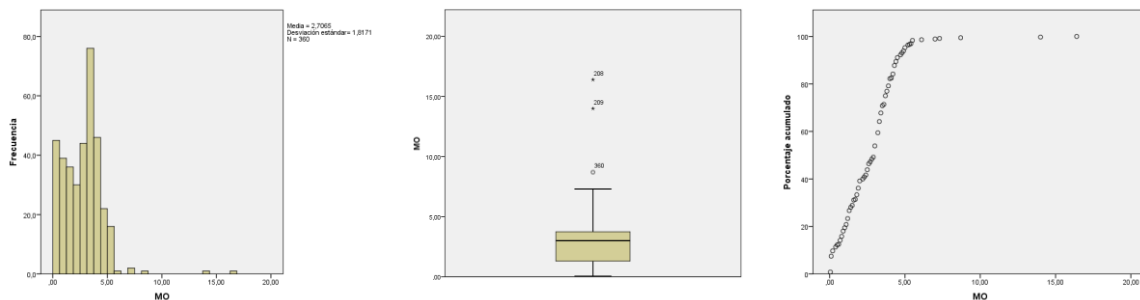


Gráfico 4: Descripción de los contenidos de MO; a través de histograma, diagrama de caja, y diagrama de distribución acumulada, zona urbana-rural (elaboración propia).

4.1. Contenido y distribución de oligoelementos (zona urbana-rural)

El resumen estadístico de los metales pesados ubicados en los suelos, se observa en la Tabla 1; concentraciones promedio de As, Cd, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, V y Zn son 21.55, 0.42, 236.0(mg kg⁻¹), 6.1%, 968.7, 1.7, 13.3, 39.6, 172.4 y 146.2 (mg kg⁻¹), las cuales siguen un orden descendente Fe > Mn > Cu > V > Zn > Pb > As > Ni > Mo > Cd.

El coeficiente de variación es una medida relativa de dispersión que expresa a la desviación estándar como a un porcentaje del promedio; en donde se puede concluir que, si los elementos se derivan de fuentes naturales, los coeficientes de variación son pequeños, en caso contrario, si los elementos se derivan de fuentes antropogénicas por ende los coeficientes de variación son grandes. En el conjunto de datos estudiado el coeficiente de variación disminuye en el orden de, Pb > Cd > Cu > As > Mo > Zn > Mn > V > Fe > Ni. El menor coeficiente de variación lo presenta, Fe y Ni, lo que sugiere que la distribución de estos elementos es relativamente homogénea al área de estudio, a diferencia de As, Cd, Cu, Mo, Pb, Zn y parcialmente V, donde claramente los coeficientes de variación son más altos, lo que representa que sus fuentes son antropogénicas. Desde el punto de vista de la asimetría los elementos disminuyen en el siguiente orden, Pb > Mo > Cd > As > Cu > Zn > Mn > Ni > V > Fe, se percibe que los oligoelementos han sido afectados por actividad humana ya que la asimetría es positiva.

Con respecto a los niveles observados de pH, se puede decir que se encuentra en el rango de 6.6 < pH < 7.3 por lo tanto se considera neutro.

Tabla 1: Resumen estadístico de las concentraciones de metales (mg kg⁻¹) en zona urbana-rural (elaboración propia).

Elemento	Promedio	S ¹	CV(%) ²	Asimetría	Curtosis	Mín.	Percentiles					Máx.
							5	25	50	75	95	
As	21,5	40,4	187	14,8	280	1,7	3,9	10,3	14,5	22,4	52,7	825
Cd	0,42	0,89	214	17,1	351	0,02	0,06	0,16	0,27	0,47	1,1	19,2
Cu	236	483	204	13,9	255	24,7	40,6	85,9	135	250	677	962
Fe	6,1	2	33,3	1,2	2,5	1,25	3,4	4,7	5,8	7,02	10,3	16,3
Mn	968	399	41,2	2,1	6,5	114	540	730	874	1095	172	3390
Mo	1,6	3,2	193	17,6	368	0,13	0,53	0,88	1,20	1,7	3,5	70,8
Ni	13,3	4,3	32,5	1,8	7,1	2,1	7,5	10,8	12,9	14,9	20,7	40,1
Pb	39,6	147,2	372	21,2	476	8,2	12,5	20,1	26,9	37,9	71	3390
V	172	67,1	38,9	1,6	4	29	91,3	129	159	197	314	547
Zn	146	76,5	52,3	3,7	25,6	15,4	57	106	137	168	256	833
pH	6,4	0,82	12,6	-0,04	-0,88	3,9	5,1	5,8	6,4	7,1	7,7	8,1
MO	2,7	1,7	64,2	1,4	8,5	0,10	0,10	1,3	3	3,9	5,2	16,4

¹ Desviación Estándar, ² Coeficiente de variación.

El coeficiente de correlación mide el grado de asociación entre dos cantidades (Martínez, Pendás, Ortega, & Pérez, 2009), y en este caso se utilizó ya que ciertos datos presentan valores extremos, y las distribuciones de los elementos no son normales, (Gráfico 1-3). Los resultados obtenidos en Tabla 2, de los coeficientes de correlación de Spearman, se puede visualizar que existen correlaciones negativas o despreciables para pH y MO con respecto a los metales pesados, esto quiere decir que no existe relación entre ellos, en caso contrario, las correlaciones fuertes presentes con un nivel de significancia de 0.01 si pueden derivarse de la misma fuente, esto es para las siguientes parejas: As/Cd, Cd/Cu, Cd/Pb y Fe/V.

Tabla 2: Coeficiente de Correlación de Spearman de las concentraciones de metales (mg kg^{-1}) en zona urbana-rural de Puchuncaví y Quintero (elaboración propia).

	As	Cd	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni	Pb	V	Zn	pH	MO
As	1	0,82**	0,65**	0,20**	-0,05	0,76**	0,16**	0,74**	0,15**	0,57**	0,08*	0,08
Cd		1	0,80**	-0,01	0,02	0,65**	0,08*	0,83**	-0,05	0,54**	0,07	0,05
Cu			1	-0,17**	-0,08*	0,63**	-0,02	0,79**	-0,20**	0,47**	0,06	0,02
Fe				1	0,27**	0,08	0,50**	0,0002	0,96**	0,47**	0,08	0,07
Mn					1	-0,15**	0,29**	0,07	0,26**	0,08*	-0,07	-0,02
Mo						1	0,24**	0,62**	0,03	0,58**	0,06	0,10*
Ni							1	0,10*	0,47**	0,52**	-0,02	0,05
Pb								1	-0,02	0,55**	0,07	0,08
V									1	0,43**	0,06	0,06
Zn										1	0,04	0,08*
pH											1	-0,02
MO												1

** La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

* La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

Para el análisis de componentes principales, su objetivo es relacionar los elementos en estudio y asignar variables, en este caso son cuatro, (Tabla 3) y explica de forma acumulativa la varianza total con un 78.78%. La tasa de contribución de PC1 fue de 37.57 %, donde As, Cd, Cu, Mo, y Pb obtuvieron la mayor carga y parcialmente el Zn con una carga de 0.7, luego la tasa de contribución de PC2 fue de 20.4 %, donde Fe y V consiguieron la carga más alta y deficientemente Mn, posteriormente PC3 es de 11.6 %, quien logró la carga más alta es pH y por último la tasa de contribución de PC4 es de un 9.17%, aportando a ella Ni y MO.

Tabla 3: Coeficiente de factores de análisis de componentes principales en zona urbano-rural de Puchuncaví y Quintero (elaboración propia).

Elementos	Componentes Principales			
	CP1	CP2	CP3	CP4
As	0,90	0,15	-0,04	-0,07
Cd	0,93	-0,01	-0,15	-0,06
Cu	0,88	-0,20	-0,05	-0,02
Fe	0,05	0,96	0,01	-0,14
Mn	-0,08	0,46	-0,64	0,32
Mo	0,84	0,03	0,16	0,12
Ni	-0,19	-0,07	0,43	0,54
Pb	0,91	0,03	-0,15	-0,01
V	0,002	0,96	0,02	-0,12
Zn	0,70	0,51	0,25	0,07
pH	-0,06	0,19	0,81	0,10
MO	0,12	-0,14	-0,10	0,80
Porcentaje de varianza (%)	37,5	20,4	11,6	9,1
Porcentaje acumulado de varianza (%)	37,5	58	69,6	78,7

Una de las formas para comprobar que los resultados obtenidos en el análisis de componentes principales, es a través del dendrograma, creado usando el método de la distancia euclidiana al cuadrado y el vecino más cercano. Los resultados se observan en la Figura 4.

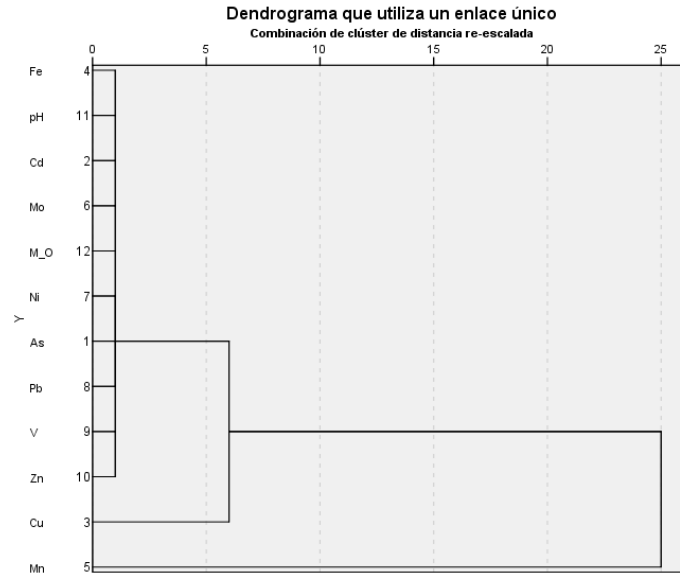


Figura 4: Dendrograma de análisis de conglomerado, basado en el método de distancia euclidiana al cuadrado (elaboración propia).

4.2 Valores de Fondo

Como se dijo anteriormente, las muestras se tomaron siguiendo el criterio utilizado por la USEPA. Para identificar si las muestras provienen de diferentes poblaciones se realizó el Test Kruskal-Wallis, con el cual se pudo corroborar que el origen de los resultados obtenidos por muestras de la zona urbana es distinto a las muestras obtenidas de la zona rural. (resultados del test, se encuentran en el Anexo). Por lo tanto, se determinan los valores de fondo de dicha zona (Tabla 4), de los cuales se elige el método, mediana + 2* desviación mediana absoluta; ya que es el más adecuado de acuerdo al principio de precaución, considerando valores de fondo conservadores (Figura 5-6). Los resultados expresados en (mg kg^{-1}) son: As=31.6, Cd=0.7, Cu=295, Fe=7.4%, Mn=1423, Mo=2.1, Ni=16.9, Pb=48.6, V=199 y Zn=192.

Tabla 4: Valores de fondo (mg kg^{-1}) (elaboración propia).

	MAD	\bar{X}^1+2*S^2	$Me^3+ 2* MAD^4$	TIF ⁵	Percentil		
					90	95	98
As	6,8	153	31,6	51,8	54,8	75,9	122
Cd	0,15	3,4	0,7	1	1,1	1,4	2,7
Cu	66,3	1760	295	519	537	999	1598
Fe %	1	9,4	7,4	9,7	7,6	8,9	11,3
Mn	234	2027	1423	2013	1710	2080	2414
Mo	0,5	12,7	2,1	3,8	3,3	6,8	8,9
Ni	2,5	21,8	16,9	21,4	17,6	21,1	26,1
Pb	8,1	527	48,6	72,4	69,3	81,4	134
V	26,0	284	199	263	223	272	349
Zn	33,4	284	192	265	208	252	322

¹ Promedio ² Desviación Estándar ³ Mediana ⁴ Desviación Absoluta de la Mediana ⁵ Upper Whisker.

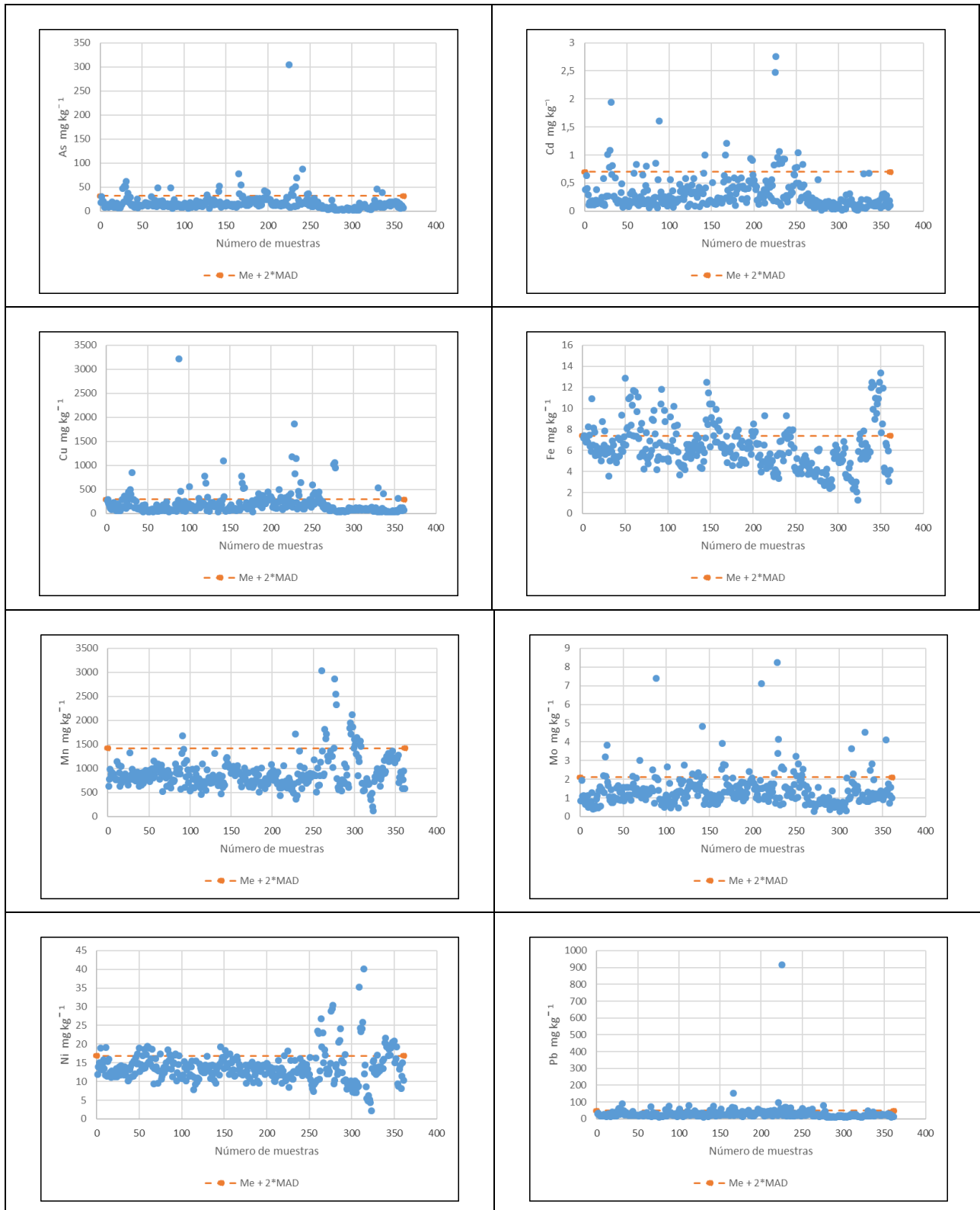


Figura 5: Número de muestras y la distribución del horizonte del suelo para As, Cd, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni y Pb (elaboración propia).

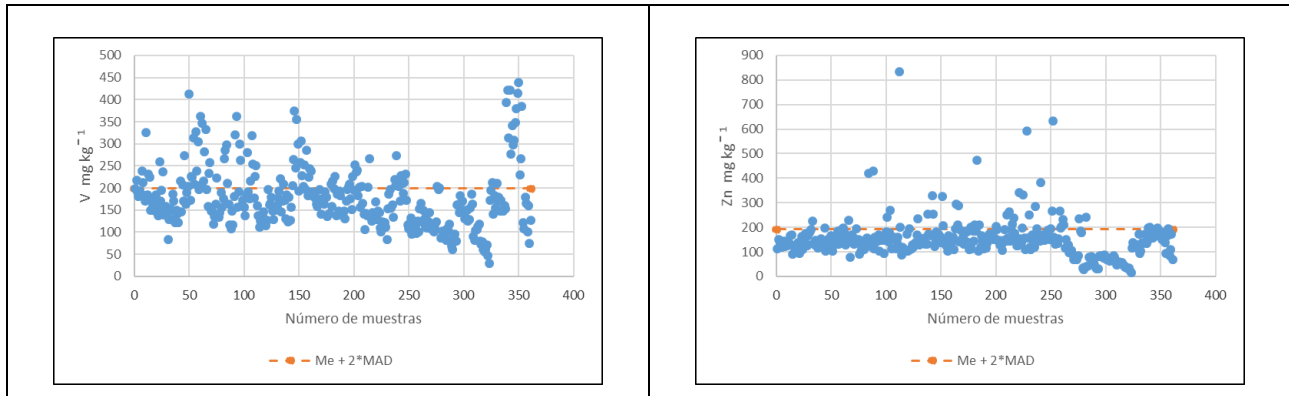


Figura 6: Número de muestras y la distribución del horizonte del suelo para V y Zn (elaboración propia).

A continuación, se realiza una comparación entre los valores de fondo calculados con los datos geológicos y los estimados de la zona rural (Tabla 5), de los cuales se observa que no existen diferencias significativas entre Cd, Fe, Mn, Mo, Ni, V y Zn demostrando que están determinados por la naturaleza geoquímica de la roca, a diferencia de As, Cu y Pb que muestran diferencias en ordenes de magnitud, de los cuales se puede decir que han sido afectados por actividad antropogénica.

Por lo tanto, la zona rural es la elegida para determinar los valores de fondo ya que presenta las características indicadas para representar la condición natural del suelo.

Tabla 5: Comparación de los valores de fondo de muestras geológicas y de zona rural (elaboración propia).

	Nivel de Fondo (n=565) Suelo	Nivel de Fondo (n=16) Geológica
As	31,6	6,3
Cd	0,7	0,6
Cu	295,5	72,3
Fe	7,4	8,2
Mn	1423	1582
Mo	2,1	2,0
Ni	16,9	17,8
Pb	48,6	8,2
V	199	176
Zn	192	125

En la Tabla 6 se realiza una comparación entre los valores de fondo, y el 95% de confianza que corresponde a la zona urbana, ya que éste es el sector afectado por el complejo industrial ventanas, donde se puede observar que todos los metales pesados superan el valor de fondo.

Los que superan por sobre el 40% a los valores de fondo son As, Cd y Cu; y los valores más bajos los presenta Ni y Mn.

Tabla 6: Porcentaje de muestras que superaron el valor de fondo en el suelo, para los metales pesados estudiados (elaboración propia).

Elemento	Me ¹⁺² *MAD ²	TIF ³	Percentil 90
As	58%	32%	28%
Cd	50%	29%	21%
Cu	70%	48%	46%
Fe %	17%	0%	15%
Mn	32%	3%	18%
Mo	69%	44%	51%
Ni	20%	0%	17%
Pb	40%	11%	15%
V	27%	3%	18%
Zn	24%	0%	17%

¹ Mediana ² Desviación Absoluta de la Mediana ³ Upper Whisker.

En la Tabla 7 se presentan diferentes ciudades puertos, las cuales compara sus concentraciones promedias de metales pesados, donde las concentraciones de Cu y V en suelos de Arica son menores para las concentraciones de la ciudad de Valparaíso. Con respecto al arsénico presente en el suelo, Valparaíso es una de las ciudades con concentraciones promedias más altas.

Es necesario destacar que estas comparaciones son solo referenciales ya que no presentan las mismas semejanzas físico-químicas u de otro tipo de similitudes de los suelos de éstos puertos.

Tabla 7: Promedio de las concentraciones de metales pesados (mg kg⁻¹), registrado en distintas ciudades del mundo (Tume, Roca, Rubio, King, & Bech, 2016).

Ciudad	As	Cu	Ni	Pb	V	Zn	Referencia
Aberdeen (Escocia)	ND	27	14,9	94,4	ND	58,4	Peterson (1996)
Annaba (Argelia)	ND	39	ND	52,1	ND	67,5	Mass (2010)
Arica (Chile)	22,8	123	53	267	54,3	220,5	Tume (2016)
Atenas (Grecia)	29	48	111	77	ND	122	Argyraki (2014)
Baltimore (USA)	ND	45	27	231	37	141	Yesilonis (2008)
Estocolmo (Suecia)	ND	71	ND	101	ND	171	Linde (2005)
Hong Kong (China)	Nd	16,2	4,08	88,1	ND	103	Lee (2006)
Lisbon (Portugal)	5,3	37	43	89	48	97	Cachada (2013)
Montreal (Canadá)	ND	217	75,3	497	ND	489	Ge (2000)
Nápoles (Italia)	12,4	163	118	100	71	142	Cicchella (2005)
Oslo (Noruega)	5,5	31,7	28,4	55,6	ND	160	Tijhuis (2002)
Palermo (Italia)	ND	77	19,1	253	58	151	Manta (2002)
Paraná (Brasil)	2,1	163,8	39,9	20,6	576,5	128	Licht (2006)
Talcahuano (Chile)	8,1	50,5	31,9	49,2	ND	246	Tume (2014)
Tallin (Estonia)	23	45	16	75	32	156	Bityukova (2000)
Trondheim (Noruega)	3	42,3	17,8	51,2	55,6	ND	Ottensen and Langedal (2001)
Galway (Irlanda)	8,6	33,2	20,7	78,4	52,5	99,3	Zhang (2006)
Valparaíso (Chile)	21,5	236	13,3	39,6	172,4	146,2	Estudio

4.3 Evaluación de riesgo ecológico

La evaluación de riesgo ecológico, permitirá determinar mediante indicadores, los niveles de contaminación del suelo. Los resultados del índice de geoacumulación se presentan en la Tabla 8, los cuales indican valores IGEO por sobre 5 (contaminación extrema) As, Cd, Cu y Mo, sin embargo, en el rango de “moderadamente contaminado”, los metales con mayor número de muestras son Cd, Cu y Mo. En la categoría de “ligeramente contaminado” sobresale V y Cu.

Los valores del factor de enriquecimiento, manifiestan que el Pb es el metal con un enriquecimiento extremadamente alto, pero a la vez son sólo dos muestras las que caben en esta categoría.

En el caso de As, Cd, Cu y Mo presentan en promedio una muestra con un alto nivel de enriquecimiento, y para el rango de “enriquecimiento moderado” el más bajo de los metales analizados es V, y el más alto es Cu. El tercer índice ecológico estudiado CF, revela que existe un muy alto factor de contaminación para As, Cd, Cu, Mo y Pb; y en el rango de “contaminación moderada” el mayor es V y el menor es Mn.

Tabla 8: Número de muestras de suelo en cada categoría de evaluación del riesgo ecológico en suelos de las comunas de Quintero y Puchuncaví (zona urbana-rural) (elaboración propia).

		As	Cd	Cu	Mn	Mo	Ni	Pb	V	Zn
IGEO ¹	IGEO<0	527	537	510	554	528	554	540	531	547
	0<IGEO<1	29	22	35	11	23	11	20	34	14
	1<IGEO<2	7	4	15		12		3		4
	2<IGEO<3	1	1	4		2				
	3<IGEO<4							1		
	4<IGEO<5	1	1	1		1				
	IGEO>5							1		
EF ²	EF<2	532	537	511	542	520	533	532	565	538
	2<EF<5	28	20	38	23	37	32	30		26
	5<EF<20	3	7	15		7		1		1
	20<EF<40	2	1	1		1				
CF ³	EF>40							2		
	CF<1	492	498	463	511	476	485	486	429	480
	1<CF<3	64	61	82	54	75	80	74	136	81
	3<CF<6	7	4	15		12		3		4
	CF>6	2	2	5		2		2		

¹ Índice de Geoacumulación, ² Factor de Enriquecimiento, ³ Factor de Contaminación.

Del índice de contaminación integrado, (Tabla 9) se observa que 65 muestras son participantes del rango de “contaminación moderada”; 9 muestras para la categoría de “contaminación alta” y por último 2 muestras consideradas como “contaminación extremadamente alta”.

Tabla 9: Número de muestras para cada rango del índice de contaminación integrada y grado de contaminación, para los metales estudiados en los suelos de la zona urbano-rural (elaboración propia).

		Número de muestras
CDEG ¹	CDEG < 8	489
	8 < CDEG < 16	65
	16 < CDEG < 32	9
	CDEG > 32	2
IPI ²	IPI < 1	489
	1 < IPI < 2	65
	2 < IPI < 5	9
	IPI > 5	2

¹Grado de contaminación, ²índice de contaminación integrada

5. RESULTADOS

Según el método, mediana +2*MAD (Desviación absoluta de la mediana) los valores de fondo en (mg kg^{-1}) estudiados en los suelos urbanos-rurales de las Comunas de Puchuncaví y Quintero son: As=31.6, Cd=0.7, Cu=295, Fe=7.4%, Mn=1423, Mo=2.1, Ni=16.9, Pb=48.6, V=199 y Zn=192.

Con respecto a los valores obtenidos de la evaluación de riesgo ecológico, éstos indican que los elementos con menor grado de contaminación son Mn, Ni y Zn, a diferencia de As, Cu y Mo que presentan los niveles más altos de contaminación. También se obtuvo del grado de contaminación (CDEG) que existen 9 muestras en el rango de “considerable contaminación” y 2 muestras en la categoría de “muy alta contaminación”.

Acerca de la correlación que se realizó, revela que Cd/As, Cu/Cd y Pb/Cd presentan correlaciones significativas lo que indica su origen común (antropogénico). Además, añadir que, de la misma correlación realizada, revela que no existe relación entre los metales estudiados y el pH y MO.

Con respecto al uso del suelo, se observa que las concentraciones de metales obtenidas en la zona urbana son evidentemente más altas, que la zona rural, este hecho puede estar relacionado con las industrias ubicadas en la zona urbana.

6. REFERENCIAS

- Aguila, P., Fuente, J., & Paulín, R.** (2005). "Determinación de factor de enriquecimiento y geoacumulación de Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn en suelos de la cuenca alta del río Lerma". *CIENCIA ergo-sum*, 155-161.
- CENMA-MMA.** (2013). "Evaluación de exposición ambiental a sustancias potencialmente contaminantes presentes en el aire, comunas de Concón, Quintero y Puchuncaví".
- Galán, E., & Romero, A.** (2008). Contaminación de Suelos por metales pesados. *Sociedad española de mineralogía*.
- Jiang, X., Lu, W., Zhao, H., Yang, Q., & Yang, Z.** (2014). "Potential ecological risk assessment and prediction of soil heavy-metal pollution around coal gangue dump". *Natural Hazards and Earth System Science*, 1599-1610.
- Juárez, P., De la Fuente, J., & Vaca, R.** (2005). "Determinación de factores de enriquecimiento y geoacumulación de Cd, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn en suelos de la cuenca alta del río Lerma". *CIENCIA ergo sum*.
- Martínez, R., Pendás, L., Ortega, M., & Pérez, A.** (2009). "El Coeficiente de Correlación de los Rangos de Spearman Caracterización". *SciELO*.
- Parra, S., Bravo, M., Quiroz, W., Moreno, T., Karanasiou, A., Font, O., . . . Cereceda, F.** (2014). "Distribution of trace elements in particle size fractions for contaminated". *Chemosphere*, 513-521.
- Reimann, C., & Caritat, P.** (2016). "Establishing geochemical background variation and values for 59 elements in Australian surface soil". *ELSEVIER*.
- Reimann, C., Demetriades, A., Caritat, P., Fabian, K., Birke, M., Filzmoser, P., . . . Mutschullat, J.** (2017). "GEMAS: Establishing geochemical background and threshold for 53 chemical elements in European agricultural soil". *ELSEVIER*.
- Reimann, C., Filzmoser, P., & Garrett, R.** (2004). "Background and threshold: critical comparison of methods of determination". *ELSEVIER*.
- Salmanighabeshi, S., & Palomo-Martín, R.** (2015). "Long-term assessment of ecological risk from deposition of elemental pollutants in the vicinity of the industrial area of Puchuncaví-Ventanas, central Chile". *Science of the Total Environment*, 335-343.
- Salmani-Ghabeshi, S., Palomo-Marín, R., Bernalte, E., Rueda-Holgado, F., Miró-Rodríguez, C., Cereceda-Balic, F., . . . Pinilla-Gil, E.** (2016). "Spatial gradient of human health risk from exposure to trace elements and radioactive pollutants in soils at the Puchuncaví-Ventanas industrial complex, Chile". *Environmental Pollution*, 322-330.
- Tume, P., King, R., Gonzáles, E., Bustamante, G., Reverter, F., Roca, N., & Bech, J.** (2014). "Trace element concentrations in schoolyard soils from the port city of Talcahuano, Chile". *ELSEVIER*.
- Tume, P., Roca, N., Rubio, R., King, R., & Bech, J.** (2016). An assessment of the potentially hazardous element contamination in urban soils of Arica, Chile. *ELSEVIER*.



UCSC

Simposio de Habilitación Profesional
Departamento de Ingeniería Civil
19 de Octubre del 2017