

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Civil



Transferencia de metales pesados Cu, Pb, Zn, Ni, Co y Cr desde un suelo de la comuna de Talcahuano a las plantas Salicornia y Lolium Perenne.

CAROL ALONDRA RIFFO ESTAY

INFORME DE PROYECTO DE TÍTULO PARA OPTAR AL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

Profesor Guía

Dr. Pedro Tume Zapata.

Profesor Informante

Prof. Francesc Ferraro C.

Concepción, Diciembre 2016

RESUMEN EJECUTIVO

En una zona específica de la comuna de Talcahuano, se encuentra potencialmente contaminada por metales pesados, debido al gran crecimiento tanto industrial, comercial e inmobiliario que ha tenido esta comuna en los últimos años. Este problema medioambiental, que no solo tiene la comuna, sino a nivel mundial, ha conllevado a realizar nuevas propuestas, para la rehabilitación o mejoramiento de los suelos.

Una de estas propuestas que se realizará en este proyecto, es la fitoextracción, la cual, por medio de las raíces o partes aéreas de las plantas, absorbe los metales pesados del suelo, los cuales para este estudio son: Zn, Cu, Pb, Cr, Ni y Co, para así eliminarlos y tener una limpieza de éste a largo plazo.

Se utilizaron 2 tipos de plantas, *Lolium Perenne* o más conocida como césped y *Salicornia*, planta originaria del norte de Chile, las cuales se distribuyeron en 21 maceteros, junto con el suelo de la zona contaminada de Talcahuano. Se utilizaron concentraciones Pseudo-total y Biodisponible del suelo para su análisis.

Para determinar la propiedad de Hiperacumuladoras para estas plantas, se deben cumplir 3 parámetros, los cuales son: Primer parámetro: Factor de Traslocación debe ser mayor a 1. Segundo parámetro: Factor de Bioacumulación, debe ser mayor a 1 y Tercer parámetro: la parte aérea de la planta, debe tener concentraciones superiores a 100 mg/Kg para Cd; 1000 mg/Kg para Al, As, Co, Cu, Cr, Ni, Se, Pb y 10000 mg/Kg para Zn y Mn. Los resultados arrojaron que ninguna de las dos plantas, analizadas tanto con concentraciones Pseudo-Total y Biodisponible del suelo, cumplen con los 3 requisitos, por lo cual no se comportan como hiperacumuladoras, pero sin embargo la especie *Salicornia*, para una concentración biodisponible del suelo, posee factores tanto de traslocación como de bioacumulación superiores a 1, por lo tanto, esta planta puede transferir los metales pesados desde la raíz hacia la parte aérea, sirviendo así, para una fitoextracción, al contrario de *Lolium Perenne*, que para concentraciones Pseudo-total y biodisponible arrojó que no sirve para una fitoextracción, pero si, para una fitoestabilización.

ABSTRACT

In the commune of Talcahuano, a specific zone it is potentially contaminated by heavy metals, because of the large industrial, commercial and real estate growth that has taken this commune in the last years. This environmental problem, which not only has the commune, but worldwide, has led to make new proposals for the rehabilitation or improvement of the soil.

One of these proposals that will be made in this project is phytoextraction, which, through the roots or aerial parts of the plants will absorb heavy metals like Zn, Cu, Pb, Cr, Ni y Co from the soil, and later be eliminated and has a cleaned soil in the long term.

Two types of plants were used, perennial ryegrass, better known as lawn and Salicornia, a native plant in northern Chile, which were distributed in 21 pots, along with the soil from the contaminated area of Talcahuano. Pseudo-total and Bioavailable soil concentrations are used for analysis.

To determine the ownership of Hyperaccumulator for these plants should be satisfy 3 parameters, which are: First parameter: Translocation factor must be greater than 1. Second parameter: Bioaccumulation factor, must be greater than 1. The third parameter: : The aerial part of the plant, should have concentrations above 100 mg / kg for Cd; 1000 mg / kg for Al, As, Co, Cu, Cr, Ni, Se, Pb and 10,000 mg / kg for Zn and Mn. The results showed that neither plants, analyzed with both Pseudo-Total and Bioavailable concentrations of the soil, meets 3 requirements, which do not behave as Hyperaccumulator, but nevertheless the Salicornia species, for a bioavailable soil concentration, possesses factors both translocation as above 1 bioaccumulation, therefore, this plant can transfer the heavy metals from the root to the aerial part, thereby serving, for phytoextraction, unlike Lolium perenne, For both Pseudo-total and bioavailable concentrations, showed that it is not useful for a phytoextraction, but it does for a phytostabilization.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Ana y Daniel y mis hermanos Daniel y Denisse por creer, confiar y apoyar en cada proceso tanto universitario como de la vida, sin su contención, consejos y fuerzas que me dan día a día, jamás lo hubiera podido lograr, gracias por creer en mí y nunca dejarme flaquear, ya que gracias a ustedes, lo imposible se hizo posible.

Agradecer a mis abuelos Margarita y Luis, ya que sin su preocupación, cariño y fe en mí, el camino hubiera sido mucho más difícil.

A mi pololo Juan Ignacio, por su amor infinito, comprensión y apoyo incondicional en todo este proceso, gracias amor por contenerme cuando todo iba mal y darme fuerzas y valor para seguir adelante en este proyecto.

Al profesor Pedro Tume por la guía, comprensión, apoyo y confianza otorgado en todo mi proceso de formación académica y profesional, sobre todo, en esta última etapa de elaboración de proyecto de título.

Finalmente agradecer a Dios por darme la paz y tranquilidad en momentos donde quería renunciar a todo, guiándome y otorgándome fuerzas día a día al igual que la confianza y la fe en mí.

INDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Introducción	1
1.1.1 Fitoextracción	1
1.2 Objetivo General	2
1.3 Objetivos Específicos	2
1.4 Justificación del Proyecto	2
1.5 Área de Estudio	3
1.6 Geología.....	3
1.7 Climatología.....	4
1.8 Demografía.....	5
1.9 Muestras.....	5
1.9.1 Definición de Metales Pesados	5
1.9.2 Zona de toma de muestras.....	5
1.9.3 Toma de muestras.....	6
1.9.4 Almacenamiento	8
CAPITULO 2: MARCO TEORICO.....	9
2.1 Estadística Descriptiva.....	9
2.1.1 Medidas de Tendencia Central	9
2.1.2 Medidas de dispersión.....	9
2.1.3 Box Plot.....	10
2.1.4 Otros Parámetros Estadísticos	11
2.2 Test de Normalidad	12
2.3 Correlación de Spearman	12
2.4 Relación de concentración Biodisponible y Pseudo-Total del suelo.....	13

2.5	Concentración Pseudo-Total y Biodisponible del suelo	13
2.6	Índices de Contaminación	14
2.6.1	Índice de Geo-acumulación	14
2.6.2	Factor de Enriquecimiento (EF, Enrichment Factor)	15
2.6.3	Factores de Contaminación (CF, Contamination Factors)	16
2.7	Fitorremediación	16
2.8	Fitoestabilización.....	22
2.9	Análisis Textural de las muestras	22
CAPITULO 3: METODOLOGÍA.....		25
3.1	Obtención de plantas.....	25
3.2	Descripción de las plantas.....	25
3.2.1	Lolium Perenne.....	25
3.2.2	Salicornia.....	26
3.3	Preparación de los maceteros	27
3.4	Tratamiento de muestras	30
3.4.1	Suelo	30
3.4.2	Plantas	30
3.5	Análisis Químico	31
3.5.1	Suelo	31
3.5.1.1	Granulometría	31
3.5.1.2	Carbono Orgánico	32
3.5.1.3	Cálculo de pH	34
3.5.2	Plantas	35
3.5.2.1	Contenido de metales pesados	35
3.6	Concentración Pseudo-Total del suelo.....	36
3.7	Concentración Biodisponible del suelo.....	36

CAPITULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
4.1 Resultados	38
4.2 Análisis Textural del suelo.....	38
4.3 Análisis exploratorio de los datos.....	40
4.3.1 Propiedades Convencionales	40
4.3.1.1 Análisis de Carbono Orgánico (C.O)	40
4.3.1.2 Análisis de pH.....	42
4.3.1.3 Análisis de Arena	43
4.3.1.4 Análisis de Limo	44
4.3.1.5 Análisis de Arcilla.....	45
4.3.2 Metales Pesados	46
4.3.2.1 Metales Pesados Pseudo-Total.....	46
4.3.2.2 Análisis Cu	46
4.3.2.3 Análisis Pb.....	47
4.3.2.4 Análisis Zn.....	48
4.3.2.5 Análisis Ni	49
4.3.2.6 Análisis Co	50
4.3.2.7 Análisis Cr	51
4.3.3 Metales Pesados Biodisponible	52
4.3.3.1 Análisis Cu	52
4.3.3.2 Análisis Pb.....	53
4.3.3.3 Análisis Zn.....	54
4.3.3.4 Análisis Ni	55
4.3.3.5 Análisis Co	56
4.3.3.6 Análisis Cr	57
4.4 Estadística Descriptiva.....	58

4.4.1	Interpretación de las propiedades edafológicas	58
4.4.2	Interpretación de Metales Pesados	59
4.4.2.1	Metales Pesados en concentración Pseudo -Total del suelo.	59
4.4.2.2	Metales Pesados en concentración Biodisponible del suelo.	60
4.5	Prueba de Hipótesis	61
4.6	Correlación de Spearman entre los elementos.....	62
4.7	Relación entre Metales en concentraciones Biodisponible y Pseudo-total del suelo.....	66
4.8	Línea Base.....	67
4.8.1	Análisis valores de fondo para metales pesados en concentración Pseudo-Total del suelo. 67	
4.8.2	Análisis valores de fondo para metales pesados en concentración Biodisponible del suelo. 68	
4.9	Índices de contaminación.....	68
4.9.1	Índice de Geo - acumulación (I_{Geo})	68
4.9.2	Índice de Geo - acumulación para metales pesados en concentración Pseudo-Total del suelo. 68	
4.9.3	Índice de Geo - acumulación para metales pesados en concentración Biodisponible del suelo. 71	
4.9.4	Índice integrado de Contaminación (IPI)	72
4.9.5	Índice integrado de contaminación para los maceteros con metales pesados en concentración Pseudo-Total del suelo.	72
4.9.6	Índice integrado de contaminación para los maceteros con metales pesados en concentración Biodisponible del suelo.	73
4.9.7	Factor de Enriquecimiento	73
4.10	Fitoextracción.....	75
4.10.1	Fitoextracción con Lolium Perenne ó Césped	76
4.10.1.1	Acumulación de metales pesados.....	76
4.10.1.2	Índices de valoración de tolerancia de metales.	79
4.10.2	Fitoextracción con Salicornia o Espárrago de Mar	85

4.10.2.1 Acumulación de metales pesados Pseudo-Total y Biodisponible del Suelo en Salicornia o Espárrago de Mar	85
4.10.2.2 Índices de valoración de tolerancia de metales	86
CAPITULO 5: CONCLUSIONES	91
BIBLIOGRAFÍA	93
ANEXOS.....	98
ANEXO I.....	99
ANEXO II.....	102
ANEXO III.....	108
ANEXO IV.....	110
ANEXO V.....	117

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la Comuna de Talcahuano	3	
Figura 2. Punto de Extracción del suelo de la comuna de Talcahuano.	6	
Figura 3. Detalle del punto de extracción de suelo analizar en la comuna de Talcahuano.	6	
Figura 4. Esquema de Fitotecnologías que logran la recuperación del suelo contaminado (Cubillos, 2011).	19	
Figura 5. Triángulo textural del suelo, según USDA.	23	
Figura 6. Lolium Perenne.....	26	
Figura 7. Salicornia.....	27	
Figura 8. La imagen de la izquierda corresponde a las muestras saturadas y la imagen de a derecha corresponde a la germinación de ambas especies.	28	
Figura 9. La imagen de la izquierda corresponde a semillas de salicornia y la imagen de la derecha es la distribución en los vasos del ácido gibberelico y el aceite junto a las semillas de salicornia... ..	29	
Figura 10. La imagen de la izquierda se muestra la división de germinación por ambos métodos y la imagen de la derecha muestra el crecimiento de la salicornia después de aplicada la hormona.	29	
Figura 11. Tubo Falcon.	30	
Figura 12. Secado en liofilizador de Lolium Perenne (Izquierda) y Salicornia (Derecha).	31	
Figura 13. Ensayo de Hidrómetro.	32	
Figura 14. Curva de calibración para la obtención de carbono orgánico.	33	
Figura 15. Agitación de la mezcla de suelo con agua destilada para luego medir el pH.	35	
Figura 16. Digestión de las muestras vegetales.	36	
Figura 17. Triángulo Textural para las 11 muestras en suelo Top Soil.....	38	
Figura 18. Triángulo Textural para las 10 muestras en suelo Sub Soil.....	39	
Figura 19. Triángulo Textural para las 21 muestras en suelo en Top Soil y Sub Soil.	40	
Figura 20. Histograma de carbono orgánico	Figura 21. Box Plot de carbono orgánico.....	41
Figura 22. Porcentaje Acumulado de carbono orgánico (C.O)%		41
Figura 23. Histograma de pH	Figura 24. Box Plot de pH.	42
Figura 25. Porcentaje acumulado de pH.		42

Figura 26. Histograma Arena (%)	Figura 27. Box Plot Arena (%).....	43
Figura 28. Porcentaje acumulado Arena (%).....		43
Figura 29. Histograma Limo (%)	Figura 30. Box Plot Limo (%).....	44
Figura 31. Porcentaje Acumulado Limo (%).....		44
Figura 32. Histograma Arcilla (%)	Figura 33. Box Plot Arcilla (%).....	45
Figura 34. Porcentaje acumulado Arcilla (%).....		45
Figura 35. Histograma Cu (mg/Kg)	Figura 36. Box Plot Cu (mg/Kg)	46
Figura 37. Porcentaje Acumulado Cu (mg/Kg).....		46
Figura 38. Histograma Pb (mg/Kg).	Figura 39. Box Plot Pb (mg/Kg).	47
Figura 40. Porcentaje Acumulado Pb (mg/Kg).		47
Figura 41. Histograma Zn (mg/Kg).	Figura 42. Box Plot Zn (mg/Kg).....	48
Figura 43. Porcentaje acumulado Zn (mg/Kg).		48
Figura 44. Histograma Ni (mg/Kg).	Figura 45. Box Plot Ni (mg/Kg).....	49
Figura 46. Porcentaje acumulado Ni (mg/Kg).....		49
Figura 47. Histograma Co (mg/Kg)	Figura 48. Box plot Co (mg/Kg)	50
Figura 49. Porcentaje acumulado Co (mg/Kg).....		50
Figura 50. Histograma Cr (mg/Kg)	Figura 51. Box Plot Cr (mg/Kg)	51
Figura 52. Porcentaje acumulado Cr (mg/Kg).....		51
Figura 53. Histograma Cu (mg/Kg).	Figura 54. Box Plot de Cu (mg/Kg).....	52
Figura 55. Porcentaje acumulado Cu (mg/Kg).....		52
Figura 56. Histograma Pb (mg/Kg)	Figura 57. Box Plot Pb (mg/Kg)	53
Figura 58. Porcentaje acumulado Pb (mg/Kg)		53
Figura 59. Histograma Zn (mg/Kg)	Figura 60. Box Plot Zn (mg/Kg).....	54
Figura 61. Porcentaje acumulado Zn (mg/kg)		54
Figura 62. Histograma Ni ($\mu\text{g/Kg}$)	Figura 63. Box Plot Ni ($\mu\text{g/Kg}$).....	55
Figura 64. Porcentaje acumulado Ni ($\mu\text{g/Kg}$)		55

Figura 65. Histograma Co ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	Figura 66. Box Plot Co ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	56
Figura 67. Porcentaje acumulado Co ($\mu\text{g}/\text{Kg}$)		56
Figura 68. Histograma Cr ($\mu\text{g}/\text{Kg}$)	Figura 69. Box Plot Cr ($\mu\text{g}/\text{Kg}$)	57
Figura 70. Porcentaje acumulado Cr ($\mu\text{g}/\text{Kg}$)		57
Figura 71. Gráficos de Box Plot de todos los metales pesados en concentración Pseudo-Total del suelo.		70
Figura 72. Gráficos de Box Plot del Índice de Geo-acumulación de todos los metales pesados en concentración Biodisponible del suelo.		72
Figura 73. Gráficos de Box Plot para el factor de enriquecimiento para metales pesados en concentración Pseudo-total del suelo.		74
Figura 74. Gráfico del Factor de Traslocación (FT) para Lolium Perenne en los 10 maceteros.		80
Figura 75. Gráfico del Factor de Bioacumulación en la raíz (RAF) para concentraciones Pseudo-Total del suelo en los 10 maceteros.		81
Figura 76. Gráfico del Factor de Bioacumulación en la raíz (RAF) para concentraciones biodisponible del suelo en los 10 maceteros.		82
Figura 77. Gráfico del Factor de Bioacumulación en la parte aérea (SAF) para concentraciones Pseudo-Total del suelo en los 10 maceteros.		83
Figura 78. Gráfico del Factor de Bioacumulación en la parte aérea (SAF) para concentraciones biodisponible del suelo en los 10 maceteros.		84
Figura 79. Gráfico del Factor de Traslocación (FT) para Salicornia en CM7.		86
Figura 80. Gráfico del Factor de Bioacumulación en la raíz (RAF) para concentraciones Pseudo-Total del suelo en CM7.		87
Figura 81. Gráfico del Factor de Bioacumulación en la raíz (RAF) para concentraciones Biodisponible del suelo en CM7.		88
Figura 82. Gráfico del Factor de Bioacumulación en la parte aérea (SAF) para concentraciones pseudo-total en el suelo.		89
Figura 83. Gráfico del Factor de Bioacumulación en la parte aérea (SAF) para concentraciones biodisponibles en el suelo.		90
Figura 84. Gráfico factor de enriquecimiento.		116

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Distribución de Top Soil y Sub Soil en los 21 maceteros.	7
Tabla 2. Distribución de Lolium Perenne y Salicornia en los maceteros.	7
Tabla 3. Codificación de los Maceteros de Salicornia y Lolium Perenne, tanto Top soil como Sub Soil.	8
Tabla 4. Clasificación de la relación entre dos variables categóricas. (Manzano, 2014)	13
Tabla 5. Clasificación de dos parámetros: clase de índice de geo - acumulación y grado de contaminación.....	14
Tabla 6. Categorías de contaminación en base al factor de enriquecimiento.	15
Tabla 7. Clasificación según índice integrado de contaminación.	16
Tabla 8. Interpretación de los porcentajes de Carbono Orgánico para muestras de suelo.	34
Tabla 9. Clasificación del suelo según su pH (USDA, 1999).....	34
Tabla 10. Parámetros de las propiedades estadísticas del suelo.	58
Tabla 11. Propiedades estadísticas de metales pesados en concentración pseudo-total del suelo	59
Tabla 12. Propiedades estadísticas de metales pesados en concentración biodisponible del suelo. .	60
Tabla 13. Test de normalidad Shapiro Wilk para las propiedades edafológicas.	61
Tabla 14. Test de normalidad Shapiro Wilk para los metales pesados en concentraciones Pseudo-Total del suelo.	61
Tabla 15. Test de normalidad Shapiro Wilk para los metales pesados en concentración Biodisponible del suelo.	62
Tabla 16. Correlación entre metales pesados en concentración Pseudo-Total del suelo.....	62
Tabla 17. Correlación entre metales pesados en concentraciones Biodisponible del suelo.	63
Tabla 18. Correlación entre metales pesados en concentraciones Pseudo-Total y Biodisponible del suelo.	64
Tabla 19. Correlación entre metales pesados en concentraciones Pseudo-Total y las propiedades edafológicas.....	64
Tabla 20. Correlación entre metales pesados en concentración Biodisponible del suelo y las propiedades edafológicas.	65

Tabla 21. Relación entre las concentraciones de metales pesados biodisponible y Pseudo-Total del suelo.	66
Tabla 22. Valores de fondo para los metales pesados.	67
Tabla 23. Propiedades Estadísticas del Índice de Geo-acumulación para metales pesados en concentración Pseudo-Total del suelo.	69
Tabla 24. Propiedades Estadísticas del Índice de Geo-acumulación para metales pesados en concentración Biodisponible del suelo.	71
Tabla 25. Factor de enriquecimiento del suelo.	73
Tabla 26. Concentraciones de Zn, Cu, Pb, Cr y Ni en Lolium Perenne en los maceteros CM2, CM3, CM4, CM5, CM6, PM1, PM2, PM3, PM7, PM8.	77
Tabla 27. Concentraciones de Zn, Cu, Pb, Cr y Ni en Salicornia en el macetero CM7	85

ÍNDICE TABLA ANEXO

Tabla Anexo 1.....	100
Tabla Anexo 2.....	101
Tabla Anexo 3.....	103
Tabla Anexo 4.....	104
Tabla Anexo 5.....	105
Tabla Anexo 6.....	106
Tabla Anexo 7.....	107
Tabla Anexo 8.....	109
Tabla Anexo 9.....	111
Tabla Anexo 10.....	112
Tabla Anexo 11.....	113
Tabla Anexo 12.....	114
Tabla Anexo 13.....	115
Tabla Anexo 14.....	118
Tabla Anexo 15.....	118
Tabla Anexo 16.....	119
Tabla Anexo 17.....	119
Tabla Anexo 18.....	120
Tabla Anexo 19.....	120
Tabla Anexo 20.....	121
Tabla Anexo 21.....	121
Tabla Anexo 22.....	122
Tabla Anexo 23.....	122

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

El suelo es un material heterogéneo, el cual se produce por la disgregación física de las rocas y también de alteraciones meteorológicas en el medio ambiente y al igual que nuestra atmósfera, este sistema tan complejo se ha visto muy afectado por la contaminación, tanto natural como antrópica. (Pascal, 2015)

La contaminación en los suelos consiste en la acumulación de ciertos elementos, que en altos niveles, repercuten negativamente en el comportamientos de los suelos, al igual que en la salud humana, animal y vegetal.

Los suelos habitualmente se contaminan de distintas formas, entre éstas se encuentran las filtraciones de alcantarillado o desde zonas de rellenos sanitarios al igual que vertederos, cuando se rompen tanques de almacenamiento subterráneo, aplicación de pesticida, un volcán activo, acumulación de desechos de productos industriales, emisiones vehiculares, minería, entre otros. (Bellver, 2016)

Cuando la contaminación del suelo llega a un estado crítico, se afecta el equilibrio natural, teniendo como consecuencia los graves riesgos para la salud humana.

1.1.1 Fitoextracción

La fitoextracción hace referencia a la absorción de contaminantes del suelo por las raíces de las plantas, y su transporte a las partes aéreas o cualquier parte que sea recolectable, para eliminar los contaminantes y promover una limpieza a largo plazo del suelo. Según este enfoque, las plantas capaces de acumular metales deben ser plantadas en las zonas contaminadas y la biomasa enriquecida en metales pesados por la absorción radicular debe ser cosechada. Como resultado, una fracción de metal pesado se elimina del sistema.

1.2 Objetivo General

- Evaluar si las plantas *Lolium perenne* y *Salicornia* podrían ser utilizadas con fines de fitorremediación (rehabilitadoras de suelos contaminados).

1.3 Objetivos Específicos

- Evaluar la calidad ambiental de las muestras.
- Análizar la fitoextracción y fitoestabilización de las plantas *Salicornia* y *lolium perenne*, para así ver si se clasifican como hiperacumuladoras.

1.4 Justificación del Proyecto

Talcahuano es una comuna donde existe un alto nivel de industrialización, entre las cuales se encuentran las pesqueras, las petroquímicas, la fábrica de cemento, la industrias metalúrgicas y el astillero naval, entre otras.

Estas industrias y pesqueras se han encontrado lugares con altas concentraciones de metales pesados, lo cual ha generado inquietudes en la población sobre cómo puede afectar esto el nivel y calidad tanto de vida como de salud, por lo cual, es importante tener conocimientos profundos sobre los niveles de contaminación y saber si se está en presencia de éste por elementos traza y saber si las plantas logran la extracción de éstos metales pesados,

Es por ello que este estudio se torna una gran utilidad y sirve como herramienta de asesoría para dar conocimiento y posterior toma de decisiones a las autoridades pertinentes que quieran solucionar un problema de contaminación ambiental.

1.5 Área de Estudio

Talcahuano es una de las 12 comunas de la provincia de Concepción Región del Bío Bío, de coordenadas $36^{\circ} 43' 00''$ de latitud Sur y $73^{\circ} 07' 00''$ longitud Oeste. Ésta comuna se ubica en el extremo suroeste de la bahía de Talcahuano al norte de la desembocadura del río Bío Bío . Posee una superficie total de 92.3 km^2 y una población de 250. 064 hab. (Población hasta el 2014)

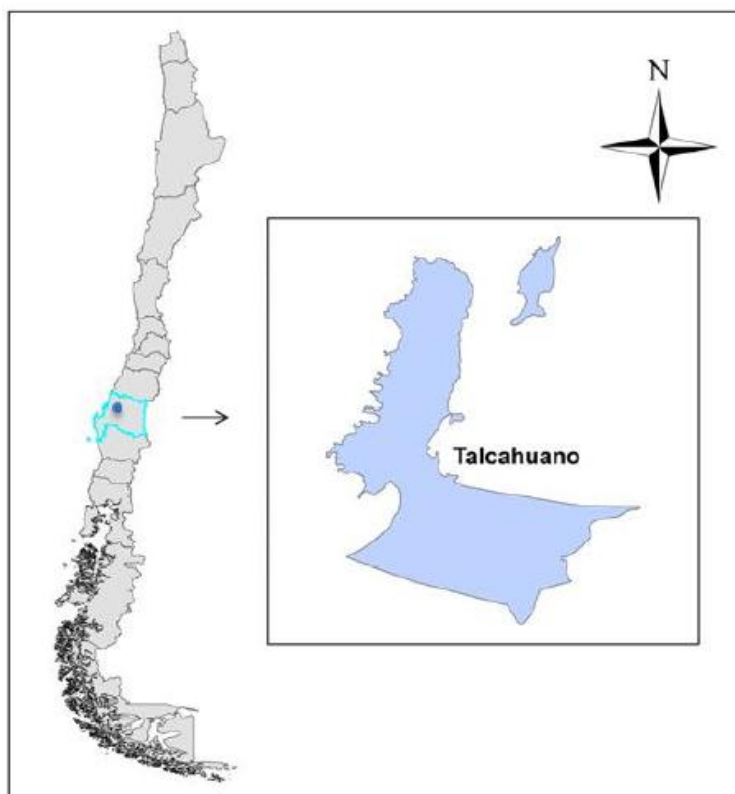


Figura 1. Ubicación de la Comuna de Talcahuano

1.6 Geología

En la provincia de Concepción Metropolitana, donde se ubica la comuna de Talcahuano, la geología en general consiste en rocas metamórficas, ígneas intrusivos, sedimentarias clásticas y depósitos fluviales inconsolidados. Las rocas más antiguas son las metamórficas e ígneas intrusivas que se encuentran agrupadas dentro de una unidad llamada "Basamento Cristalino", teniendo una edad del Carbonífero Superior. Sobreyacente el basamento en

forma discordante, son rocas sedimentarias clásticas de la Formación Quiriquina (Superior Cretáceo) y la Formación Curanilahue (Eoceno). Sobre las formaciones Quiriquina y Curanilahue de forma discordante son las unidades de conglomerados y areniscas de la Formación Andalién (Plio-Pleistoceno). La mayor parte superficial donde se ubica Concepción y Talcahuano está localizada en el fondo del Valle Mochita, que forma una llanura geomorfológica intensa en la región. Esta llanura está formada principalmente por material arenoso (hasta 150m de espesor en algunos sitios), proporcionado por los ríos Bio Bio y Andalién y demuestra la actividad intensa de los sistemas fluviales durante Pleistocene Superior al Reciente. Durante este período, los ríos formaron un sistema deltaico extenso, depositando grandes cantidades de sedimentos. La intensa ocupación humana en gran parte del espacio físico que abarca la zona, ha traído como consecuencia, la transformación total del paisaje natural. La llanura del valle mochita ha sido el foco principal de la ocupación humana y desarrollo urbano. (Álvarez, 2015)

1.7 Climatología

La comuna de Talcahuano tiene un clima marítimo de costa occidental con estación seca de 4 meses en verano y con 7 a 8 meses de humedad en invierno.

El promedio pluviómetro es de aproximadamente 1250mm y su temperatura promedio es de 12°C a 13°C, teniendo también una humedad atmosférica relativa muy elevada.

El mes más cálido en esta comuna es enero con una temperatura máxima promedio de 22,1°C y el mes más fresco es julio con una temperatura baja promedio de 5,9°C. La temperatura máxima registrada en verano (Enero) es de 33,2°C y la temperatura más baja registrada (Agosto) es de -6,0°C.

En los meses de Mayo a Octubre son cuando la comuna recibe el 83% de su precipitación anual total.

Los vientos predominantes de la comuna de Talcahuano son provenientes del suroeste y cuando el viento cambia su dirección a viento norte, indica la aproximación de un sistema frontal con bajas presiones.

1.8 Demografía

Según el censo del 2012, arrojó que el país cuenta con un total de 16.572.475 habitantes, ubicando a la Región del Bío Bío en la segunda zona con mayor concentración de población, teniendo una variación del 5,7% en comparación con el censo 2002, cifras que son consistentes con una población que ha venido creciendo a tasas decrecientes de acuerdo a censos anteriores y compatibles con la baja tasa de natalidad presentada por la región las últimas décadas. La comuna de Talcahuano arrojó que tiene un total de 150.881 habitantes, de los cuales 99,6% (150.278) corresponden al área urbana y el 0,4% (603.524) a la población rural. (Instituto Nacional de Estadística).

1.9 Muestras

1.9.1 Definición de Metales Pesados

Un metal pesado son un grupo de elementos químicos que presentan una densidad relativamente alta y cierta toxicidad para el ser humano. Se considera como tal, aquel elemento que tiene una densidad igual o superior a 5gr cm^{-3} cuando está en forma elemental o cuando su número atómico es superior a 20. (Miliarium, 2004)

En este proyecto se estudiará los siguientes metales pesados: Zn, Cu, Co, Cr, Ni, Pb.

1.9.2 Zona de toma de muestras

Las muestras de suelo a analizar, fueron extraídas de una zona de la comuna de Talcahuano con mayor concentración de metales pesados, la cual está ubicada cerca de poblaciones, colegios y parques. Sus coordenadas son $36^{\circ} 44' 46.52''$ S y $73^{\circ} 6' 13.96''$ O, siendo las plantas, *Lolium Perenne* y *Salicornia* sembradas sobre éste suelo y distribuidas en maceteros, como se ve en el punto 1.9.3.

El criterio para escoger el sitio de muestreo fue el que tiene mayores concentraciones adecuadamente identificado mediante los análisis realizados por el Dr Pedro Tume Zapata en el proyecto "*Concentration and Distribution of Heavy Metals in Soils of Talcahuano (Fondecyt 1130366)*"



Figura 2. Punto de Extracción del suelo de la comuna de Talcahuano.



Figura 3. Detalle del punto de extracción de suelo analizar en la comuna de Talcahuano.

1.9.3 Toma de muestras.

Como se explicó en el punto 1.9.2 se obtuvieron muestras de suelo en un punto de la comuna de Talcahuano de una superficie aproximada de 60 m², la cual se extrajo suelo en estratos de Top Soil (0 a 10cm) y Sub Soil (10 a 20cm), distribuidos en un principio en 24 maceteros de los cuales 12 maceteros eran Top Soil y 12 maceteros eran Sub Soil, pero con el pasar del tiempo, 3 de éstos 24 maceteros, no floreció su planta, por lo cual no fue motivo de análisis y se sacó de la muestra representativa para una fitoextracción, quedando

finalmente una muestra total de 21 maceteros distribuidos en 11 maceteros Top Soil (0 - 10cm) y 10 maceteros Sub Soil (10 a 20 cm).

La forma de distribución de los 21 maceteros, fue la siguiente:

Maceta 1	Top Soil (0 a 10 cm)	Maceta 12	Sub Soil (10 a 20 cm)
Maceta 2		Maceta 13	
Maceta 3		Maceta 14	
Maceta 4		Maceta 15	
Maceta 5		Maceta 16	
Maceta 6		Maceta 17	
Maceta 7		Maceta 18	
Maceta 8		Maceta 19	
Maceta 9		Maceta 20	
Maceta 10		Maceta 21	
Maceta 11			

Tabla 1. Distribución de Top Soil y Sub Soil en los 21 maceteros.

Los cuales en estos se sembraron dos tipos de plantas: Lolium Perenne y Salicornia, distribuidas de la siguiente manera:

Maceta 1: Lolium Perenne	Top Soil (0 a 10 cm)	Maceta 12: Lolium Perenne	Sub Soil (10 a 20 cm)
Maceta 2: Lolium Perenne		Maceta 13: Lolium Perenne	
Maceta 3: Lolium Perenne		Maceta 14: Lolium Perenne	
Maceta 4: Salicornia		Maceta 15: Salicornia	
Maceta 5: Salicornia		Maceta 16: Salicornia	
Maceta 6: Lolium Perenne		Maceta 17: Lolium Perenne	
Maceta 7: Lolium Perenne		Maceta 18: Lolium Perenne	
Maceta 8: Lolium Perenne		Maceta 19: Salicornia	
Maceta 9: Salicornia		Maceta 20: Salicornia	
Maceta 10: Salicornia		Maceta 21: Salicornia	
Maceta 11: Salicornia			

Tabla 2. Distribución de Lolium Perenne y Salicornia en los maceteros.

Como se puede ver en la tabla 2, la distribución fue de 11 maceteros de Top Soil, distribuidos en 6 maceteros con Lolium Perenne y 5 maceteros con Salicornia y el otro

grupo de 10 maceteros de Sub Soil, distribuidos en 5 maceteros con Lolium Perenne y 5 maceteros con Salicornia.

La codificación de los maceteros de la tabla 2, fue la siguiente:

CM1: Lolium Perenne	Top Soil (0 a 10 cm)	CM4: Lolium Perenne	Sub Soil (10 a 20 cm)
CM2: Lolium Perenne		CM5: Lolium Perenne	
CM3: Lolium Perenne		CM6: Lolium Perenne	
CM7: Salicornia		CM10: Salicornia	
CM8: Salicornia		CM12: Salicornia	
PM1: Lolium Perenne		PM7: Lolium Perenne	
PM2: Lolium Perenne		PM8: Lolium Perenne	
PM3: Lolium Perenne		PM10: Salicornia	
PM4: Salicornia		PM11: Salicornia	
PM5: Salicornia		PM12: Salicornia	
PM6: Salicornia			

Tabla 3. Codificación de los Maceteros de Salicornia y Lolium Perenne, tanto Top soil como Sub Soil.

1.9.4 Almacenamiento

Luego de colocar las muestras de suelo en forma homogénea en los maceteros, se saturó con agua y se dejó reposar por 24 horas para así tener una humedad óptima. Luego de este proceso, se realizó la germinación de Lolium perenne y salicornia, dejando posteriormente los 21 maceteros en el laboratorio de Hidráulica de la Universidad Católica de la Santísima Concepción, donde la humedad es media y cerca de una ventana con luz de mañana.

Cuando ya florecieron las plantas se sacaron del maceteros y se separaron del suelo, siendo éste tamizado en un tamiz de acero inoxidable de 2 mm y posteriormente almacenados en bolsas de plástico, las cuales se les hicieron algunos análisis como: hidrómetro (porcentaje de arena, limo y arcilla), Carbono Orgánico, pH, entre otros.

La salida del agua de riego, fue solo por un orificio al final de la maceta y fue almacenada en botellas de vidrio, lejos de la luz, para no alterar los posteriores resultados de sus análisis.

CAPITULO 2: MARCO TEORICO

2.1 Estadística Descriptiva

La estadística descriptiva es un conjunto de procedimientos que tienen por objetivo presentar grupos de datos por medio de tablas, gráficos y/o medidas de resumen. De acuerdo a lo anterior, la estadística descriptiva es la primera etapa a desarrollar en un análisis de información.

2.1.1 Medidas de Tendencia Central

Las medidas de tendencia central son medidas estadísticas que pretenden resumir en un solo valor a un conjunto de valores. Representan un centro en torno al cual se encuentra ubicado el conjunto de datos, donde las más utilizadas son: Media, Moda y Mediana (Álvarez, 2015;Rubio, 2015).

Media: también llamada promedio de un conjunto finito de números es el valor característico de una serie de datos cuantitativos, se obtiene a partir de la suma de todos sus valores dividida entre el número de sumandos.

Moda: es el valor con una mayor frecuencia en una distribución de datos.

Mediana: representa el valor de la variable de posición central en un conjunto de datos ordenados.

2.1.2 Medidas de dispersión

Muestran la variabilidad de una distribución, indicando por medio de un número, si las distintas puntuaciones de una variables están muy lejos de la media o mediana. Si el valor es mayor, mayor será la variabilidad, y si el valor es menor , más homogénea será a la

media o mediana, de esta manera se sabe si todos los casos son parecidos o varían entre ellos. La medida de dispersión a analizar son (Munita, 2012):

Varianza (S^2): Medida de dispersión definida como la esperanza del cuadrado de la desviación de dicha variable respecto a su media.

Coefficiente de Variación (CV): Compara la dispersión entre dos poblaciones distintas e incluso, comparar la variación producto de dos variables diferentes (que pueden provenir de la misma población).

- Si $CV < 50\%$, indica que la media es representativa para los datos.
- Si $CV > 100\%$, significa que la media no aporta al conjunto de datos.
- Si $CV < 35\%$, indica que los datos son homogéneos.
- Si $35\% < CV < 70\%$, indica que los datos son medianamente heterogéneos.
- Si $CV > 70\%$, indica que los datos son heterogéneos.

Cuartiles y Percentiles: Los cuartiles son los tres valores que dividen al conjunto de datos ordenados en cuatro partes porcentualmente iguales. Y los Percentiles son 99 valores que dividen en cien partes iguales el conjunto de datos ordenados.

Histograma: Un histograma es un resumen gráfico de la variación de un conjunto de datos. La naturaleza gráfica del histograma nos permite ver pautas que son difíciles de observar en una simple tabla numérica.

2.1.3 Box Plot

Gráfico representativo de las distribuciones de un conjunto de datos , presenta información sobre la tendencia central, dispersión y simetría de estos, además de identificar los valores atípicos (León, 2009). En su construcción se usan medidas descriptivas de las cuales tenemos (Bakiera et al, 2010):

Mediana (Q_2): Representa el valor de la variable de posición central en un conjunto de datos ordenados en forma creciente o decreciente. Coincide con el cuartil dos.

Tercer Cuartil (Q3): Por debajo de este valor, se encuentran como máximo el 75% de los datos.

Primer Cuartil (Q1): Por debajo de este valor se encuentra como máximo el 25% de los datos.

Límite Superior: Es el extremo superior del bigote y los valores que se encuentran encima de este valor, se consideran atípicos.

Límite Inferior: Es el extremo inferior del gráfico y los valores que se encuentran por debajo de este valor, se consideran atípicos.

Valores Atípicos (*): Son los datos que están fuera del cuerpo principal de datos. Pueden representar efectos de causas extrañas o errores de medición y/o registro.

2.1.4 Otros Parámetros Estadísticos

Los parámetros que se utilizarán para este estudio son (Munita, 2012):

Rango: Corresponde a la longitud que existe entre los valores máximo y mínimo de los datos en estudio.

Asimetría: También se denomina sesgo, cuyo coeficiente mide la asimetría de una distribución y corresponde al tercer momento en torno a la media, así:

$C_s = 0 \rightarrow$ Distribución simétrica.

$C_s > 0 \rightarrow$ Sesgo (+), la función de densidad muestra una cola larga hacia la derecha.

$C_s < 0 \rightarrow$ Sesgo (-), la función de densidad muestra una cola larga hacia la Izquierda.

Curtosis: Mide el grado de apuntamiento de una distribución de frecuencias en relación a una distribución simétrica, así:

$C_s = 0 \rightarrow$ Distribución mesocúrtica (Tiene distribución normal).

$C_s > 0 \rightarrow$ Distribución es leptocúrtica (Tiene pico alto).

$C_s < 0 \rightarrow$ Distribución es platicúrtica (Está aplastada).

2.2 Test de Normalidad

Para evaluar la normalidad se ocupará el test de Shapiro Wilk, ya que sirve para muestras menores a 30 datos (Benavente, 2015).

En este test se plantea una hipótesis nula (H_0) la que define que la muestra aleatoria tiene una distribución normal y una hipótesis alternativa (H_1) la cual define que la muestra aleatoria no tiene una distribución normal (Frías, 2015).

Se emplea un nivel de significancia $\alpha=0,05$ (α -level) , el cual se considera como un error aceptable. (Nivel de confianza del 95%).

El criterio para ver si se rechaza o no la hipótesis nula es la comparación entre el p-value y el α -level, donde el p- value es la probabilidad que se podría obtener a partir de los datos si H_0 es verdadera, del cual tenemos la siguiente prueba de hipótesis (Valencia, 2010):

$p\text{-value} \leq \alpha\text{-level}$ se rechaza la Hipótesis nula.

$p\text{-value} > \alpha\text{-level}$ no se rechaza la Hipótesis nula.

La hipótesis nula está distribuida normalmente, si el p-valor es menor a alfa (nivel de significancia) entonces la hipótesis nula es rechazada (se concluye que los datos no vienen de una distribución normal). Si el p-valor es mayor a alfa, no se rechaza la hipótesis y se concluye que los datos siguen una distribución normal (Frías, 2015).

2.3 Correlación de Spearman

La correlación estadística determina la relación entre dos variables, es decir, si los cambios en una de las variables influyen en los cambios de la otra. En caso de que suceda, diremos que las variables están correlacionadas o que hay correlación entre ellas (Ocampo, 2016).

Si el coeficiente de correlación de Spearman toma valores cercanos a -1 la correlación es fuerte e inversa. Si toma valores cercano a 1, la correlación es fuerte y directa y si toma valores cercano a 0, la correlación es débil (Martínez et al, 2009).

2.4 Relación de concentración Biodisponible y Pseudo-Total del suelo.

La visualización permite conocer la relación y establecer las primeras conclusiones, sin embargo, suele ser insuficiente. Se cuenta con un recurso estadístico que permite cuantificar la relación, es decir, expresar el grado de relación entre dos variables a través de un número concreto. Al aplicar el procedimiento y obtener el número, se puede concluir que existe una relación de cuantía determinada (Manzano, 2014).

El cálculo de la relación, se realizará entre las concentraciones pseudo-total y biodisponible del suelo, la cual viene dada por:

$$Relación = \frac{Concentración_{Biodisponible}}{Concentración_{Pseudo\ Total}}$$

Para la clasificación de la relación se utilizará la siguiente tabla propuesta por Jacob Cohen en el año 1988:

Relación	Clasificación
0 a 0,1	No hay relación
0,1 a 0,3	Relación Pequeña
0,3 a 0,5	Relación Media
≥0,5	Relación Alta

Tabla 4. Clasificación de la relación entre dos variables categóricas. (Manzano, 2014)

2.5 Concentración Pseudo-Total y Biodisponible del suelo.

El análisis de metales pesados es una actividad importante cuando se quiere valorar el potencial riesgo ambiental y de salud. Sin embargo, es ampliamente aceptado que la determinación del contenido Pseudo-Total no da una valoración apropiada del impacto

ambiental causado. Por lo tanto, es necesario realizar estudios de especiación para obtener información más detallada sobre su biodisponibilidad (González et al, 2009).

Para este proyecto, se tienen los dos tipos de concentraciones de metales pesados, las Pseudo-totales, calculadas mediante la digestión de agua regia y las biodisponibles, calculadas por el método DTPA (ácido dietilenotriaminopentaacético), las cuales se analizarán por separado en cada ítem.

2.6 Índices de Contaminación

2.6.1 Índice de Geo-acumulación

El índice de Geo - acumulación, diseñado por müller, mide el grado de contaminación de sustancias tanto orgánicas como inorgánicas del suelo (Del águila et al, 2005).

Este índice se calcula de la siguiente manera:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1,5B_n} \right)$$

Donde C_n es la concentración media del metal en estudio y B_n es el valor de referencia o valor de fondo en el suelo, para este valor ocuparemos los especificados en la tabla 23.

Clase de L_{geo}	Valor de I_{geo}	Grado de contaminación
0	$L_{geo} < 0$	No contaminado
1	$0 \leq L_{geo} < 1$	No contaminado a moderadamente contaminado
2	$1 \leq L_{geo} < 2$	Moderadamente contaminado
3	$2 \leq L_{geo} < 3$	De moderado a severamente contaminado
4	$3 \leq L_{geo} < 4$	Severamente contaminado
5	$4 \leq L_{geo} < 5$	Severa a extremadamente contaminado
6	$5 \leq L_{geo}$	Extremadamente contaminado

Tabla

Tabla 5. Clasificación de dos parámetros: clase de índice de geo - acumulación y grado de contaminación.

2.6.2 Factor de Enriquecimiento (EF, Enrichment Factor)

El factor de enriquecimiento (EF), se utilizó para evaluar la contribución antropogénica al contenido de metales pesados en la colección de suelo compuesto. El cálculo consiste en la suposición de las relaciones similares encontradas entre elementos colectados en el ambiente, específicamente del suelo y un elemento considerado como material de referencia cuyo origen es una posible fuente natural (Del águila et al, 2005).

El elemento abundante en el material de referencia es considerado como indicador (Machado et al, 2008). En este estudio, se utiliza el Al como elemento de referencia. (Ocampo, 2016)

Este factor se calcula de la siguiente manera:

$$EF = \frac{\left(\frac{C_n}{C_{ref}}\right)_{muestra}}{\left(\frac{B_n}{B_{ref}}\right)_{valores\ de\ fondo}}$$

Donde C_n es el contenido de suelo examinado, C_{ref} es el contenido del elemento de referencia, B_n es el contenido del elemento examinado en el entorno de referencia y B_{ref} es el contenido del elemento de referencia en el entorno de referencia (Ocampo, 2016).

Sutherland 2000, nombró 5 categorías de contaminación en base a este factor, las cuales son:

EF<2	La diferencia de enriquecimiento es mínimo
EF= 2-5	Enriquecimiento moderado
EF=5-20	Enriquecimiento significativo
EF=20-40	Enriquecimiento muy alto
EF>40	Enriquecimiento extremadamente alto

Tabla 6. Categorías de contaminación en base al factor de enriquecimiento.

2.6.3 Factores de Contaminación (CF, Contamination Factors)

Para calcular el índice integrado de contaminación, se necesitan los factores de contaminación (CF), el cual se calcula de la siguiente manera;

$$CF = \frac{\text{Observed metal concentration}}{\text{Background concentration of the same metal}}$$

Índice integrado de contaminación

El índice integrado de contaminación (IPI), es la media geométrica del factor de concentración (CF) que estandariza la concentración observada de metales con su concentración de fondo (Ocampo, 2016). Este índice es introducido por Tomlinson et al, 1980, en el cual consideró conjuntamente la totalidad de los metales analizados en el punto de muestreo.

$$IPI = \sqrt[n]{CF_1 * CF_2 * CF_3 \dots * CF_n}$$

Donde CF es el factor de contaminación y n es el número de parámetros.

Tomlinson et al, propone los siguientes limites del índice integrado de contaminación (Ocampo, 2016):

Índice integrado de contaminación (IPI)	Nivel de polución
0	Nivel de suelo limpio
1	Leve nivel de contaminación
> 1	Nivel de deterioro progresivo

Tabla 7. Clasificación según índice integrado de contaminación.

2.7 Fitorremediación

La fitorremediación está fundamentada en la capacidad de algunas plantas para tolerar, absorber, acumular, metabolizar, volatilizar o estabilizar y degradar compuestos contaminantes, tanto orgánicos como inorgánicos . Esta tecnología se está aplicando en

diversos países, para recuperar los suelos contaminados, ya que esta fitotecnología tiene muchas ventajas con respecto a los métodos fisicoquímicos (Garbisu et al, 2008).

Éste método presenta diversas ventajas, por ejemplo, su bajo costo económico (De 7 a 10 veces menor respecto de los métodos tradicionales) (Mentaberry, 2011), su aproximación respetuosa con los procesos ecológicos del ecosistema edáfico y sobre todo el hecho ser una tecnología social, estética y ambientalmente aceptada (Delgadillo et al, 2011; Mentaberry, 2011).

Un sistema eficiente de fitorremediación requiere especies de plantas que satisfagan 2 prerequisites: Tolerancia a metales y capacidad de acumulación (Absorción, detoxificación y secuestro). Además la planta ideal debería poseer la habilidad de sobrevivir a más de un metal en el medio de crecimiento. (Medina y Montano, 2014).

El término fitorremediación engloba una serie de fitotecnologías diferentes, en lo que concierne, sobre todo, a los mecanismos fisiológicos implicados en la recuperación de los suelos contaminados, dentro de las cuales se encuentran (Cubillos, 2011; Delgadillo et al, 2011):

Fitoextracción: También conocida como fitoacumulación y la cual consiste en la absorción de contaminante específicos (metales pesados) por las raíces de las plantas y su acumulación en tallos y hojas. Esta técnica es la que se utilizará para este proyecto de título.

Rizofiltración: Es una técnica muy parecida a la fitoextracción, aún en proceso de investigación, para descontaminar agua superficiales y subterráneas con presencia de metales. Aparte se utiliza para eliminar residuos industriales, escorrentía de tierras agrícolas, drenaje de minas de ácidos y contaminantes radioactivos.

Fitoestabilización. Permite inmovilizar contaminantes en el suelo a través de su absorción y acumulación en las raíces. Este proceso reduce la movilidad de los contaminantes y evita su migración a las aguas subterráneas. Esta técnica también se empleará en este proyecto de título y será explicada en forma detallada, en el punto 2.8.

Fitovolatilización: Es la absorción de los árboles y plantas de agua, junto con contaminantes orgánicos, los cuales pueden llegar a las hojas y evaporarse o volatizarse a la atmósfera.

Fitodegradación: Mediante el uso de plantas, se degradan contaminantes orgánicos. Éstas plantas producen enzimas que catalizan la degradación de los compuestos orgánicos y los productos obtenidos van a ser utilizables por el metabolismo de la planta para el crecimiento y desarrollo de sus tejidos.

Fitoestimulación: En esta técnica se usan los exudados radiculares para promover el desarrollo de microorganismos degradativos como las bacterias y hongos.

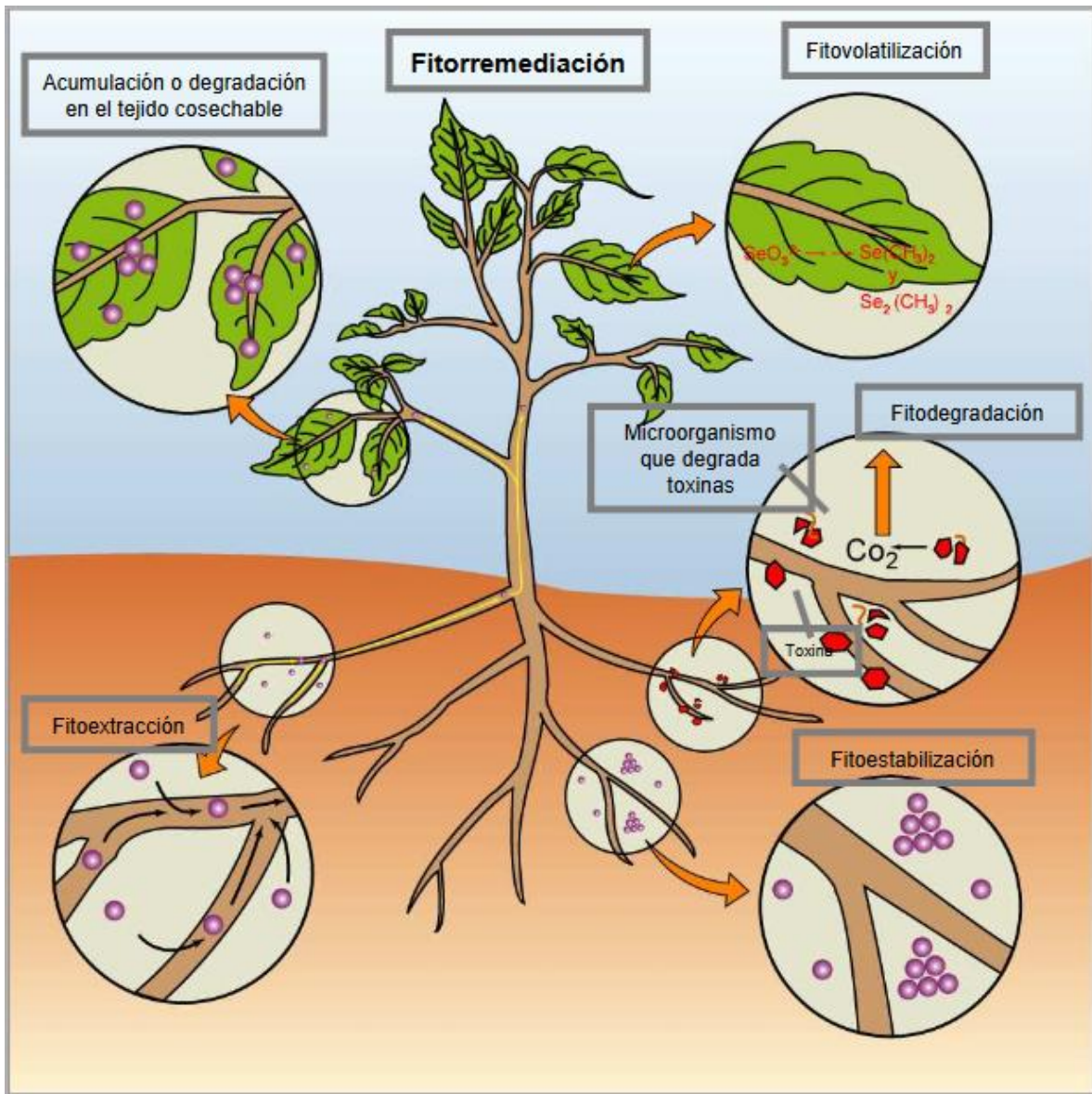


Figura 4. Esquema de Fitotecnologías que logran la recuperación del suelo contaminado (Cubillos, 2011).

Las plantas poseen tres estrategias básicas, la exclusión, la indicación y la acumulación para crecer en suelos contaminados. La exclusión previene la entrada de metales o mantienen baja y constante la concentración de éstos en un amplio rango de concentraciones en el suelo, principalmente restringiendo la acumulación de los metales en la raíces. Por los tejidos aéreos generalmente se refleja el nivel del metal en el suelo. Finalmente la acumulación se basa en distribuir, traslocar o enviar los metales a los diferentes órganos vegetativos o sus partes aéreas, en niveles que exceden varias veces el nivel presente en el suelo (Medina y Montano, 2014). La plantas se clasifican como

Hiperacumuladoras, si éstas son capaces de acumular y traslocar altos niveles de contaminantes en raíces, tallos y hojas. Para ello se calcularán dos parámetros, el Factor de Bioacumulación y Traslocación

Para que las plantas sean consideradas como hiperacumuladoras, debe cumplir con estas 3 características:

1.- Factor de Bioconcentración (BCF, Bioconcentration Factor): Este factor se utiliza para medir la capacidad de captación de un metal por una planta (raíz y parte aérea) con relación a su concentración en el suelo. Para las plantas el factor de bioacumulación, se utiliza como una medida de la eficiencia de acumulación de metales en biomasa, donde valores mayores a 1 indican que las especies son potencialmente hiperacumuladoras y aquellas especies exclusoras poseen un BCF menores a 1, cuanto más menor sea este valor, mayor es su capacidad de exclusión (Medina y Montano, 2014; Mentaberry, 2011). Existen dos factores de bioacumulación, los cuales son:

Factor de Bioacumulación en la raíz de la planta (RAF, Root accumulation factor): Se calcula como la relación entre la concentración de metales en la raíz de la planta respecto a la concentración de metales en el suelo (Medina y Montano, 2014).

$$RAF = \frac{\text{Concentración de metales en la raíz}}{\text{Concentración de metales del Suelo}}$$

Si $RAF > 1$, la planta es potencialmente hiperacumuladora

Si $RAF < 1$, la planta es exclusora.

Factor de Bioconcentración en la parte aérea de la planta (SAF, Shoot accumulation factor): Es la proporción del elemento contenido en la parte aérea de la planta con respecto al suelo (Medina y Montano, 2014).

$$SAF = \frac{\text{Concentración de metales en la parte aérea}}{\text{Concentración de metales del Suelo}}$$

Si SAF > 1, la planta es potencialmente hiperacumuladora

Si SAF < 1, la planta es exclusora.

2.- Factor de Traslocación (FT, Translocation Factor): En la relación entre la concentración en el órgano de interés (tallo, hojas, flores, semillas o frutos) y la concentración en la raíz. Factores de traslocación mayores a 1 sugieren gran capacidad para transportar metales desde las raíces hasta los vástagos, explicada en su mayor parte, por eficientes sistemas de transporte de metales y, probablemente, por secuestro de metales en las vacuolas de las hojas y en el apoplasto. Las plantas hiperacumuladoras se caracterizan por una relación concentración de metal parte aérea/Concentración de metal raíz, mayor a 1. En cambio, las plantas no acumuladoras tienen una más alta concentración de metal en raíces que en las hojas y tallo (Cubillos, 2011; Medina y Montano, 2014).

Un valor del factor de traslocación mayor a 1 indica una eficiente traslocación del metal en brotes, por lo que la planta puede usarse con fines de fitoextracción. Si por el contrario, dicho valor es menor a 1, la traslocación del metal es baja, por lo que éste es retenido principalmente por la raíces y puede usarse para fitoestabilización (Medina y Montano, 2014; Ocampo, 2016).

$$\text{Factor de Traslocación (FT)} = \frac{\text{Concentración de metales en la parte aérea}}{\text{Concentración de metales en la raíz}}$$

Si TF > 1, significa que la planta traslada eficazmente los metales pesados de la raíz a la parte aérea de la planta, por lo que su potencial es la de hiperacumular metales en su parte aérea.

Si TF < 1, significa que la planta no traslada eficazmente los metales pesados de la raíz a la parte aérea de la planta, por lo que su potencial es la de fitoestabilizar metales en sus raíces.

3.- Concentración del metal en la parte aérea de la planta: En el caso de la concentración de los metales pesados, las plantas se consideran como hiperacumuladoras, si en su parte aérea tienen concentraciones superiores a (Medina y Montano, 2014):

100 mg/Kg para Cd

1000 mg/Kg para Al, As, Co, Cu, Cr, Ni, Se, Pb

10000 mg/Kg para Zn y Mn.

2.8 Fitoestabilización

La fitoestabilización se puede utilizar para minimizar la migración de contaminantes en los suelos. Este proceso utiliza la capacidad de las raíces de las plantas para cambiar las condiciones ambientales a través de exudados de las raíces. Las plantas pueden inmovilizar los metales pesados a través de la absorción y acumulación en las raíces, adsorción sobre las raíces, o la precipitación en la rizosfera. Este proceso reduce la movilidad de los metales y la lixiviación a las aguas subterráneas, y también reduce la biodisponibilidad de metales para la entrada en la cadena alimenticia.. Mediante el uso de las especies de plantas tolerantes de metal para la estabilización de contaminantes del suelo, en particular los metales pesados, también podría proporcionar mejores condiciones para la atenuación natural o estabilización de contaminantes en el suelo (Medina y Montano, 2014).

Para el caso de la fitoestabilización, la planta, para aplicar esta técnica en ella, debe cumplir con al menos uno de los requisitos mencionados a continuación:

- **Factor de Bioacumulación en la raíz (RAF)**, tiene que ser < 1
- **Factor de Traslocación (FT)** < 1

Factor de Bioacumulación en la raíz (RAF) y/o Factor de Traslocación (FT) menores a 1.

2.9 Análisis Textural de las muestras

Los triángulos texturales son gráficos que facilitan la interpretación de la granulometría del suelo. El triángulo utilizado en Chile, es el diseñado por el USDA (Departamento de Agricultura de Estados Unidos), el cual aplica según el tamaño de las partículas, las cuales son (Álvarez, 2015):

- Arena, todas las partículas cuyo tamaño varía entre 0,05-2 mm.

- Limo, todas las partículas cuyo tamaño varía de 0,002 a 0,05 mm.
- Arcilla, todas las partículas de menos de 0,002 mm.

Habitualmente la textura del suelo se puede representar en un diagrama ternario, en el cual se emplean reglas trigonométricas para representar en el plano coordenadas tridimensionales que se refieren a distintas combinaciones de clases granulométricas (clases texturales) cuya suma es constante (100). (Munita, 2012)

La textura se puede dividir en grupos más amplios como suelos de texturas livianas, texturas medias y texturas pesadas. las cuales en forma detallada son:

Texturas Livianas: Arenosa, areno franco, franco arenosa, franco arenosa fina.

Texturas Medias: Franco arenosa muy fina, franco, franco limoso, franco arcillo limoso.

Texturas Pesadas: Franco arcillosos, arcilloso arenoso, arcilloso limoso, arcilloso.

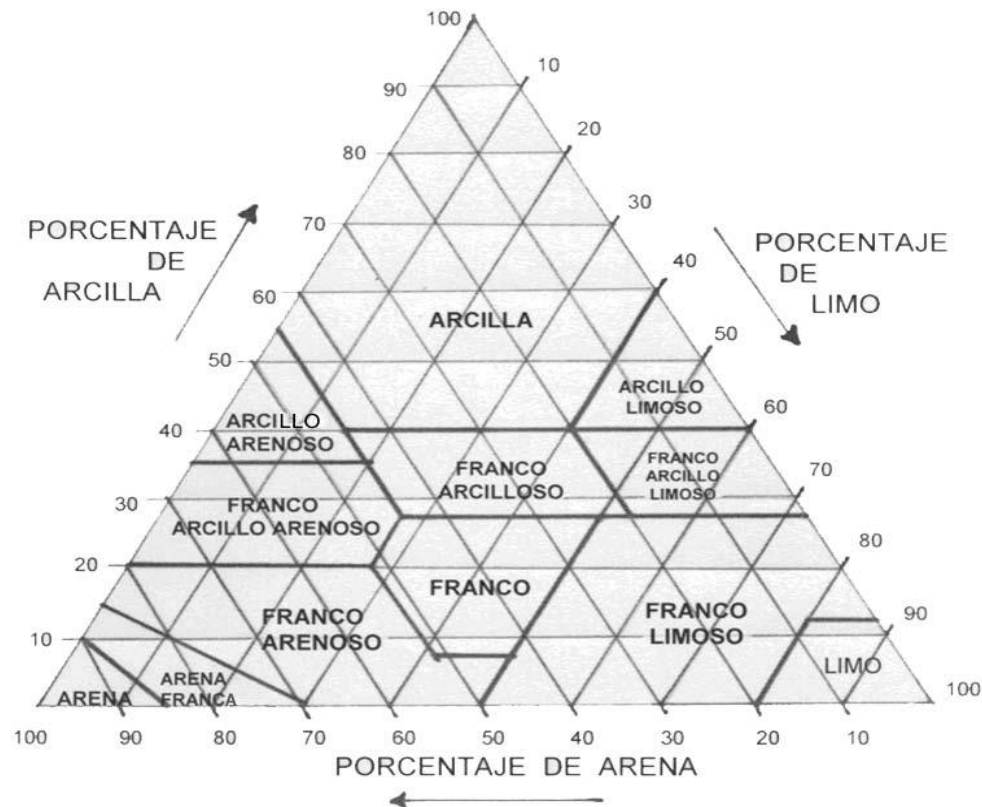


Figura 5. Triángulo textural del suelo, según USDA.

Textura - Análisis de Campo

Es la proporción de las distintas partículas (arena, limo y arcilla) bajo la dimensión de 2 mm. Se puede medir por medio de métodos de laboratorio y de campo. En esta práctica se verá el método de campo. Consiste en tomar una muestra de suelo, humedecerla hasta capacidad de campo y restregarla entre los dedos pulgar, índice y mayor y sentir su suavidad, además que otras características se separan la muestra entre sí (Munita, 2012).

En el suelo de Talcahuano se encontró la siguiente distribución:

Areno Francosa: Es un suelo que tiene bastante arena pero también cuenta con suficiente cantidad de arcilla y limo.

Franco Arenoso: La proporción de arcilla y limo aumenta lo que le da mucha más cohesión que la anterior.

Arenosa: La arena es suelta de granos simple.

CAPITULO 3: METODOLOGÍA

3.1 Obtención de plantas.

Las semillas de la planta *Lolium perenne* o más bien conocida como césped, fue obtenida de manera comercial. La planta *Salicornia* es originaria del norte de Chile, por lo cual su semilla es otorgada por un docente botánico de la Universidad de Antofagasta.

3.2 Descripción de las plantas.

3.2.1 *Lolium Perenne*

Lolium perenne, proveniente de la familia de Poaceae, la cual también es llamada ballica, ballica inglesa, ballico, césped inglés, raigrás inglés, raigrás perenne o vallico es una gramínea perenne que es muy importante para la creación de céspedes y en la producción de forrajes en lugares de clima templado y subtropical. El raygrass perenne o Raigrás es la especie cespitosa más difundida por el mundo, encontrándose en casi todas las mezclas (Menéndez y Oliveros, 2016).

Los tallos de hasta 80 cm son hojas de color verde oscuro, tienen un limbo de hasta 18 cm de longitud, estriadas y con nervio central marcado. La inflorescencia está compuesta por espigas sésiles alternadas a izquierda y derecha de un eje central. Las espiguillas tiene entre 3 a 10 flores cuya palea es tan larga como la lema. La reproducción de *Lolium perenne* puede ser por semilla o por macollos.

Originaria de Europa y norte de África siendo ésta la más utilizada en la península ibérica, siendo introducida en sudamérica, australia y nueva zelanda. Es un hemcriptófito que habita céspedes, jardines y pastos húmedos, dándose también en zonas templadas.

Lolium perenne se caracteriza por su rápida germinación, ya que de 5 a 7 días después de sembrar ya está la hierba fuera y se ve todo verde. El Raigrás perdura de 3 a 4 años a pesar de que se requiere siegas que debilitan las plantas, por lo que es recomendable mezclar con otras especies perenne de germinación y desarrollo más lento (Conabio, 2012).

Se adapta bien a climas fríos a veranos de días cálidos y noches frescas, pero no brinda un césped de alta calidad y de alta resistencia al pisoteo. No se debe cortar en forma frecuente, debido a que no tolera eso y se puede quemar.

Como ya se menciona anteriormente, tolera el pisoteo y también su lento rebrote tras la siega y su buena tolerancia a la salinidad la hacen muy adecuada para usos deportivos o en jardines, por ende se debe regar de manera constante.

Tiene una muy alta resistencia a los hongos, especialmente al hilo rojo (Red thread), herrumbre (Crown rust) y mancha marrón (Brown blight).



Figura 6. Lolium Perenne

3.2.2 Salicornia

Salicornia o también conocido como espárrago de mar, es un género botánico de plantas suculentas y halófitas, o sea, que son tolerantes a sales. siendo éstas crecientes en salares, playas y manglares. Estas plantas son nativas de Estados Unidos y de Europa.

Salicornia es una especie pequeña, mayoritariamente menores a 3dm de altura herbáceas suculentas con un tallo horizontal con de ramas laterales erectas de hojas pequeñas y

escamosas, aparentando a la planta no tener hojas. Muchas de las especies son verdes, pero su follaje torna a rojo en otoño. Las flores hermafroditas de esta planta son polinizadas por viento, fruto pequeño, succulento y del cual contiene una sola semilla (Falasca, 2013).

Esta especie puede tolerar generalmente inmersión en agua salada, usan la vía de C4 para absorber dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera, siendo ésta la vía más eficiente para la fotosíntesis (Falasca, 2013).

Ésta especie son alimentos para larvas de algunas especies de Lepidoptera por ejemplo Coleophora C. atriplicis, C. Salicorniae, siendo ésta que come exclusivamente Salicornia spp).



Figura 7. Salicornia

3.3 Preparación de los maceteros

Luego de extraído el suelo en la comuna de Talcahuano (explicación en el punto 1.9.2) se colocó la muestra en los 21 maceteros en forma homogénea, saturándolos con agua y dejando reposar durante 24 horas, para así tener una humedad óptima, antes de sembrar las

semillas. Las semillas que se utilizaron en los maceteros son dos: *Lolium perenne* (Césped) y *Salicornia* (Espárrago de mar) ambas explicadas detalladamente en el punto anterior.

Posteriormente se germinaron *Lolium perenne* en 11 maceteros (CM1, CM2, CM3, CM4, CM5, CM6, PM1, PM2, PM3, PM7, PM8) y *Salicornia* en 10 maceteros (CM7, CM8, CM10, CM12, PM4, PM5, PM6, PM10, PM11, PM12) teniendo humedad y luz solar durante toda la mañana.



Figura 8. La imagen de la izquierda corresponde a las muestras saturadas y la imagen de a derecha corresponde a la germinación de ambas especies.

A los 12 días de germinación y de regar diariamente las plantas (con un PH de 6,24 de agua potable de riego), la *salicornia* no creció, por ende se pidió ayuda al profesor de la Universidad de Antofagasta Bernardo Sepúlveda, Botánico, el cual nos propuso acelerar el proceso de germinación mediante dos métodos: una hormona (Ácido Gibberelico) y un aceite al 10%, para así ver por cuál de los dos métodos crece la *salicornia*.

Se tomaron 10 vasos de plumavit y se colocó 100 mg de ácido gibberelico en 250 ml de agua junto a 1gr de semillas de *salicornia* para probar la efectividad de ésta hormona. En otros 10 vasos de plumavit se colocó 0,5 ml de aceite en 500 ml de agua con 1gr de semillas de *salicornia* para probar la efectividad del aceite. Ambos métodos se dejaron reposar durante 24 horas para lograr un hinchamiento de las semillas.



Figura 9. La imagen de la izquierda corresponde a semillas de salicornia y la imagen de la derecha es la distribución en los vasos del ácido gibberelico y el aceite junto a las semillas de salicornia.

Al día siguiente se dividió el macetero en dos partes, en una mitad se colocaron las semillas mezcladas con la hormona y la otra mitad las semillas mezcladas con el aceite y así al pasar los días ver cual parte tuvo mejor resultado a la germinación.

Al pasar los días se vio un crecimiento de la salicornia en ambos métodos, siendo estos efectivos en su totalidad y logrando lo que no se pudo en forma natural.



Figura 10. La imagen de la izquierda se muestra la división de germinación por ambos métodos y la imagen de la derecha muestra el crecimiento de la salicornia después de aplicada la hormona.

3.4 Tratamiento de muestras

Luego del crecimiento de la salicornia y *Lolium perenne*, éstas se retiran de los maceteros y se separa la planta del suelo. Posteriormente el suelo se coloca sobre una plancha de madera y se introduce en un horno a 40°C, secándose en un tiempo de 24 horas.

3.4.1 Suelo

Luego del secado en horno, el suelo se pasa por un tamiz de 2mm para obtener la fracción fina (< 2mm) y se almacena en bolsas de plástico hermética y etiquetadas, para su posterior análisis.

3.4.2 Plantas

En el caso de las plantas, se separó la raíz del tallo y se depositaron dentro de un recipiente para luego ser lavadas con agua destilada y así eliminar las partículas de suelo o residuos adheridas en éstas. Posteriormente, luego de ser aireadas a temperatura ambiente, se llevaron a secar a un liofilizador durante 24 horas, para luego molerlas en un mortero de ágata y guardar esta muestra en tubos falcon.



Figura 11. Tubo Falcon.



Figura 12. Secado en liofilizador de Lolium Perenne (Izquierda) y Salicornia (Derecha).

3.5 Análisis Químico

3.5.1 Suelo

3.5.1.1 Granulometría

Para el análisis granulométrico se utilizó el ensayo de Hidrómetro visto en la NCh 3236-2010 *"Mecánica de suelos - Tamizado y Determinación de la granulometría"*. A partir del punto 7 en adelante *"Procedimiento para el análisis granulométrico por hidrometría"* se determinó los porcentajes de Arena, Limo y Arcilla encontrado en el punto de extracción del suelo de la comuna de Talcahuano.

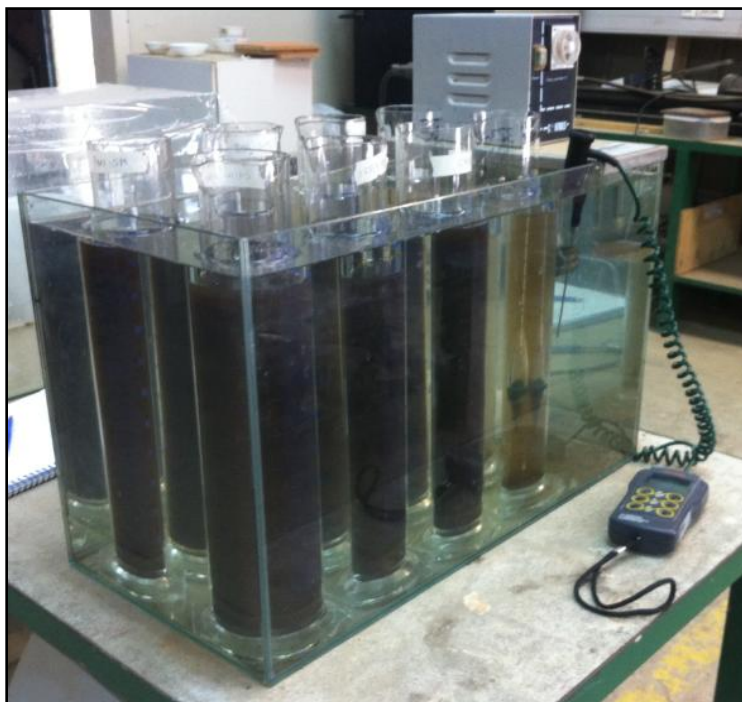


Figura 13. Ensayo de Hidrómetro.

3.5.1.2 Carbono Orgánico

La determinación se basa en una oxidación incompleta de carbono orgánico por una mezcla oxidante de dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$) y ácido sulfúrico (H_2SO_4). La cantidad de agente oxidante consumido en esta, se determina por fotolorimetría midiendo la intensidad del color verde de los iones $Cr + 6$ amarillos del dicromato inicial y comparando con las lecturas de una curva de calibración preparada en la misma forma que los patrones conocidos de solución de sacarosa. (Ocampo, 2016; Hontoria et al, 2004).

3.5.1.2.1 Preparación de suelo y calibración de estándares para la determinación de carbono orgánico

Se prepararon una serie de estándares en matraces Erlenmeyer de 100 ml que contuvieran 0; 0,015; 0,031; 0,077; 0,308; 0,461 mgC/ml a partir de una solución patrón de sacarosa equivalente a 50 mg C/ml. Se agregó con un dispensador automático 5 ml de solución de

dicromato de potasio 1N (K₂Cr₂O₇ 1N), 10 ml de ácido sulfúrico concentrado 96% (H₂SO₄) y 50 ml de agua destilada, en el mismo orden en que se agregó el ácido a los matraces. Luego de 30 minutos, se traspasó la solución de cada estándar a tubos klett y se leyó la longitud de onda de 600 nm en espectrofotómetro UV-Visible, ajustando el cero del instrumento con un blanco preparado con los mismos volúmenes de reactivos y agua usados anteriormente (sin la solución de sacarosa), obteniendo de esta forma la absorbancia de cada muestra. Posteriormente se pesaron 0.5 g ± 0,01 g de cada muestra de suelo seco en un matraz Erlenmeyer de 100 ml y se añadieron las mismas cantidades de dicromato de potasio 1N (K₂Cr₂O₇ 1N), ácido sulfúrico concentrado 96% (H₂SO₄) que en la calibración de estándares. Luego de 30 minutos, se traspasó la solución de cada muestra a tubos klett y se leyó la longitud de onda de 600 nm en espectrofotómetro UV-Visible. Con los resultados de absorbancia y serie de estándares se ajusta la curva de calibración para conocer los porcentajes de carbono orgánico en cada muestra. (Ocampo, 2016).

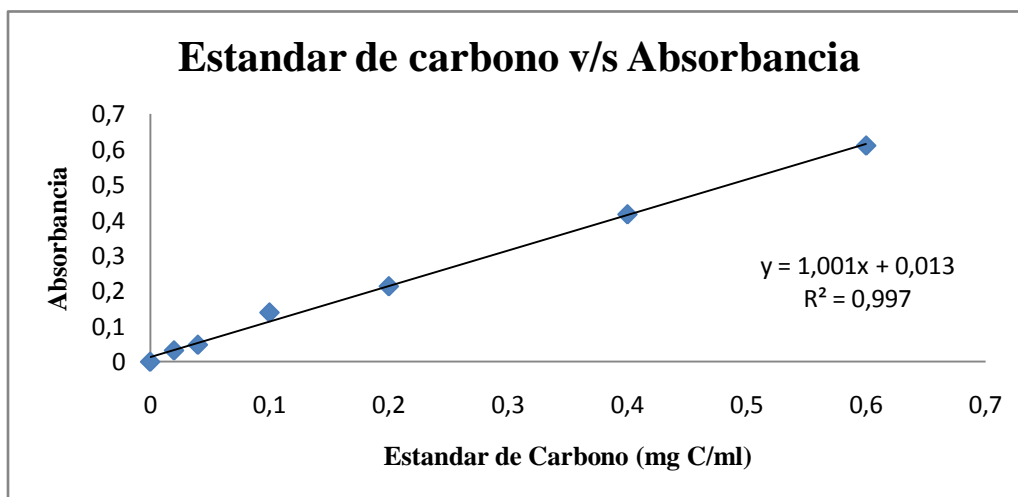


Figura 14. Curva de calibración para la obtención de carbono orgánico.

3.5.1.2.2 Cálculo de Carbono Orgánico

En la curva de calibración de la figura 14 tenemos la ecuación proveniente de la línea de tendencia, de la cual se obtiene el contenido de carbono orgánico (%) según la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Carbono Orgánico (C.O)} = \frac{\text{Absorbancia} - 0,013}{1,001} * \frac{5000}{\text{Peso de la muestra}}$$

donde la absorbancia es de cada muestra

De la siguiente tabla, podemos interpretar los datos calculados de Carbono Orgánico

< 0,9	Muy bajo
1,0 – 1,9	Bajo
2,0 – 2,5	Normal
2,6 – 3,5	Alto
> 3,6	Muy alto

Tabla 8. Interpretación de los porcentajes de Carbono Orgánico para muestras de suelo.

3.5.1.3 Cálculo de pH

El pH es una medida de acidez o alcalinidad de una disolución, indicando la concentración de iones de Hidrógeno presentes en determinadas disoluciones. El índice varía de 0 a 14, siendo 7 neutro. Un pH por debajo de 7 es ácido y por encima de 7 es básico (alcalino).

pH	Clasificación
< 4,5	Extremadamente ácido
4,5 – 5,0	Muy fuertemente ácido
5,1 – 5,5	Fuertemente ácido
5,6 – 6,0	Medianamente ácido
6,1 – 6,5	Ligeramente ácido
6,6 – 7,3	Neutro
7,4 – 7,8	Ligeramente básico
7,9 – 8,4	Medianamente básico
8,5 – 9,0	Básico
9,1 – 10,0	Alcalino
> 10,0	Fuertemente alcalino

Tabla 9. Clasificación del suelo según su pH (USDA, 1999).

Procedimiento para la obtención de pH

Se agrega 1gr de suelo a un vaso precipitado más 25 ml de agua destilada, posteriormente se agita durante media hora. Pasada esta media hora se deja reposar durante 10 minutos. Finalmente se introduce un electrodo (luego de calibrar el pH meter) y se obtiene el pH del suelo.



Figura 15. Agitación de la mezcla de suelo con agua destilada para luego medir el pH.

3.5.2 Plantas

3.5.2.1 Contenido de metales pesados

Para la obtención de los metales pesados, las muestras de suelos fueron sometidas a una digestión correspondiente a una mezcla de ácido nítrico y ácido clorhídrico concentrado en una proporción de una a tres partes en volumen. Este procedimiento fue realizado en el laboratorio de la Facultad de Química de la Universidad Católica de la Santísima Concepción.

Procedimiento para la obtención de metales pesados en las plantas.

La muestra vegetal (raíz y parte aérea) se llevó al liofilizador para secarla y así poder molerla en un mortero de ágata. Posteriormente se pesan 0,3 gramos de esta muestra en una

balanza analítica y colocadas en los tubos digestor previamente codificados. Se colocan 15 ml de HNO₃ al 69% calidad Suprapur y 6 ml de H₂O₂ al 30%, dejándolas reposar durante 2 horas para así controlar la efervescencia producida por la reacción entre los compuestos alcalinos y alcalinotérreos presentes en la muestra con el ácido. Pasado ya este tiempo, se colocan los tubos en el interior del digestor donde fueron sometidos a temperaturas graduales de 60°C por 30 minutos, 80°C por 5 minutos, 110°C por 3 minutos y 130°C por 15 minutos. Posterior a la digestión los tubos se dejan enfriar a temperatura ambiente para luego ser filtrados por un papel filtro Whatman #42 y depositados en tubos falcon. Finalmente el extracto fue aforado a 25 ml con agua milli Q para su posterior análisis. Las plantas fueron analizadas mediante el método TXRF (Fluorescencia de Rayos X por Reflexión Total) en el laboratorio de la Universidad de Concepción.

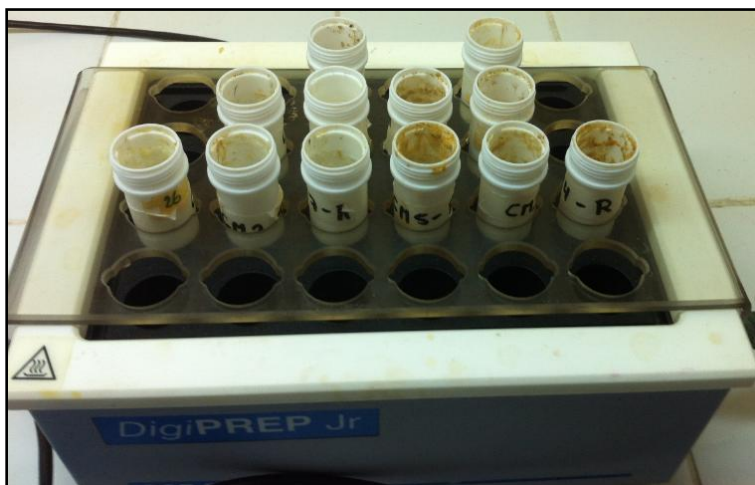


Figura 16. Digestión de las muestras vegetales.

3.6 Concentración Pseudo-Total del suelo.

Las muestras de suelo fueron analizadas mediante el método de digestión de agua regia y leídas en el equipo ICP-MS (Espectrometría de Masas con fuente de Plasma Acoplado) en el laboratorio Acme Analytical Laboratories (Chile).

3.7 Concentración Biodisponible del suelo.

Para la extracción de los micronutrientes Zn, Cr, Cu, Ni y Pb, se utilizó el método, desarrollado por Soltanpour y Schwab (1977), llamado DTPA (ácido

dietilenotriaminopentaacético). Este método tiene por objetivo extraer en forma simultánea los nutrientes de interés. Para el caso de micronutrientes, la cantidad de metal quelado que se acumula en la disolución durante la extracción, es función, tanto de la actividad del ión metálico en el suelo, como de la capacidad de reposición del mismo por parte del suelo (Herrera et al, 2010).

Este método es económicamente barato, reproducible y fácilmente adaptable a las operaciones de rutina. Este método extrae metales de las fracciones más lábiles del suelo y ha sido ampliamente utilizado para determinar la biodisponibilidad de muchos metales (González et al, 2009). Este procedimiento fue realizado en la Universidad de Barcelona.

Procedimiento

Se coloca en un matraz erlenmeyer de 125 ml, 10 gr de suelo secado al aire y tamizado a 2 mm. Se añaden 20 ml de disolución extractante, se tapa el matraz y se agita con un agitador horizontal con brazo de 8 cm, durante 2 horas y a 120 rpm. Posteriormente se filtra la suspensión por gravedad a través de un filtro de papel Whatman n° 42. Si el filtrado es turbio. se ha de volver a filtrar. Una vez obtenido el filtrado, puede llevarse a cabo la medida de la concentración de micronutrientes, mediante uno de éstos métodos: FASS (Espectroscopía de absorción atómica de Llama), GF-ASS (Espectroscopía de absorción atómica electrotérmica con cámara de grafito), ICP-AES (Plasma de acoplamiento inductivo con detector óptico).(May, 2004) (Herrera et al, 2010)

CAPITULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados

Se analizaron 21 muestras de suelo distribuidas en maceteros con profundidades de Top Soil (0 -10 cm) (11 muestras) y Sub Soil (10 - 20 cm) (10 muestras) , de las cuales fueron obtenidas de un sector con altos niveles de contaminación de la comuna de Talcahuano.

Para cada muestra se detalla el porcentaje de arena, limo y arcilla (granulometría), contenido de carbono orgánico (CO), pH y el contenido de metales pesados (Co, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn).

4.2 Análisis Textural del suelo

El lugar presenta un suelo mayoritariamente del tipo "Areno Francosa" (73%) y "Franco Arenosa" (27%) para el suelo Top Soil (0 - 10 cm)

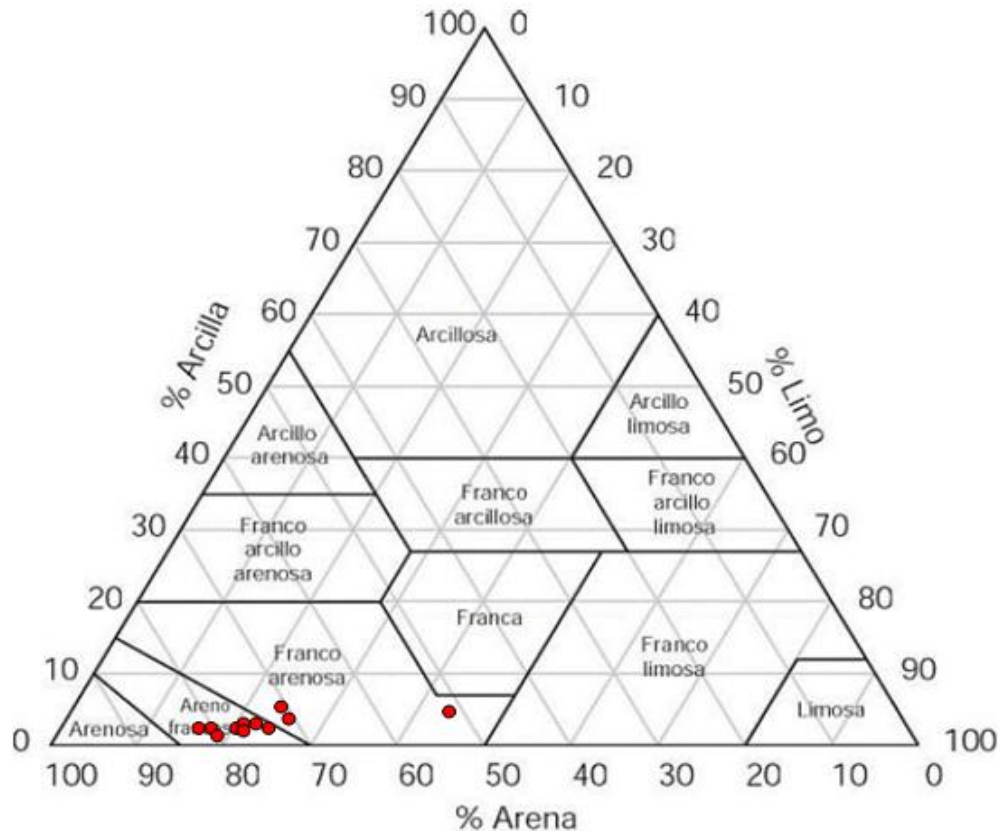


Figura 17. Triángulo Textural para las 11 muestras en suelo Top Soil.

Para el caso del Sub Soil (10 - 20cm), el lugar presenta un suelo mayoritariamente del tipo "Franco Arenosa" (60%), "Areno Francosa" (30%) y "Arenosa" (10%).

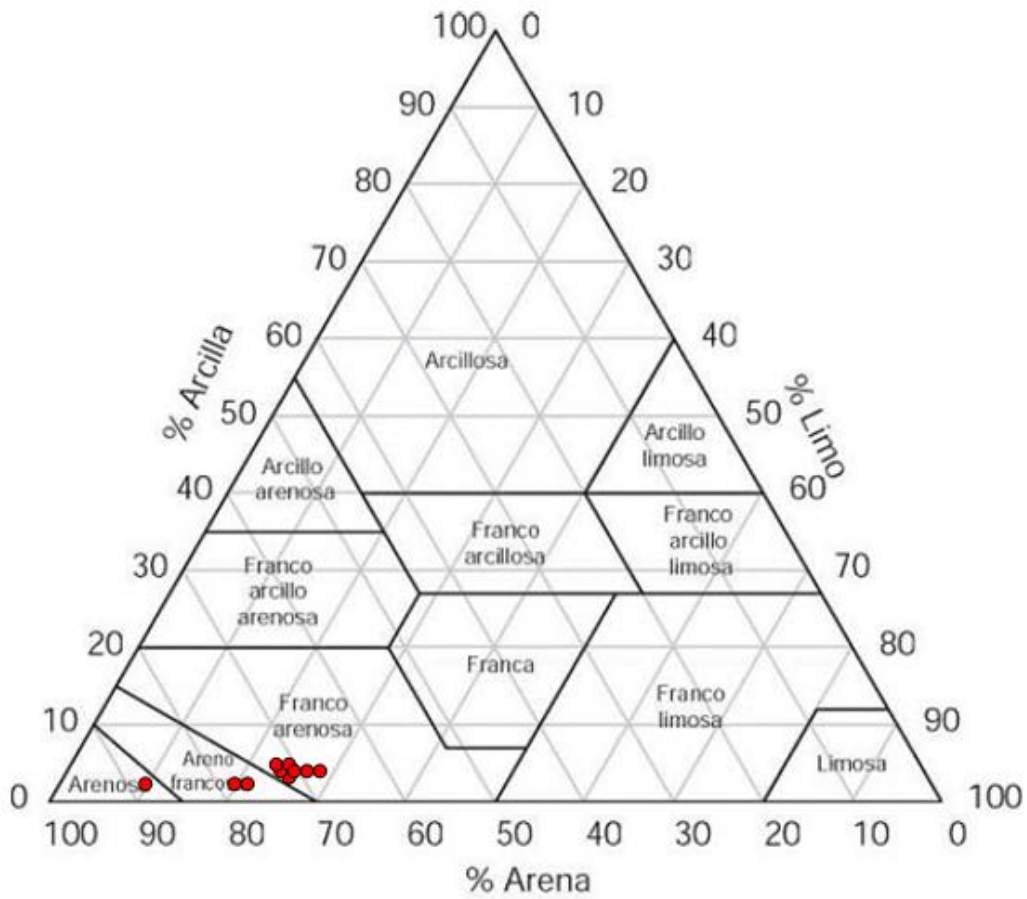


Figura 18. Triángulo Textural para las 10 muestras en suelo Sub Soil.

Para la totalidad de las muestras el suelo mayoritariamente es del tipo "Areno Francosa" (52%), "Franco Arenosa" (43%), y "Arenosa" (5%).

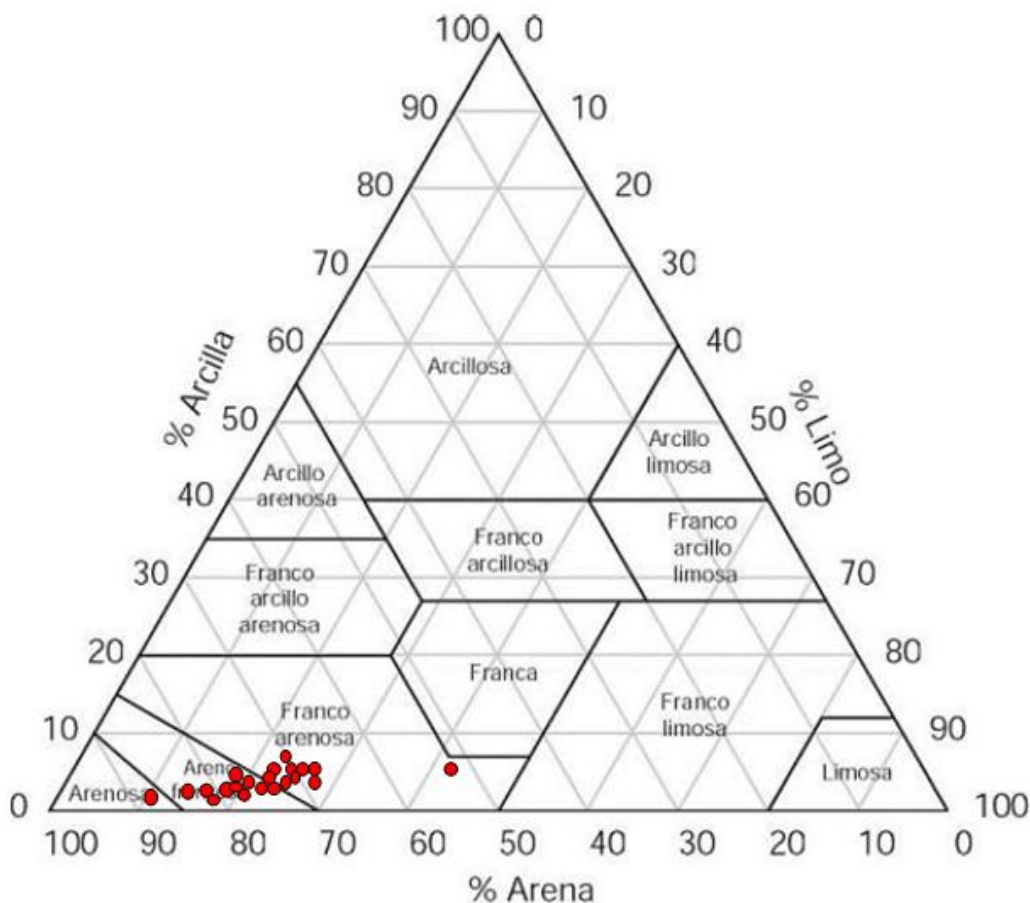


Figura 19. Triángulo Textural para las 21 muestras en suelo en Top Soil y Sub Soil.

4.3 Análisis exploratorio de los datos

Para este análisis se realizó un Histograma, diagrama de caja y diagrama de porcentaje acumulado para cada metal pesado, pH, granulometría y carbono orgánico, la cual se buscó normalidad en los datos para el análisis de correlaciones. Todos estos análisis estadísticos se realizaron mediante el programa SPSS Statistics v20.

4.3.1 Propiedades Convencionales

4.3.1.1 Análisis de Carbono Orgánico (C.O)

De la figura 20 podemos ver que el histograma posee una distribución sesgada negativamente hacia la izquierda donde su mayor frecuencia está entre 2 a 2,5% y con una mediana de 2,67%. En el Box plot, de la figura 21, se tiene 1 valor atípico proveniente de CM1 con un 0,234% de C.O, lo cual se aleja bastante del resto de las concentraciones. En

el diagrama de porcentaje acumulado, de la figura 22, podemos ver que el 95% de las muestras presentan una concentración de materia orgánica inferior a 8,95%.

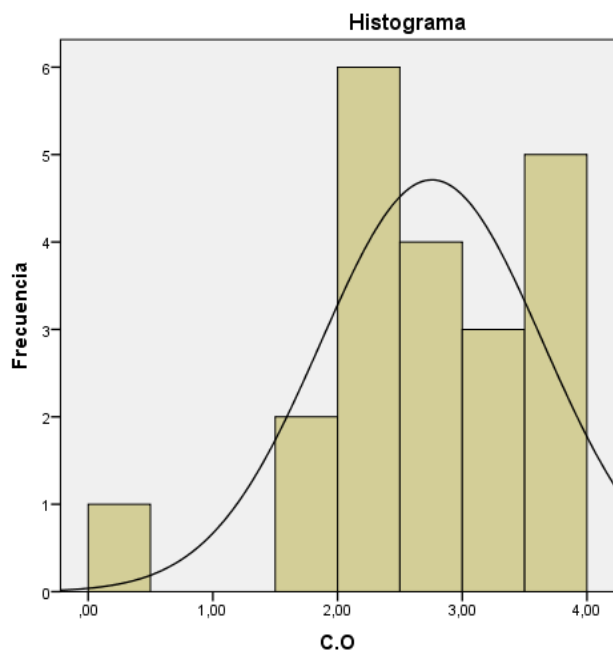


Figura 20. Histograma de carbono orgánico (C.O)%.

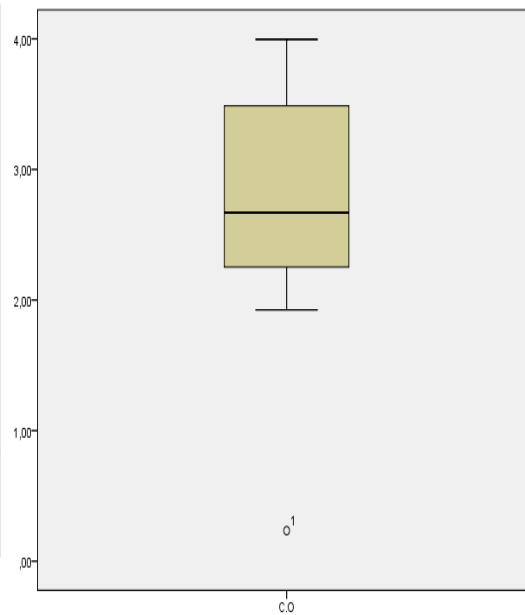


Figura 21. Box Plot de carbono orgánico (C.O)%

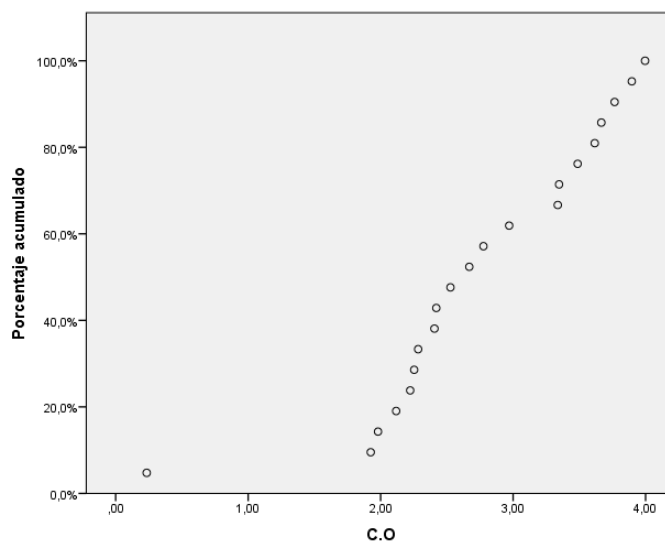


Figura 22. Porcentaje Acumulado de carbono orgánico (C.O)%

4.3.1.2 Análisis de pH

Del histograma, de la figura 23, se puede que con un sesgo aproximado a cero (media = moda = mediana), por ende se tiene simetría en los datos con una frecuencia mayor de pH entre 6,5 a 6,6. Del gráfico de Box plot de la figura 24, se puede observar no presenta valor atípico y que el 50% de los datos está por encima de un pH de 6,54. En el diagrama de porcentaje acumulado de la figura 25, podemos apreciar que el 95% de los datos presenta pH inferiores a 6,73.

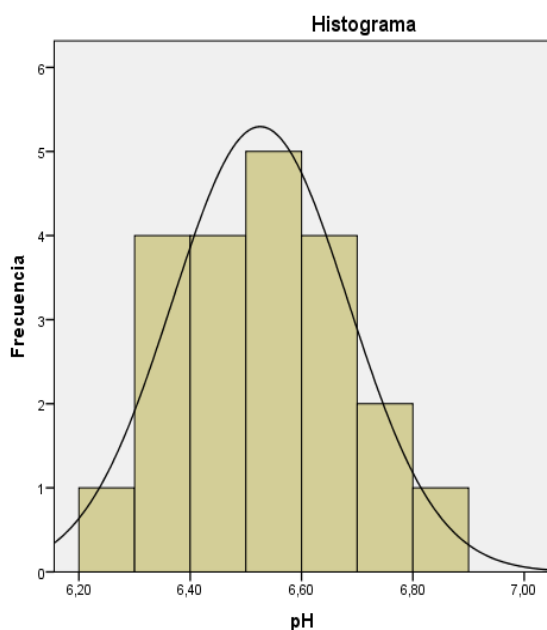


Figura 23. Histograma de pH

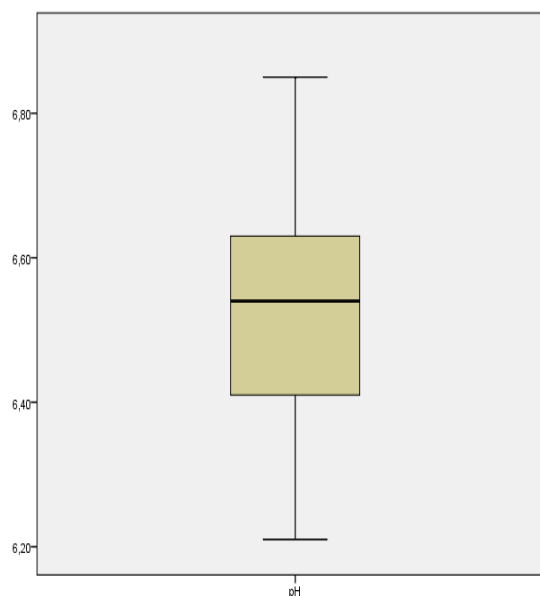


Figura 24. Box Plot de pH.

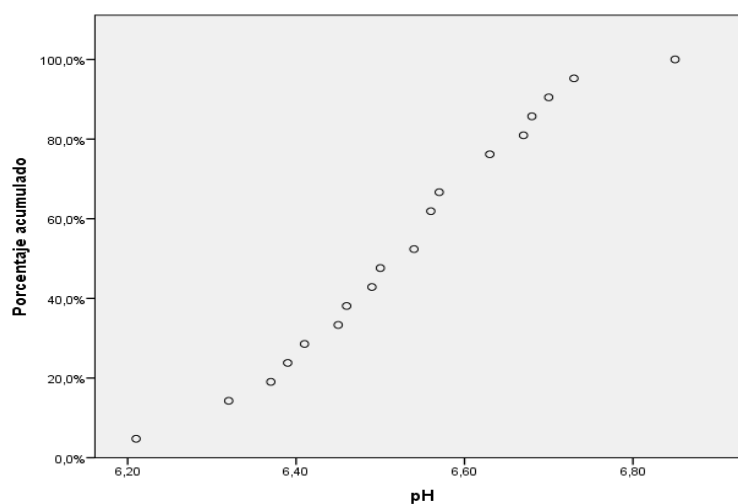


Figura 25. Porcentaje acumulado de pH.

4.3.1.3 Análisis de Arena

El histograma de la figura 26, podemos ver que posee un sesgo negativo, por ende es asimétrica hacia la izquierda, no siguiendo una distribución normal. Su mayor frecuencia se encuentra entre un 70 y 75%. Del diagrama de Box plot de la figura 27, se observa la presencia de un valor atípico proveniente de PM5 con 52,64 % y el 50% de los datos se encuentra bajo 73,23% de arena. Del diagrama de porcentaje acumulado de la figura 28, podemos decir que el 95% de los datos tiene porcentajes de arena inferior a 81,67%.

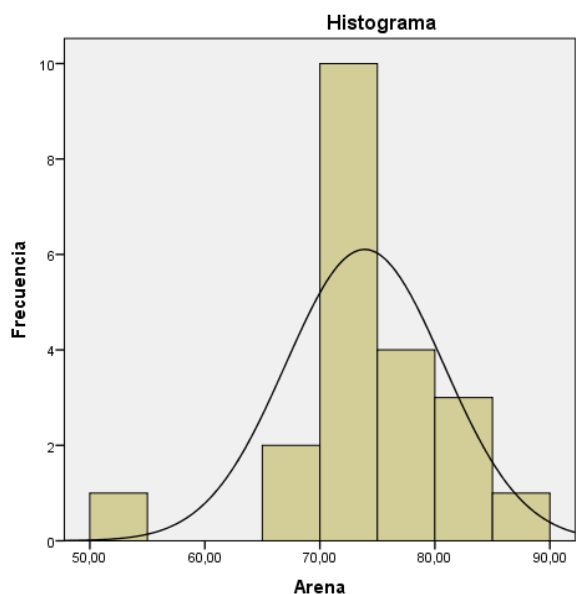


Figura 26. Histograma Arena (%)

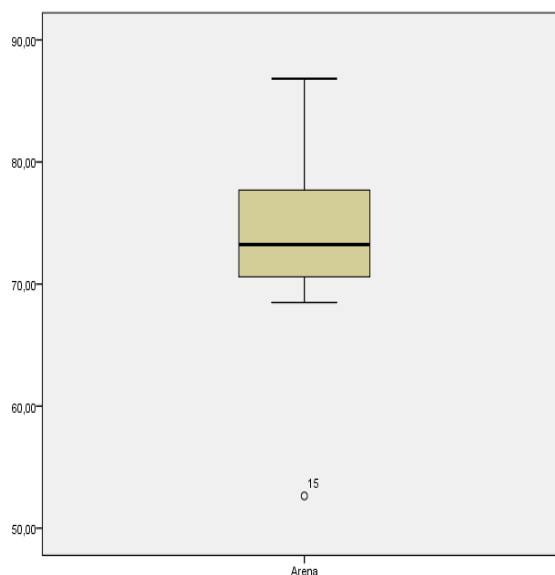


Figura 27. Box Plot Arena (%)

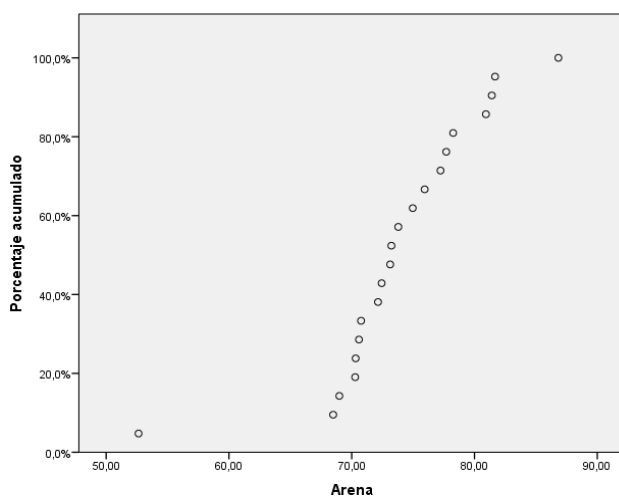


Figura 28. Porcentaje acumulado Arena (%).

4.3.1.4 Análisis de Limo

Del histograma de la figura 29, podemos apreciar que posee una distribución sesgada positivamente hacia la derecha, donde la mayor de frecuencia se encuentra entre un 20 a un 25% de limo. Del diagrama de box plot de la figura 30, se tiene un valor atípico el cual es PM5 con un 42,37% de limo y el 50% de los datos se encuentra bajo un 23,23 % de limo. Del diagrama de porcentaje acumulado de la figura 31 se tiene que el 95% de los datos tiene porcentaje de limo inferior al 28,44%.

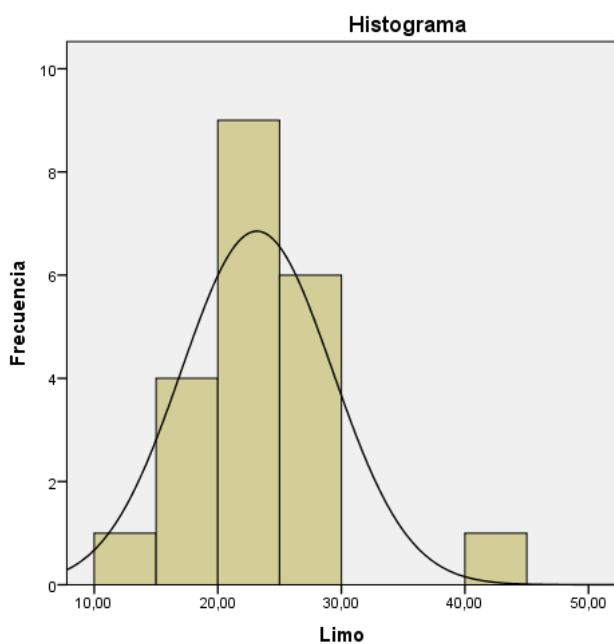


Figura 29. Histograma Limo (%)

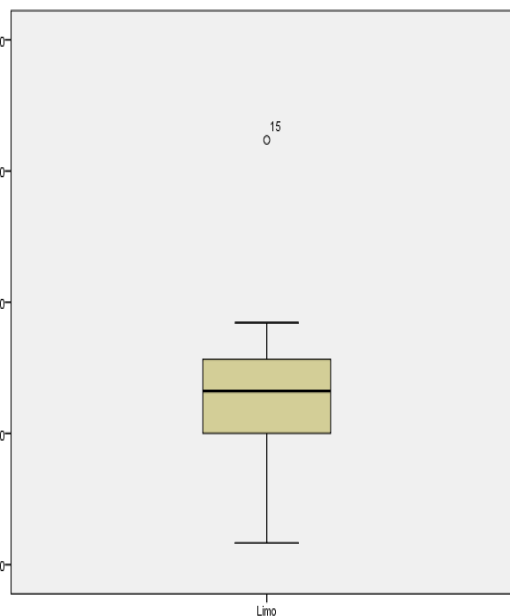


Figura 30. Box Plot Limo (%).

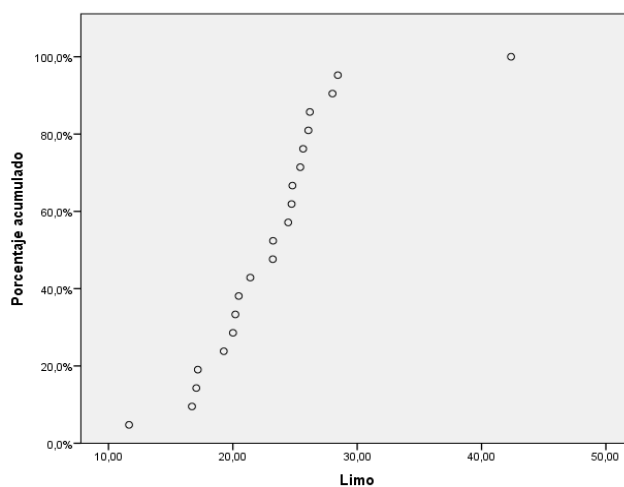


Figura 31. Porcentaje Acumulado Limo (%).

4.3.1.5 Análisis de Arcilla

Del histograma de la figura 32, podemos ver que el sesgo tiende a una distribución normal simétrica ($C_s = 0$) donde sus mayores frecuencias se encuentran entre los rangos 2 a 2,5% y 3 a 4% y su media es de 2,93%. Del diagrama de box plot de la figura 33, se puede ver que no presenta datos atípicos. Del diagrama de porcentaje acumulado de la figura 34, muestra que el 95% de los datos de arcilla son menores a 4,53%.

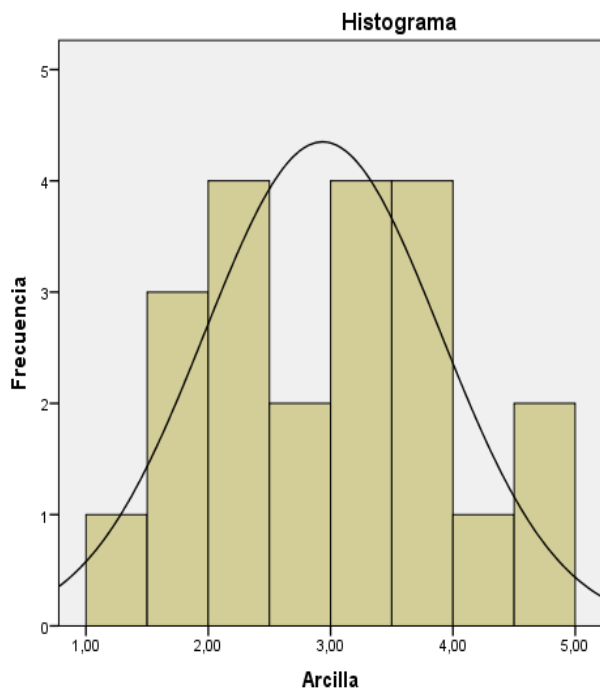


Figura 32. Histograma Arcilla (%).

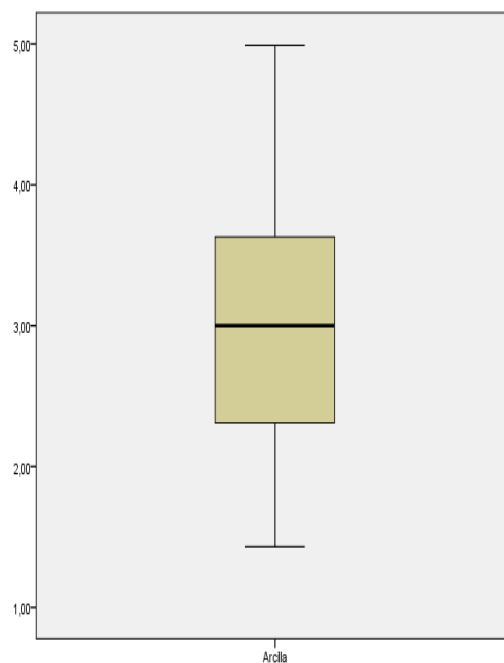


Figura 33. Box Plot Arcilla (%).

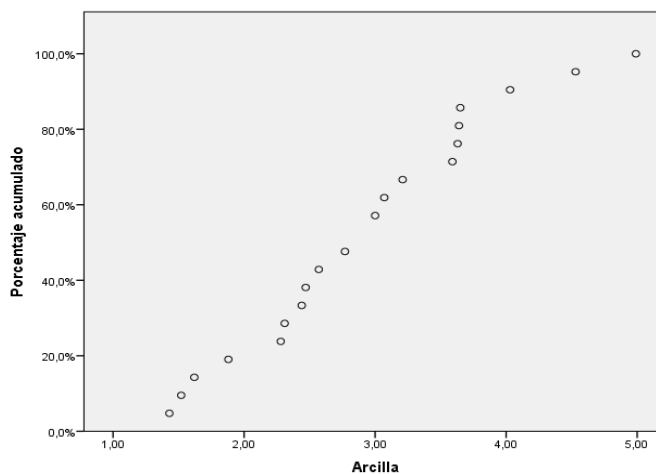


Figura 34. Porcentaje acumulado Arcilla (%).

4.3.2 Metales Pesados

4.3.2.1 Metales Pesados Pseudo-Total.

4.3.2.2 Análisis Cu

Del histograma de la figura 35, se puede ver que está sesgado positivamente hacia la derecha donde su mayor frecuencia se encuentra entre 4,5 y 5 mg/Kg con una media, moda y mediana muy parecidas entre sí (49mg/Kg ,47mg/Kg ,47mg/Kg). Del gráfico de box plot de la figura 36 se pueden ver dos datos atípicos los cuales corresponden a CM10 con 86 mg/Kg y PM10 con 79mg/Kg. Del diagrama de porcentaje acumulado de la figura 37, no representa una línea recta, por lo cual los datos no se comportan como una distribución normal.

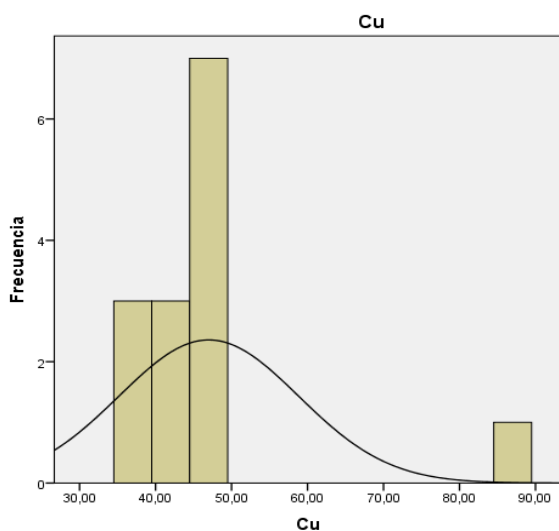


Figura 35. Histograma Cu (mg/Kg)

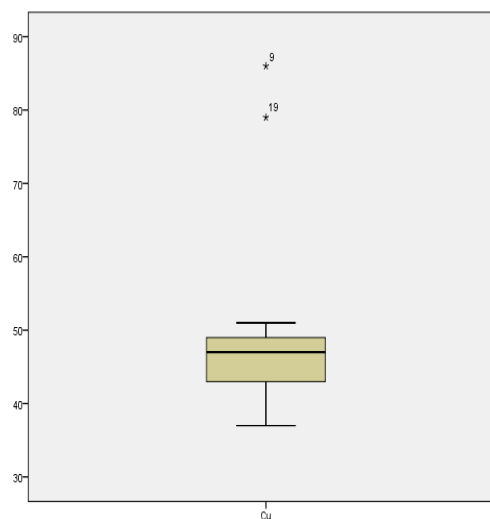


Figura 36. Box Plot Cu (mg/Kg)

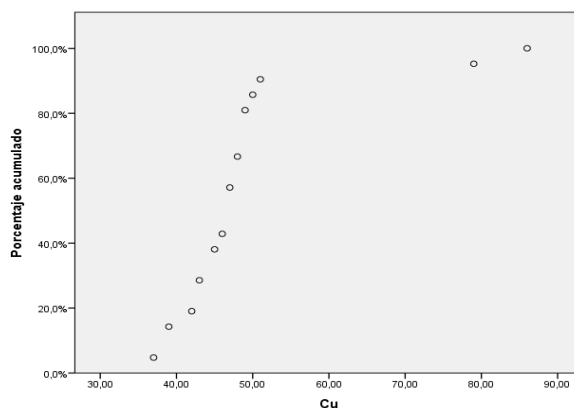


Figura 37. Porcentaje Acumulado Cu (mg/Kg)

4.3.2.3 Análisis Pb

Del histograma de la figura 38, se puede un sesgo asimétrico hacia la derecha y con una alta frecuencia entre 12,5 y 37,5 mg/Kg y una media de 46,47%. Del gráfico de box plot de la figura 39, se ven dos datos atípico los cuales corresponden a CM10 con 134 mg/Kg y PM10 con 94mg/Kg, sin embargo a pesar de la existencia de estos datos, se puede ver que presenta una distribución con tendencia normal. Del diagrama de porcentaje acumulado de la figura 40, se puede ver que no representa una línea recta, por lo cual este metal pesado no se comporta como una distribución normal.

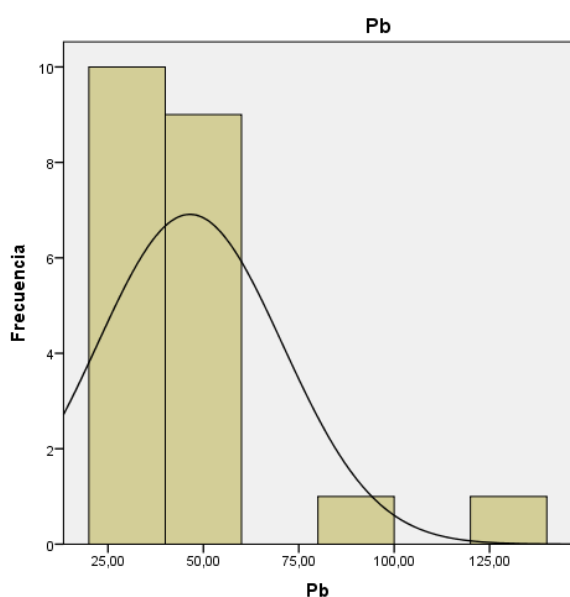


Figura 38. Histograma Pb (mg/Kg).

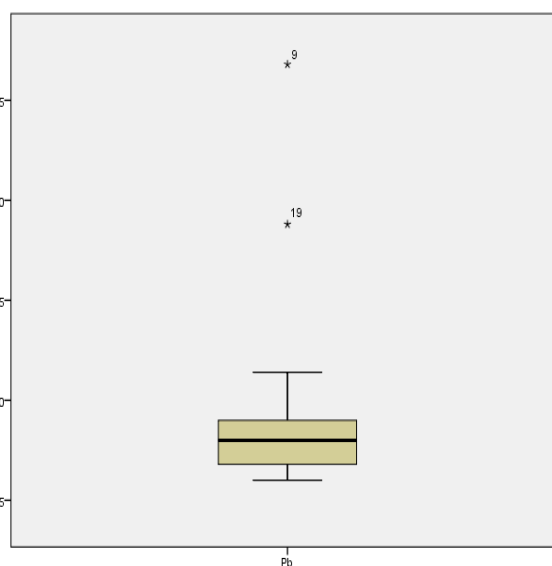


Figura 39. Box Plot Pb (mg/Kg).

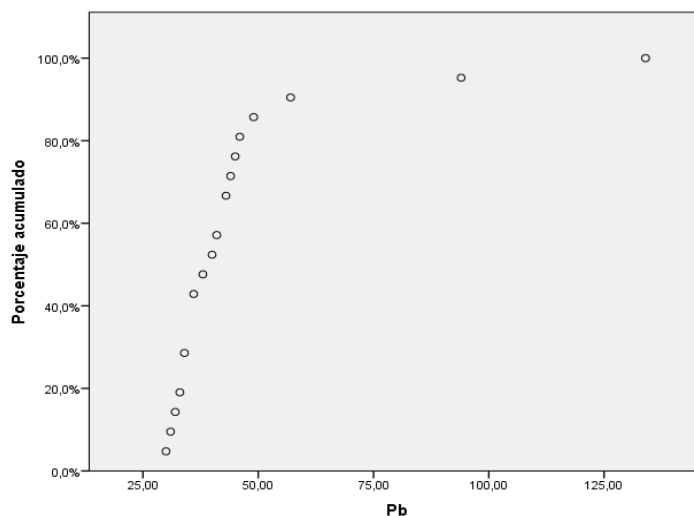


Figura 40. Porcentaje Acumulado Pb (mg/Kg).

4.3.2.4 Análisis Zn

Del histograma de la figura 41, se puede ver que presenta una distribución simétrica ($C_s=0$) con una alta frecuencia entre 129 y 131 mg/Kg y con una media, moda y mediana muy parecidas (130,3 mg/Kg, 132mg/Kg, 130mg/Kg). Del box plot de la figura 42 no presenta datos atípicos y que el 50% de los datos tienen concentraciones menores a 130 mg/Kg . Del gráfico de porcentaje acumulado de la figura 43, se ve que el 95% de los datos tienen concentraciones menores a 139mg/Kg.

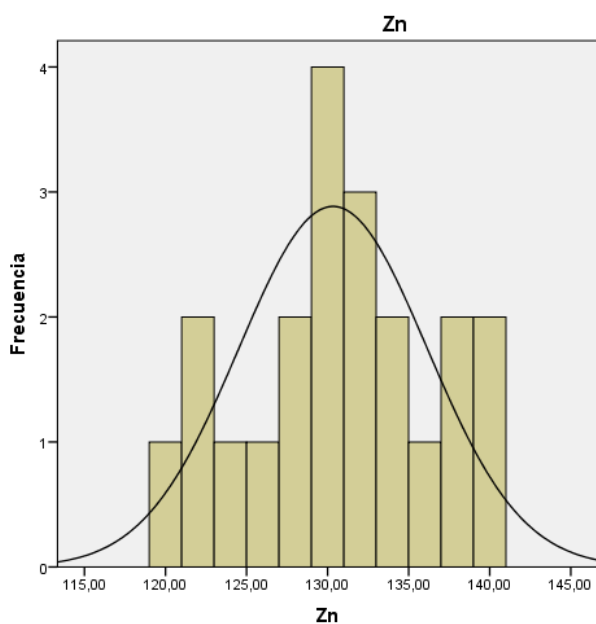


Figura 41. Histograma Zn (mg/Kg).

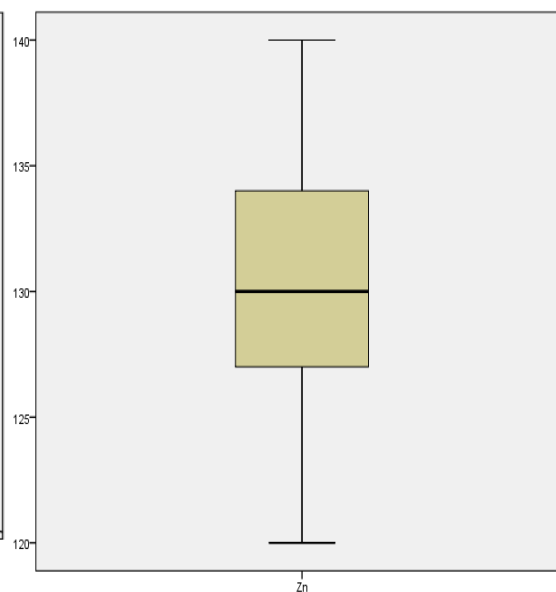


Figura 42. Box Plot Zn (mg/Kg).

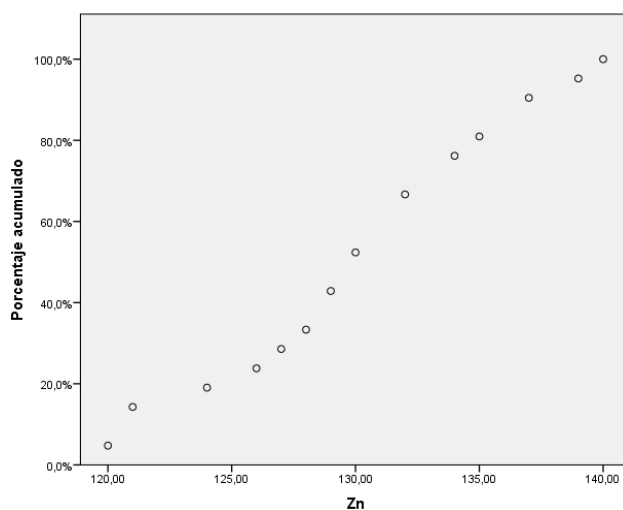


Figura 43. Porcentaje acumulado Zn (mg/Kg).

4.3.2.5 Análisis Ni

Del histograma de la figura 44, se puede ver que tiende asimétricamente a una distribución normal, debido a sus similares media, moda y mediana (27,48mg/Kg, 28 mg/Kg, 28 mg/Kg) con una mayor frecuencia entre 27,5 a 28,5 mg/Kg y una media de 27,48 mg/Kg. Del box plot de la figura 45 se puede ver que presenta 6 datos atípicos los cuales corresponden a CM1 con 31mg/Kg, CM2 con 30mg/Kg , CM4, CM8, CM10 y PM4 con 25mg/Kg y que la mediana coincide con el 75% de los datos lo cual es una concentración de 28 mg/Kg. Del gráfico de porcentaje acumulado de la figura 46, se aprecia que el 95% de los datos presentan concentraciones bajo 30mg/kg.

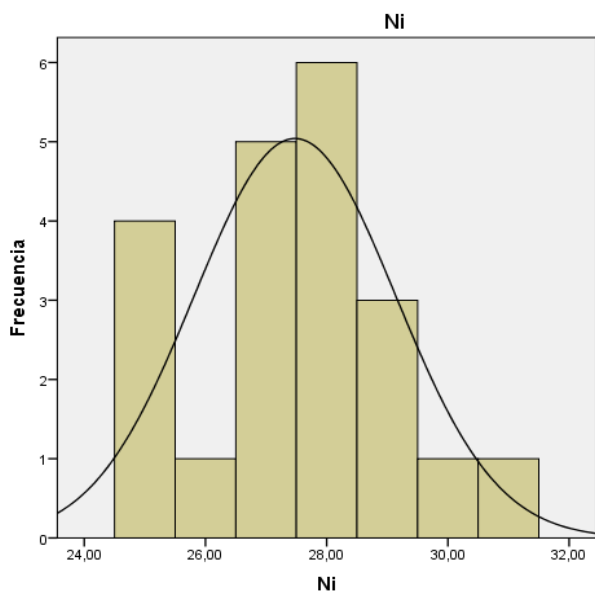


Figura 44. Histograma Ni (mg/Kg).

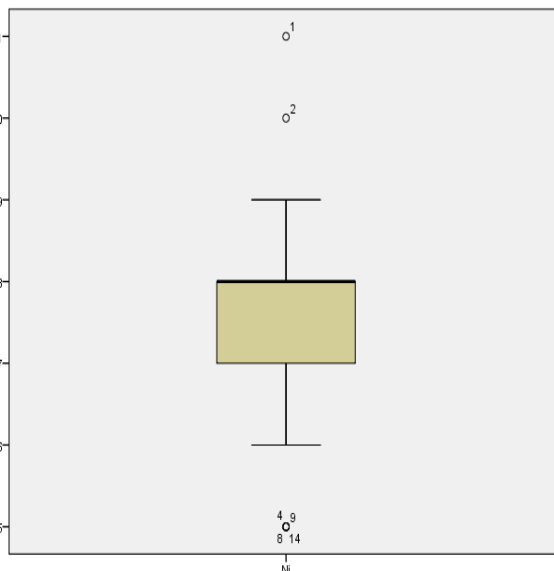


Figura 45. Box Plot Ni (mg/Kg)

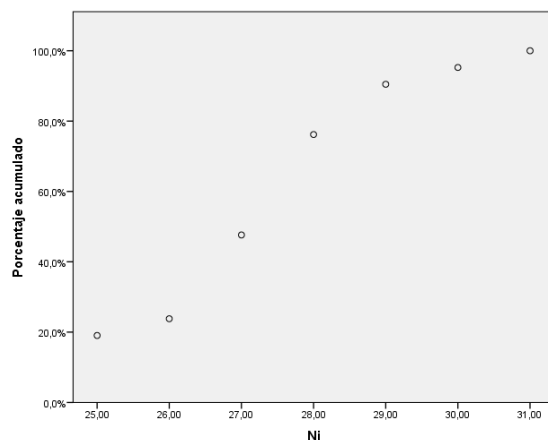


Figura 46. Porcentaje acumulado Ni (mg/Kg).

4.3.2.6 Análisis Co

Del histograma de la figura 47 se puede ver tiende a una distribución normal donde su media es 13,86 mg/Kg y su mayor frecuencia se encuentra entre las concentraciones de 13,50 y 14,50 mg/Kg. El gráfico de box plot de la figura 48, presenta 6 datos atípicos los cuales son CM1y PM1 con 15mg/Kg, CM7, CM10, PM4, PM12 con 13mg/kg y que la mediana coincide con el Q1, Q3, min y max con una concentración de 14 mg/Kg. El gráfico de porcentaje acumulado de la figura 49, no representa una línea recta, por lo cual este metal pesado no se comporta como una distribución normal.

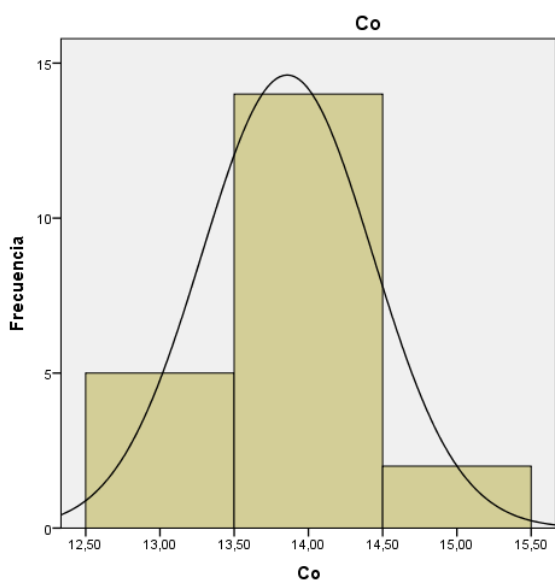


Figura 47. Histograma Co (mg/Kg)

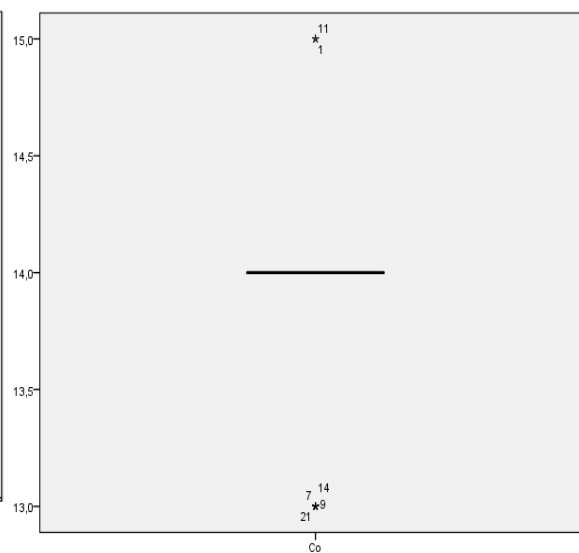


Figura 48. Box plot Co (mg/Kg)

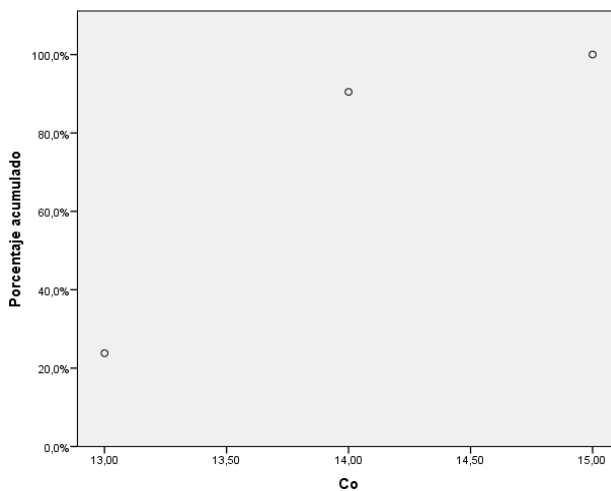


Figura 49. Porcentaje acumulado Co (mg/Kg)

4.3.2.7 Análisis Cr

Del histograma de la figura 50, podemos ver que tiene una asimetría hacia la derecha (Sesgo positivo), con una alta frecuencia entre 18,5 y 19,5 mg/Kg. Del gráfico de box plot de la figura 51, se pueden ver dos datos atípico los cuales corresponden a CM7 con una concentración de 23 mg/Kg y PM11 con 21mg/Kg, los cuales se aleja de límite superior, la mediana coincide con el Q3 las cuales tienen una concentración de 19mg/kg . Del gráfico de porcentaje acumulado de la figura 52, se puede ver que el 95% de los datos tienen concentraciones menores a 21 mg/Kg.

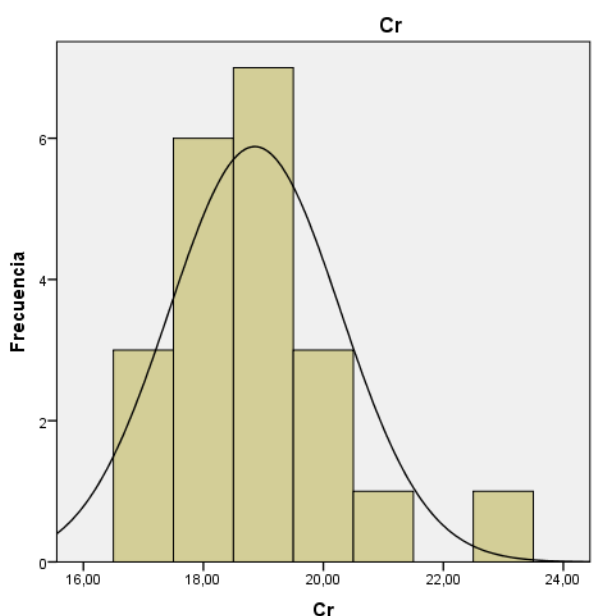


Figura 50. Histograma Cr (mg/Kg)

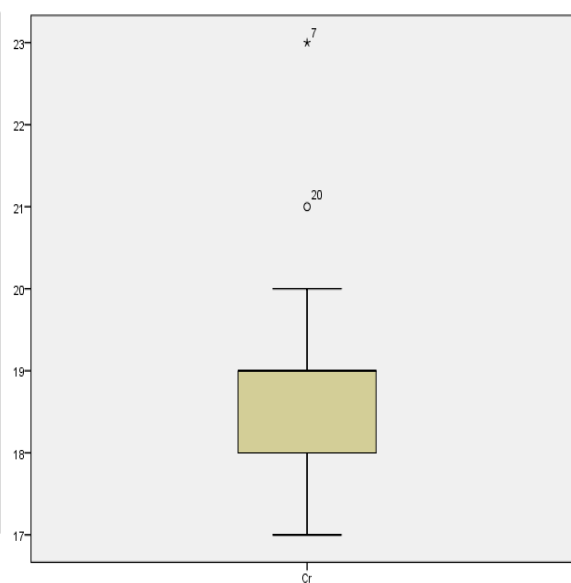


Figura 51. Box Plot Cr (mg/Kg)

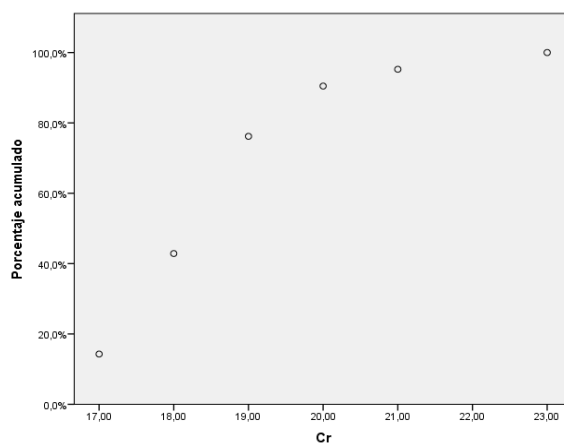


Figura 52. Porcentaje acumulado Cr (mg/Kg)

4.3.3 Metales Pesados Biodisponible

4.3.3.1 Análisis Cu

Del histograma de la figura 53, se puede ver que está sesgado positivamente hacia la derecha, donde su mayor frecuencia se encuentra entre 2,5 y 5 mg/Kg y con una media de 6,39 mg/Kg. Del gráfico de box plot de la figura 54, se puede ver 2 datos atípicos, los cuales corresponden a CM10 con 25,49 mg/Kg y al punto 9 del gráfico y el punto 20 de éste corresponde a PM11 con 16,29 mg/Kg. El gráfico de porcentaje acumulado de la figura 55, no presenta una línea recta, por lo cual los datos no se comportan como una distribución normal.

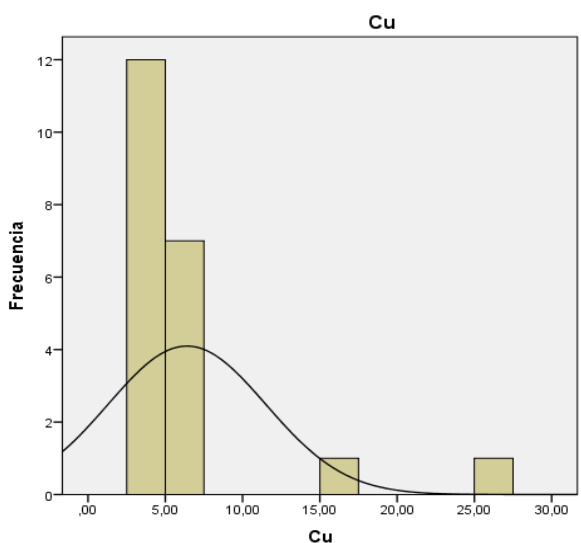


Figura 53. Histograma Cu (mg/Kg).

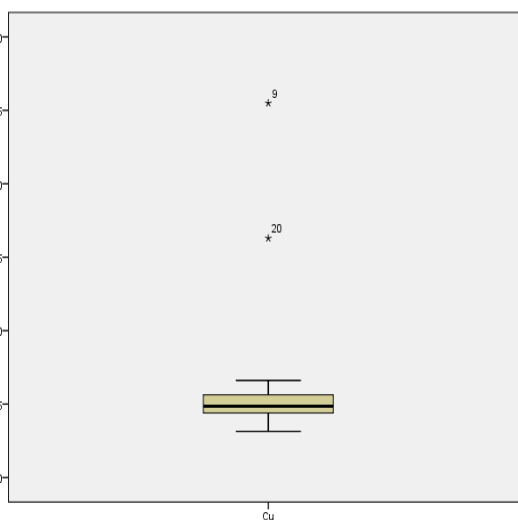


Figura 54. Box Plot de Cu (mg/Kg)

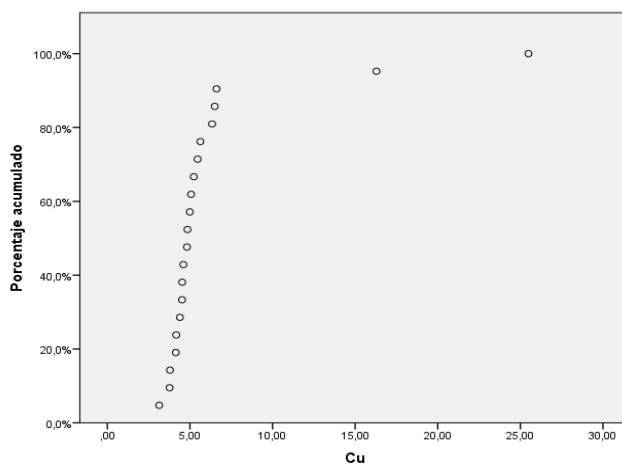


Figura 55. Porcentaje acumulado Cu (mg/Kg)

4.3.3.2 Análisis Pb

De la figura 56 se puede ver un sesgo asimétrico hacia la derecha, con una alta frecuencia entre 0 y 2,5 mg/Kg y con una media de 4, 14 mg/Kg. Del gráfico de box plot de la figura 57, se ven dos datos atípicos los cuales corresponden a CM10 con 20,15 mg/kg en el punto 9 del gráfico y el punto 20 de éste corresponde a PM11 con 13,56 mg/Kg. Del gráfico de porcentaje acumulado de la figura 58, se puede ver que no representa una línea recta, por lo cual este metal pesado, no se comporta como una distribución normal.

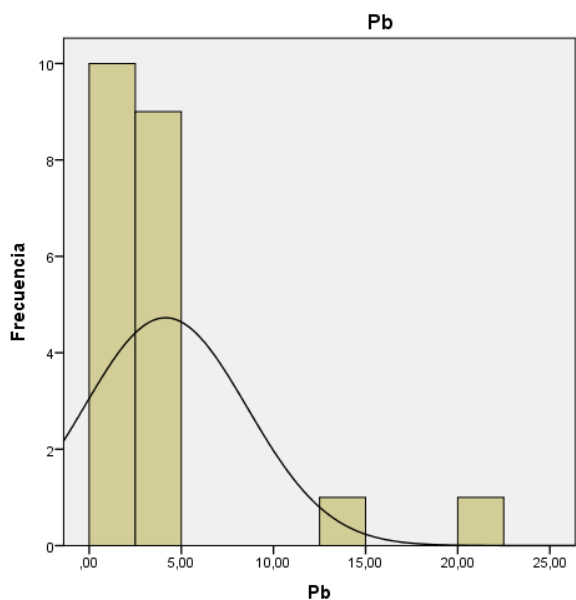


Figura 56. Histograma Pb (mg/Kg)

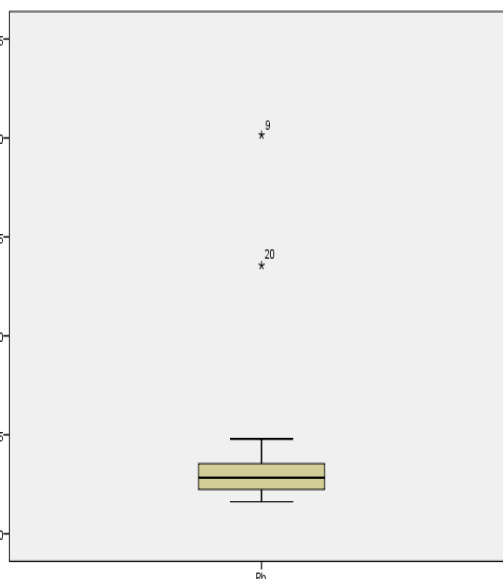


Figura 57. Box Plot Pb (mg/Kg)

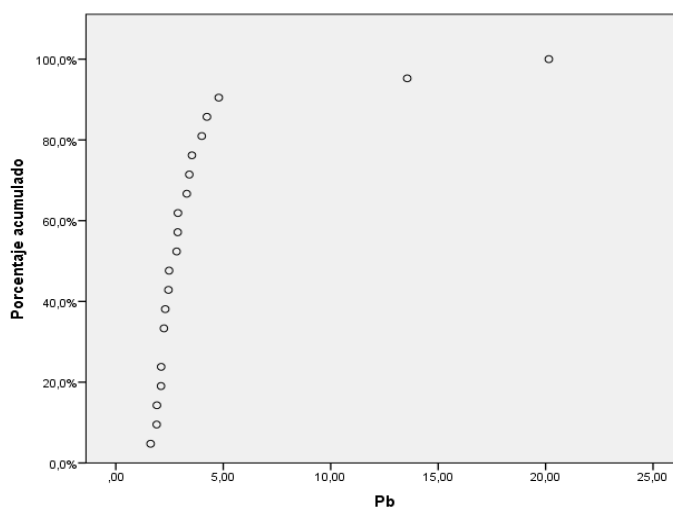


Figura 58. Porcentaje acumulado Pb (mg/Kg)

4.3.3.3 Análisis Zn

En el histograma de la figura 59, se puede ver claramente que tiende asimétricamente a una distribución normal, debido a sus similares media, moda y mediana respectivamente (16,99 mg/Kg, 14,70 mg/kg, 16,86 mg/kg) con una mayor frecuencia entre 16 a 17 mg/kg, Del box plot de la figura 60, se puede ver que no presenta datos atípicos y que el 50% de los datos tienen concentraciones menores a 16,86 mg/kg. Del gráfico de porcentaje acumulado de la figura 61, se ve que el 95% de los datos tienen concentraciones menores a 19,08 mg/kg.

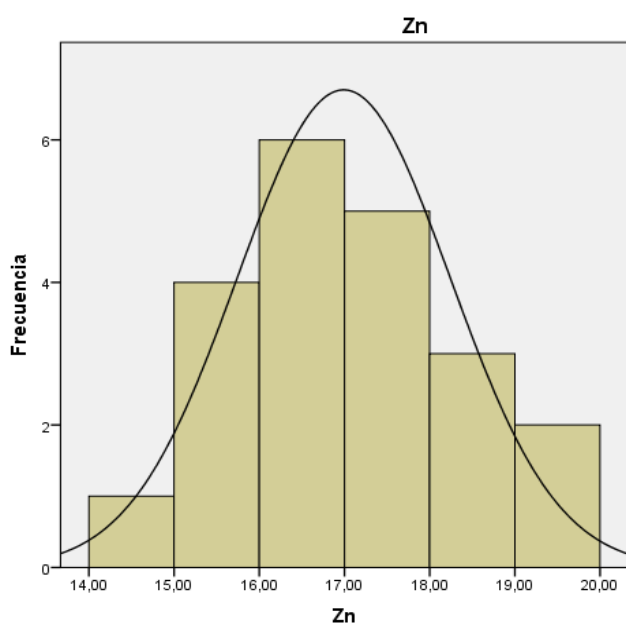


Figura 59. Histograma Zn (mg/Kg)

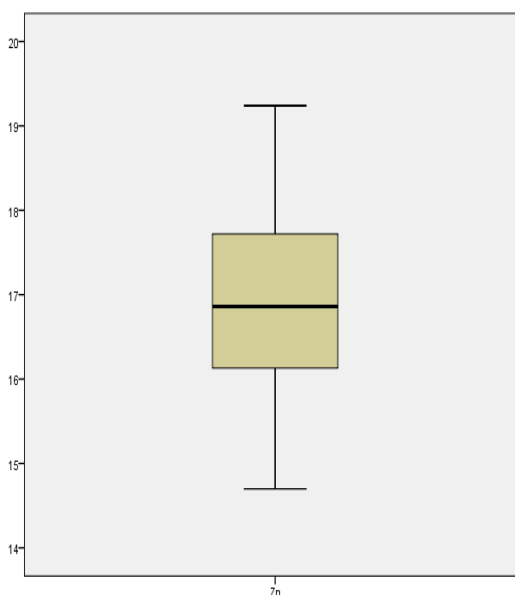


Figura 60. Box Plot Zn (mg/Kg)

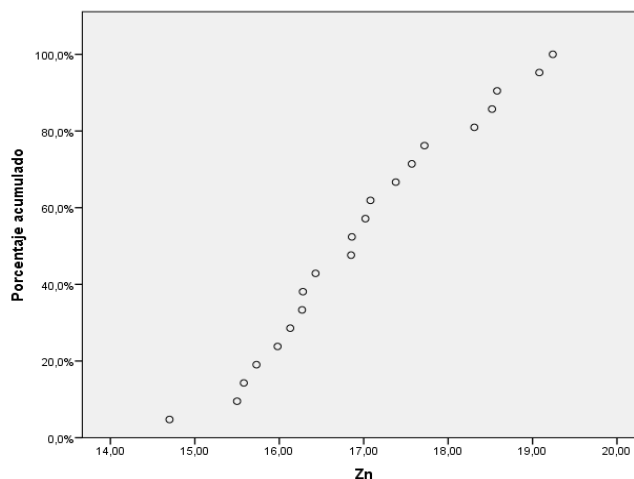


Figura 61. Porcentaje acumulado Zn (mg/kg)

4.3.3.4 Análisis Ni

Del histograma de la figura 62 se puede ver una distribución aproximadamente simétrica, donde la mayor frecuencia se encuentra entre 375 a 400 $\mu\text{g}/\text{kg}$. Del box plot de la figura 63, se puede ver que no presenta valores atípicos y que el 50% de los datos tienen concentraciones menores a 409,97 $\mu\text{g}/\text{kg}$. Del gráfico de porcentaje acumulado, de la figura 64, se puede ver que no representa una línea recta, por lo cual este metal pesado no se comporta como una distribución normal.

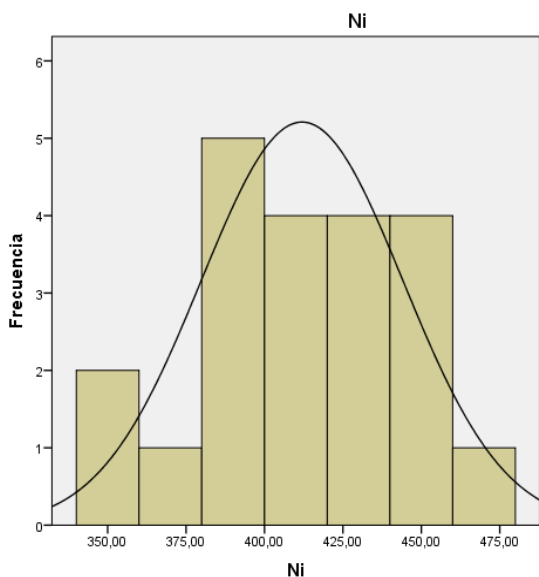


Figura 62. Histograma Ni ($\mu\text{g}/\text{Kg}$)

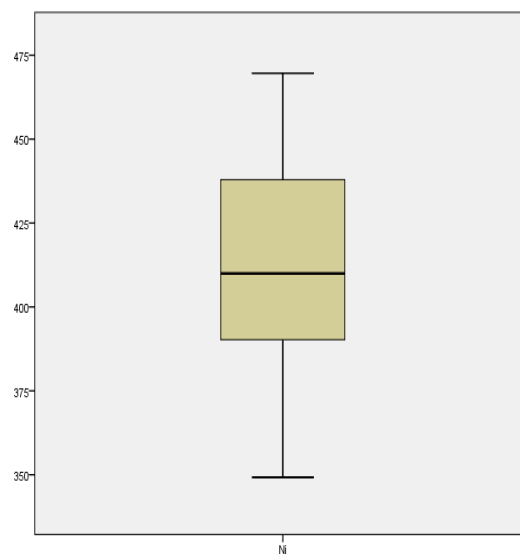


Figura 63. Box Plot Ni ($\mu\text{g}/\text{Kg}$)

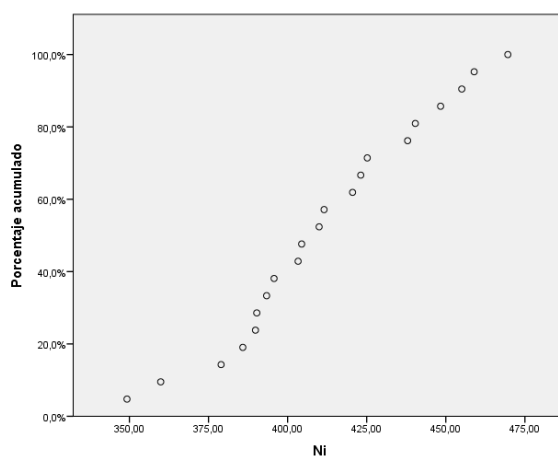


Figura 64. Porcentaje acumulado Ni ($\mu\text{g}/\text{Kg}$)

4.3.3.5 Análisis Co

Del histograma de la figura 65, se puede ver que tiende a una distribución normal donde su media es 411,97 $\mu\text{g}/\text{kg}$ y su mayor frecuencia se encuentra entre las concentraciones de 15 a 25 $\mu\text{g}/\text{kg}$. El gráfico de box plot de la figura 66, se puede ver que presenta un dato atípico el cual corresponde a CM8 con 46,94 $\mu\text{m}/\text{kg}$. Del gráfico de porcentaje acumulado de la figura 67, se puede ver que el 95% de los datos tienen concentraciones menores a 41,11 $\mu\text{g}/\text{kg}$.

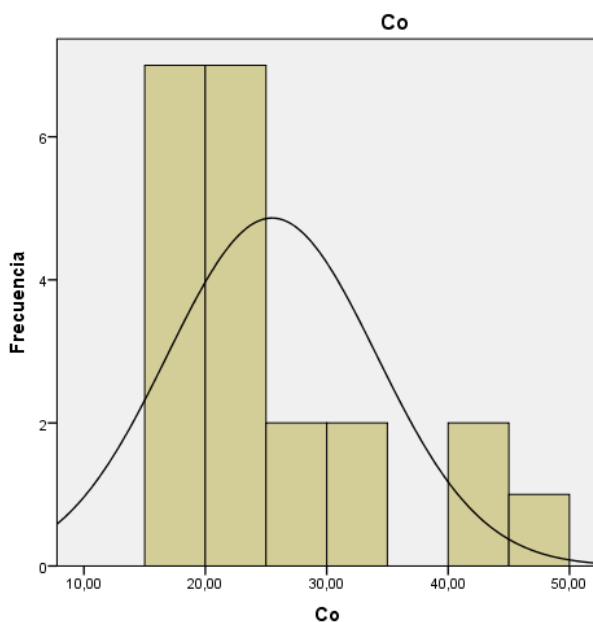


Figura 65. Histograma Co ($\mu\text{g}/\text{kg}$)

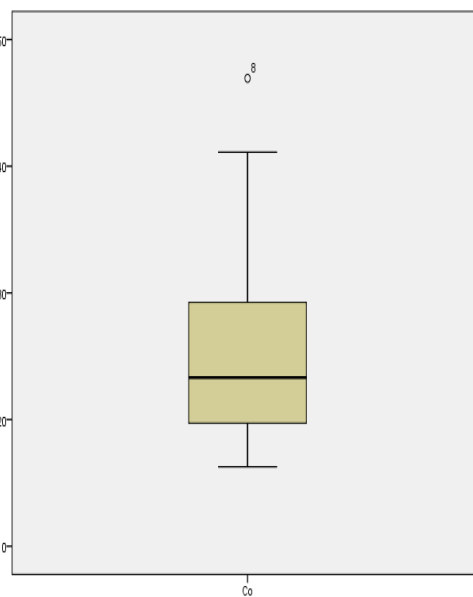


Figura 66. Box Plot Co ($\mu\text{g}/\text{kg}$)

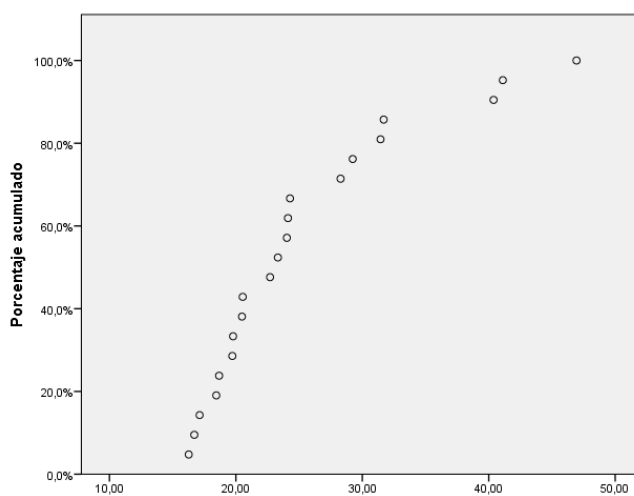


Figura 67. Porcentaje acumulado Co ($\mu\text{g}/\text{kg}$)

4.3.3.6 Análisis Cr

Del histograma de la figura 68, se puede ver una distribución sesgada negativamente hacia la izquierda, donde la mayor frecuencia se encuentra entre 0 a 2 $\mu\text{g}/\text{kg}$. El diagrama de box plot de la figura 69, se puede ver que el Q1 y Xmin, coinciden con la mismas concentraciones de Cr la cual es 0 $\mu\text{g}/\text{Kg}$, y que presenta dos valores atípicos corresponden a CM6 con 9,27 $\mu\text{m}/\text{kg}$ y PM8 con 8,25 $\mu\text{m}/\text{kg}$. Del gráfico de porcentaje acumulado de la figura 70, se puede ver que no representa una línea recta, por lo cual este metal pesado no se comporta como una distribución normal.

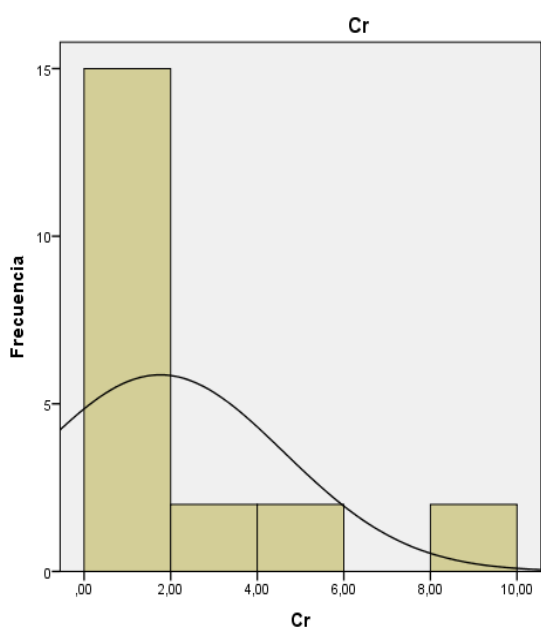


Figura 68. Histograma Cr ($\mu\text{g}/\text{Kg}$)

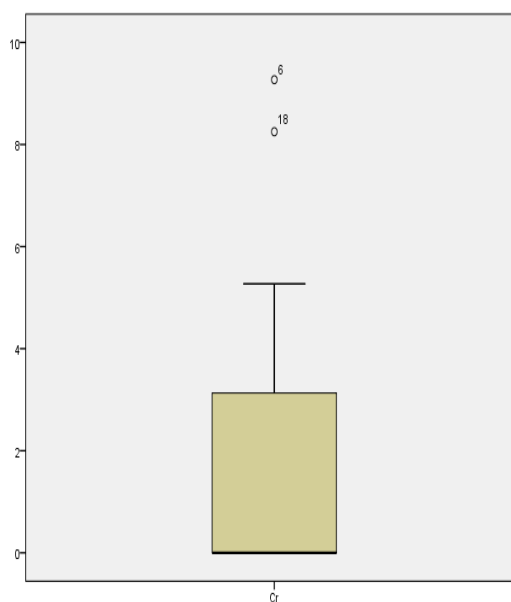


Figura 69. Box Plot Cr ($\mu\text{g}/\text{Kg}$)

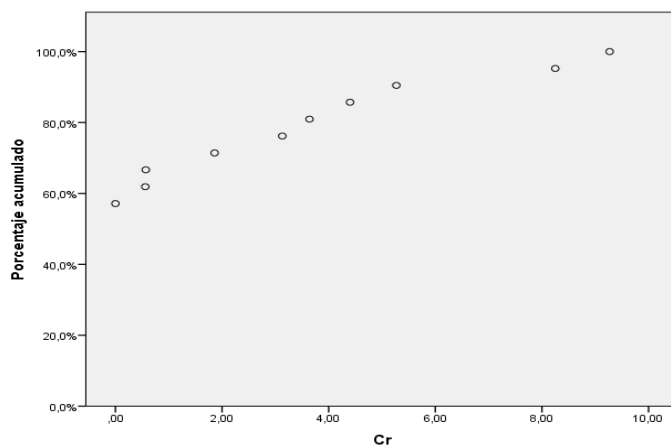


Figura 70. Porcentaje acumulado Cr ($\mu\text{g}/\text{Kg}$)

4.4 Estadística Descriptiva

En este punto se interpretarán los análisis realizados al suelo (pH, C.O, Granulometría) y las plantas (Metales Pesados Pseudo -Total y Biodisponible), mediante tablas de estadística descriptiva.

4.4.1 Interpretación de las propiedades edafológicas

	Estadísticos												
	Media	Moda	Mediana	SD ¹	CV ² (%)	AS ³	Curtosis	Min	Max	Percentiles			
										25	50	75	95
pH	6,53	6,32	6,54	1,58	24,20	-0,006	-0,312	6,21	6,85	6,4	6,54	6,65	6,84
C.O	2,76	0,23	2,67	0,89	32,25	-0,86	1,74	0,23	4	2,24	2,67	3,55	3,98
Arena	73,89	53,64	73,23	6,86	9,28	-1,1	3,93	52,64	86,83	70,45	73,23	77,98	86,31
Limo	23,17	11,65	23,23	6,11	26,37	1,22	4,23	11,65	42,37	19,64	23,23	25,86	40,98
Arcilla	2,93	3	3	0,96	32,76	0,305	-0,324	1,43	4,99	2,29	3	3,64	4,94

¹Desviación Estándar

² Coeficiente de variación

³ Asimetría

Tabla 10. Parámetros de las propiedades estadísticas del suelo.

De la tabla 10 podemos ver las propiedades del suelo y sus elementos, sus medias, modas, medianas, desviación estándar, coeficiente de variación, , asimetría, curtosis y percentiles (25, 50, 75 y 95).

El pH del suelo, según la tabla 9 ubicada en la página 34, demuestra que es ligeramente ácido . Presentan un alto contenido de arena, limo y un bajo porcentaje de arcilla.

Para los parámetros de la distribución normal, curtosis y asimetría, los valores correspondientes son 0 para ambos, lo cual de la tabla 11 podemos ver que ningún parámetro cumple con lo indicado, debido a que este valor son para los datos de una población, pero como estamos trabajando con una muestra, entonces se analizarán bajo un rango de 1 y -1. De esta forma la arcilla, arena y C.O se distribuyen de manera normal.

En el caso del Coeficiente de variación, todas las propiedades edafológicas tienen un porcentaje menor al 35%, por lo cual se tiene que los datos son homogéneos.

Para el caso del carbono orgánico, de la tabla 8 ubicada en la página 34, podemos ver que por su media 2,76% ésta se clasifica como alta.

4.4.2 Interpretación de Metales Pesados

4.4.2.1 Metales Pesados en concentración Pseudo -Total del suelo.

	Estadísticos												
	Media	Moda	Mediana	SD ¹	CV ² (%)	AS ³	Curtosis	Min	Max	Percentiles			
										25	50	75	95
Cu	49	47	47	11,81	24,10	2,44	5,941	37	86	43	47	49	85,3
Pb	46,47	36	40	24,24	52,16	2,94	9,023	30	134	34	40	45,5	130
Zn	130,3	132	130	5,81	4,46	-0,241	-0,67	120	140	126,5	130	134,5	139,9
Ni	27,48	28	28	1,66	6,04	0,08	-0,261	25	31	26,5	28	28,5	30,9
Co	13,86	14	14	0,57	4,11	-0,04	0,318	13	15	13,5	14	14	15
Cr	18,86	19	18,86	1,42	7,53	1,19	2,4	17	23	18	19	19,5	22,8

¹Desviación Estándar

² Coeficiente de variación

³ Asimetría

Tabla 11. Propiedades estadísticas de metales pesados en concentración pseudo-total del suelo

De la tabla 11 podemos ver que el metal con mayor concentración es Zn con 130,33 mg/Kg, seguido por Cu con 49 mg/Kg y Pb con 46,47 mg/Kg y los con menores concentración son Ni con 27,48 mg/Kg, seguido de Cr con 18,86 mg/Kg y Co con 13,86 mg/Kg.

Respecto a la asimetría y curtosis, se analizaron bajo el mismo rango de normalidad aplicado anteriormente (-1 y 1), siendo así, que los metales pesados que cumplen con los parámetros de una distribución normal son Ni y Co.

Al analizar el coeficiente de variación vemos que los metales Cu, Zn, Ni, Co y Cr son menores al 35%, por lo cual se consideran datos homogéneos, al contrario del caso del Pb que su CV es de 52,16%, lo cual nos dice que sus datos son medianamente heterogéneos.

Los metales Pb, Cu y Zn tiene un mayor rango intercuartilico (RI= Max - Min). En orden descendiente son: 104 mg/Kg, 49 mg/Kg y 20 mg/Kg para Pb, Cu y Zn, esto es, debido a la gran longitud que existe entre sus valores máximos y mínimos de concentración.

4.4.2.2 Metales Pesados en concentración Biodisponible del suelo.

Estadísticos													
	Media	Moda	Mediana	SD ¹	CV ² (%)	AS ³	Curtosis	Min	Max	Percentiles			
										25	50	75	95
Cu	6,4	3,14	4,85	5,11	79,84	3,22	10,62	3,14	25,49	4,28	4,85	5,99	24,57
Pb	4,14	2,24	2,83	4,43	107	3,08	9,4	1,62	20,15	2,18	2,83	3,77	19,49
Zn	16,99	14,7	16,86	1,25	7,36	0,23	-0,71	14,7	19,24	16,06	16,86	18,02	19,22
Ni	411,9	349,2	409,1	32,16	7,8	-0,012	-0,515	349,23	469,61	390,05	409,97	439,14	468,55
Co	25,5	16,27	23,32	8,61	33,8	1,22	0,79	16,27	46,94	19,20	23,32	30,34	46,36
Cr	1,76	0,00	0,00	2,86	162,5	1,66	1,86	0,00	9,27	0,00	0,00	3,39	9,17

¹Desviación Estándar

² Coeficiente de variación

³ Asimetría

Tabla 12. Propiedades estadísticas de metales pesados en concentración biodisponible del suelo.

De la tabla 12 podemos ver que el metal con mayor concentración es Ni con 411,9 mg/Kg , seguido por Co con 25,5 mg/Kg y Zn con 16,99 mg/Kg y los con menores concentración son Cu con 6,4 mg/Kg, seguido de Pb con 4,14 mg/Kg y Cr con 1,76 mg/Kg.

Respecto a la asimetría y curtosis, se analizaron bajo el mismo rango de normalidad aplicado anteriormente (-1 y 1), siendo así, que el único metal pesado que cumple con los parámetros de una distribución normal es Zn.

Al analizar el coeficiente de variación vemos que los metales Zn, Ni y Co son menores al 35%, por lo cual se consideran datos homogéneos, al contrario del caso del Pb, Cu y Cr que su CV es de 107, 79,84 y 162,5% respectivamente, lo cual nos dice que para Cu, sus datos son heterogéneos, para el caso de Pb la media no aporta al conjunto de datos y para los datos de Cu significa que la media no aporta al conjunto de datos , lo cual en conclusión, los datos de los 3 metales son heterogéneos.

Los metales Ni, Co y Cu tiene un mayor rango intercuartilico (RI= Max - Min). En orden descendiente son: 120,38 mg/Kg, 30,67 mg/Kg, 22,35 mg/Kg esto es, debido a la gran longitud que existe entre sus valores máximos y mínimos de concentración.

4.5 Prueba de Hipótesis

Para verificar si los datos son normales, se ocupará el test de normalidad de Shapiro Wilk descrito en el punto 2.2 de este proyecto, el cual comprueba la existencia de normalidad. De las tablas 13, 14 y 15 se tiene el valor estadístico y el nivel de significancia de las propiedades edafológicas y los metales pesados tanto pseudo total y biodisponible, de los cuales con estos datos podemos verificar si tienen una distribución normal, aceptando la hipótesis nula (H_0).

	Valor Estadístico	Nivel de Significancia
Propiedades Edafológicas		
Carbono Orgánico	0,915	0,070
pH	0,917	0,231
Arena	0,916	0,221
Limo	0,932	0,359
Arcilla	0,958	0,727

Tabla 13. Test de normalidad Shapiro Wilk para las propiedades edafológicas.

De la tabla 13 podemos ver que todas las propiedades edafológicas C.O, pH, Arena, Limo y Arcilla se distribuyen normal, debido a que su significancia es mayor a 0,05, por lo tanto se acepta la hipótesis nula.

	Valor Estadístico	Nivel de Significancia
Metales Pesados		
Cu	0,663	0,000
Pb	0,598	0,000
Zn	0,966	0,651
Ni	0,934	0,169
Co	0,744	0,000
Cr	0,884	0,018

Tabla 14. Test de normalidad Shapiro Wilk para los metales pesados en concentraciones Pseudo-Total del suelo.

De la tabla 14 se puede ver que los metales pesados en concentración Pseudo-Total del suelo, Zn y Ni tienen una significancia mayor a 0,05 por lo tanto si se distribuyen de

manera normal y los metales Cu, Pb, Co y Cr tiene una significancia bajo 0,05, por lo tanto no se distribuyen de manera normal.

	Valor Estadístico	Nivel de Significancia
Metales Pesados		
Cu	0,513	0,000
Pb	0,521	0,000
Zn	0,97	0,741
Ni	0,228	0,000
Co	0,894	0,027
Cr	0,228	0,000

Tabla 15. Test de normalidad Shapiro Wilk para los metales pesados en concentración Biodisponible del suelo.

De la tabla 15 se puede ver que el metal pesado en concentración Biodisponible del suelo, Zn es el único que tiene una significancia mayor a 0,05 por lo tanto se distribuye de manera normal y los metales Cu, Pb, Ni, Co y Cr tiene una significancia bajo 0,05, por lo tanto no se distribuyen de manera normal.

4.6 Correlación de Spearman entre los elementos

Se realizó un análisis de correlación de Spearman para ver la relación que puede existir entre los metales pesados en concentración Pseudo-total del suelo y Propiedades edafológicas al igual que la relación entre metales pesados en concentración biodisponible del suelo y Propiedades edafológicas y finalmente una relación entre metales en concentración Pseudo-total y biodisponible del suelo.

	Cu	Pb	Zn	Ni	Co	Cr
Cu	1					
Pb	0,650**	1				
Zn	0,473*	0,130	1			
Ni	-0,069	-0,290	0,495*	1		
Co	0,046	-0,241	0,517*	0,568**	1	
Cr	0,013	0,218	0,421	0,528*	0,262	1

** La correlación es significativa al nivel 0,01

* La correlación es significativa al nivel 0,05

Tabla 16. Correlación entre metales pesados en concentración Pseudo-Total del suelo.

De la tabla 16 podemos observar que no existe buena correlación entre los metales pesados en concentración Pseudo-total del suelo, solo podemos presenciar una correlación regular, las cuales son (Pb/Cu), (Co/Zn), (Co/Ni), (Cr/Ni), seguida de una correlación mala entre (Zn/Cu), (Ni/Pb), (Ni/Zn), (Cr/Zn), (Cr/Co) y terminando con una nula correlación de parte de (Ni/Cu), (Co/Cu), (Cr/Cu), (Zn/Pb), (Co/Pb) y (Cr/Pb).

Del Anexo II, Tabla Anexo 3, podemos ver la correlación y el tipo de ésta en forma descendiente entre los diversos metales pesados en concentraciones Pseudo-Total del suelo de la comuna de Talcahuano.

	Cu	Pb	Zn	Ni	Co	Cr
Cu	1					
Pb	0,833**	1				
Zn	0,195	0,388	1			
Ni	0,222	0,369	0,369	1		
Co	0,069	0,267	0,922**	0,362	1	
Cr	0,222	0,369	0,369	1**	0,362	1

** La correlación es significativa al nivel 0,01

Tabla 17. Correlación entre metales pesados en concentraciones Biodisponible del suelo.

De la tabla 17 podemos observar que existe buena correlación entre los metales pesados en concentración biodisponible del suelo, podemos presenciar una correlación perfecta entre (Cr/Ni), seguida de una correlación buena entre (Pb/Cu), (Co/Zn), continuando con una correlación mala entre (Zn/Pb), (Ni/Pb), (Co/Pb), (Cr/Pb), (Ni/Zn), (Cr/Zn), (Co/Ni), (Cr/Co) y terminando con una nula correlación de parte de (Zn/Cu), (Ni/Cu), (Co/Cu), (Cr/Cu).

Del Anexo II, Tabla Anexo 4, podemos ver la correlación y el tipo de ésta en forma descendiente entre los diversos metales pesados en correlación biodisponible del suelo de la comuna de Talcahuano.

	Cu-Pseudo	Pb-Pseudo	Zn-Pseudo	Ni-Pseudo	Co-Pseudo	Cr-Pseudo
Cu-Bio	0,674**	0,653**	0,137	-0,349	-0,005	-0,101
Pb-Bio	0,591**	0,812**	0,048	-0,516*	-0,202	-0,006
Zn-Bio	-0,022	0,119	-0,04	-0,261	-0,045	0,023
Ni-Bio	0	0,111	-0,074	-0,34	-0,067	-0,267
Co-Bio	-0,118	0,023	0,097	-0,124	0,049	0,182
Cr-Bio	0	0,111	-0,074	-0,340	-0,067	0

** La correlación es significativa al nivel 0,01

* La correlación es significativa al nivel 0,05

Tabla 18. Correlación entre metales pesados en concentraciones Pseudo-Total y Biodisponible del suelo.

En la tabla 18 se puede ver la correlación entre metales pesados Cu, Pb, Zn, Ni, Co y Cr Pseudo-Total y Biodisponible del suelo

Del Anexo II, Tabla Anexo 5, podemos ver en forma resumida la correlación entre los metales pesados en concentración Pseudo-total y Biodisponible del suelo, la cual se puede observar que hay una buena correlación entre Pb-Bio/Pb-Pseudo, también existe una correlación regular en 4 parámetros, y 5 parámetros dieron una correlación mala y el mayor porcentaje se lo adjunta a los 26 parámetros restantes, los cuales no presentan ningún tipo de correlación, siendo los que menos correlación tienen Ni-Bio/Cu-Pseudo y Cr-Bio/Cu-Pseudo con 0 respectivamente.

	pH	C.O	Arena	Limo	Arcilla
Cu-Pseudo	0,181	-0,334	-0,349	0,351	0,173
Pb-Pseudo	-0,221	-0,272	-0,249	0,264	0,038
Zn-Pseudo	0,09	-0,436*	-0,127	0,093	0,342
Ni-Pseudo	0,124	-0,013	-0,025	0,002	0,315
Co-Pseudo	0,229	-0,279	-0,330	0,293	0,497*
Cr-Pseudo	-0,351	-0,043	0,067	-0,071	0,071

* La correlación es significativa al nivel 0,05

Tabla 19. Correlación entre metales pesados en concentraciones Pseudo-Total y las propiedades edafológicas.

En la tabla 19 se puede ver la correlación entre metales pesados en concentraciones pseudo-total del suelo y las propiedades edafológicas.

Del Anexo II, Tabla Anexo 6, podemos ver en forma resumida la correlación entre los metales pesados en concentración Pseudo- total del suelo y propiedades edafológicas, la cual se puede ver que hay una mala correlación entre 14 elementos mayoritariamente entre metales pesados con C.O y granulometría, seguido de una nula correlación entre 16 elementos, mayoritariamente entre granulometría y pH.

	pH	C.O	Arena	Limo	Arcilla
Cu-Bio	0,153	-0,195	-0,451*	0,475*	0,206
Pb-Bio	-0,143	-0,222	-0,16	0,192	-0,063
Zn-Bio	-0,192	0,058	-0,012	0,039	-0,046
Ni-Bio	0,037	-0,258	0	-0,037	0,185
Co-Bio	-0,342	0,082	0,149	-0,143	-0,1
Cr-Bio	0,037	-0,258	0,000	-0,037	0,185

* La correlación es significativa al nivel 0,05

Tabla 20. Correlación entre metales pesados en concentración Biodisponible del suelo y las propiedades edafológicas.

En la tabla 20 se puede ver la correlación entre pH, C.O, Arena, Limo, Arcilla y metales pesados biodisponible del suelo.

Del Anexo II, Tabla Anexo 7, podemos ver en forma resumida la correlación entre las propiedades del suelo y los metales pesados en concentración biodisponible del suelo , la cual se puede observar que no hay buena correlación. La tabla presenta 5 datos de correlación mala y 25 datos de nula correlación lo cual mayoritariamente es entre metales pesados biodisponibles del suelo con granulometría, C.O y pH.

En forma resumida, una buena correlación existe solo entre los metales biodisponibles del suelos (Tabla 17) . Una mala correlación la presentan los metales biodisponible del suelo y las propiedades edafológicas (Tabla 20) al igual que entre los metales Pseudo-total y biodisponible del suelo (Tabla 18). La correlación entre metales Pseudo-total del suelo (Tabla 16) y la correlación entre metales Pseudo-total del suelo y las propiedades edafológicas (Tabla 19) son casi parejas en una correlación regular, mala y nula.

4.7 Relación entre Metales en concentraciones Biodisponible y Pseudo-total del suelo.

En la tabla 21 se tiene la relación entre cada metal pesado del suelo. Para la clasificación de la relación existente entre los metales pesados, se ocupó la tabla 4 ubicada en la página 13.

Concentración	Cu (PPM)	Pb (PPM)	Zn (PPM)	Ni (PPM)	Co (PPM)	Cr (PPM)
Biodisponible	6,40	4,14	16,99	0,02	0,02	0,00
Pseudo Total	49,00	46,48	130,33	27,48	13,86	18,86
Relación	0,13	0,09	0,13	0,001	0,001	0,000001

Tabla 21. Relación entre las concentraciones de metales pesados biodisponible y Pseudo-Total del suelo.

De ésta tabla, se deduce que en el caso de Cu y Zn la relación que existe entre los metales Pseudo-total y Biodisponible, es pequeña, debido a que su valor se encuentra entre 0,1 y 0,3. Para el caso de los metales pesados Pb, Ni, Co y Cr su relación es nula, debido a su valor cercano a 0. En conclusión todos los metales no tienen buena relación entre sí.

Del Anexo III, Tabla Anexo 8, se tiene la relación entre todos los metales pesados Cu, Pb, Zn, Ni, Co y Cr en concentración pseudo -total y biodisponible del suelo, en conjunto con los 21 maceteros analizados en este proyecto, lo cual nos da mayoritariamente que no hay relación entre éstos. El mayor porcentaje, que incluye Ni, Co, Pb y Cr, muestra que no hay una relación. Para el caso de Zn, en la totalidad de las muestras, da a conocer que existe una relación pequeña de éste metal con los maceteros. Finalmente Cu tiene solo una relación media con PM11, seguida de una relación pequeña en los maceteros CM4, CM5, CM6, CM8, CM10, CM12, PM1, PM2, PM5, PM8 y PM12 y terminando con una nula relación en los maceteros, CM1, CM2, CM3, CM7, PM3 PM4, PM6, PM7, PM10.

4.8 Línea Base

La serie de datos para establecer los valores de fondo han sido otorgados por Tume et al, 2013, los cuales son:

	Co (mg/Kg)	Cr (mg/Kg)	Cu (mg/Kg)	Ni (mg/Kg)	Pb (mg/Kg)	Zn (mg/Kg)
Valores de Fondo	95,91	208,48	43,7	90,47	17,5	91,7

Tabla 22. Valores de fondo para los metales pesados.

Estos valores sirven para determinar qué elementos se encuentran contaminados al sobrepasar estos límites.

4.8.1 Análisis valores de fondo para metales pesados en concentración Pseudo-Total del suelo.

El Anexo I, Tabla Anexo 1, muestra los maceteros que superaron los valores de fondo y los metales pesados en concentración Pseudo-Total del suelo que lo hicieron ,Cu, Pb y Zn. Los metales Ni, Co y Cr no superaron estos valores.

Los valores más altos los contienen, CM1 con un Zn de 140 mg/Kg, CM10 con un Cu de 86 mg/Kg y un Pb de 134 mg/Kg, PM2 con un Zn de 139 mg/Kg, PM10 con un Cu de 79 mg/Kg y un Pb de 94 mg/Kg y finalmente PM11 con un Pb de 58 mg/Kg, valores muy por encima de la media de estos metales pesados.

Para el caso de CM1 y PM2 son maceteros con suelo superficial (0 a 10 cm) el cual puede dar a entender que tiene una mayor exposición a la contaminación del terreno. El metal que tiene mayor valor sobre la línea base es el Zn. Este metal se encuentra mayoritariamente en agua potable (Sobre todo si ésta se almacena en tanques de metal) e inducido por actividades industriales (Unesco, 2012). El terreno donde se sacó el suelo se encuentra cerca de sectores contaminados por siderurgicas, astilleros (5 Km) , entre otros y está emplazado en un sector donde hay regadíos diarios de agua potable, por las plantas que se encuentran a su alrededor.

Para CM10, PM10 Y PM11 son maceteros con suelo más profundo (10 a 20 cm). Los metales con mayor valores sobre la línea base son Cu y Pb. En el caso de Pb lo encontramos en las emisiones de los vehículos por ser un aditivo de la gasolina, lo cual es coherente, debido a que en ese sector opera un estacionamiento de vehículos y aledaño están las vías principales camino a Talcahuano, donde pasa el transporte tanto particular como colectivo. Una de las fuentes antropogénicas del Cu son la corrosión de los materiales de construcción de aleación de cobre, como los cables eléctricos y tuberías, encontrándose estos desechos cerca del sitio de extracción de la muestra (Codelco, 2014).

4.8.2 Análisis valores de fondo para metales pesados en concentración Biodisponible del suelo.

El Anexo I, Tabla Anexo 2, muestra el único macetero que superó el valor de fondo solamente en el metal pesado Pb y los demás maceteros no superaron los valores de fondo establecidos para los metales Co, Cr, Cu, Ni y Zn

Para el caso de CM10 éste fue el único macetero que superó el valor de fondo establecido para Pb con un valor de 20,15 mg/Kg. Este macetero posee suelo de profundidad Sub Soil (10 a 20cm). El metal pesado Pb se encuentra en las emisiones de los vehículos por ser un aditivo de la gasolina, lo cual es coherente, debido a que en ese sector opera un estacionamiento de vehículos y aledaño están las vías principales camino a Talcahuano, donde pasa el transporte tanto particular como colectivo (Unesco, 2012).

4.9 Índices de contaminación

4.9.1 Índice de Geo - acumulación (I_{Geo})

4.9.2 Índice de Geo - acumulación para metales pesados en concentración Pseudo-Total del suelo.

La determinación y el desglose de éste índice en los 21 maceteros, se encuentra en el Anexo IV, Tabla Anexo 9 y clasificados según la tabla 5 que se ubica en la página 14.

	Estadísticos												
	Media	Moda	Mediana	SD ¹	CV ² (%)	AS ³	Curtosis	Min	Max	Percentiles			
										25	50	75	95
Cu	-0,45	-0,48	-0,48	0,28	-62,08	1,93	4,3	-0,83	0,39	-0,61	-0,48	-0,42	0,38
Pb	0,71	0,46	0,61	0,52	73,19	2,1	4,7	0,19	2,35	0,37	0,61	0,79	2,3
Zn	-0,08	-0,06	-0,08	0,06	-75,95	-0,25	-0,55	-0,2	0,03	-0,13	-0,08	-0,04	0,03
Ni	-2,3	-2,28	-2,28	0,08	-3,48	-0,03	-0,28	-2,4	-2,13	-2,35	-2,28	-2,25	-2,14
Co	-3,37	-3,36	-3,36	0,06	-1,78	-0,2	0,13	-3,47	-3,26	-3,42	-3,36	-3,36	-3,26
Cr	-4,05	-4,04	-4,04	0,1	-2,47	0,92	1,58	-4,2	-3,77	-4,12	-4,04	-4,01	-3,78

¹Desviación Estándar

² Coeficiente de variación

³ Asimetría

Tabla 23. Propiedades Estadísticas del Índice de Geo-acumulación para metales pesados en concentración Pseudo-Total del suelo.

De la tabla 23 se tiene los parámetros estadísticos de éste índice, de los cuales se puede ver, según su media, que los metales Cu, Zn, Ni, Co y Cr no se encuentran contaminados, por otra parte el suelo pasa de no estar contaminado a moderadamente contaminado por el metal pesado Pb.

Para los parámetros de la distribución normal, curtosis y asimetría, al trabajar con una muestra, su rango corresponde a 1 y -1, por lo cual el metal pesado Co se distribuye de manera normal.

Los metales pesados Pb y Cu tienen un mayor rango intercuartilico (2,16mg/Kg, 1,22 mg/Kg, respectivamente), debido a la gran longitud que existe entre sus valores máximos y mínimos de concentración.

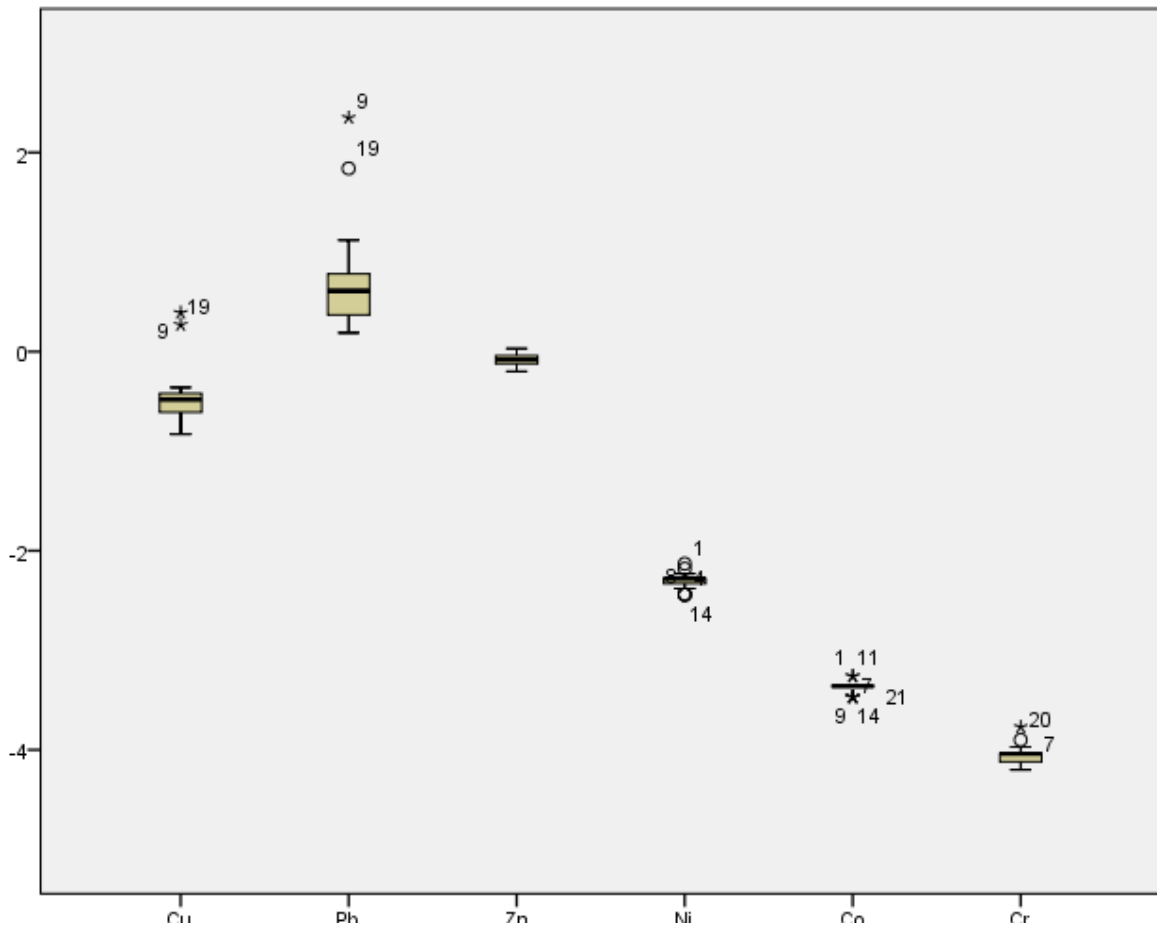


Figura 71. Gráficos de Box Plot de todos los metales pesados en concentración Pseudo-Total del suelo.

De la figura 71, se tienen los metales pesados en concentración pseudo-total del suelo con sus respectivos Box Plot, de los cuales se puede ver que los metales Cr, Co, Ni, Cu y Zn no se encuentran contaminados, de estos dos ultimo metales, las muestras CM1, CM10, PM2 y PM10, salen de la clasificación de "No contaminado". Por otro lado, el suelo pasa de no estar contaminado a estar moderadamente contaminado, en gran porcentaje por Pb y levemente por Cu y Zn. Los suelos que están moderadamente contaminado son los maceteros PM10 y PM11 con altos niveles de Igeo en Pb. 1,84 y 1,12 respectivamente. Finalmente el suelo pasa de moderado a severamente contaminado es el que se ubica en Pb, CM10 con un Igeo de 2,35.

4.9.3 Índice de Geo - acumulación para metales pesados en concentración Biodisponible del suelo.

La determinación y el desglose de éste índice en los 21 maceteros, se encuentra en el Anexo IV, Tabla Anexo 10 y clasificados según la tabla 5 que se ubica en la página 14.

	Estadísticos												
	Media	Moda	Mediana	SD ¹	CV ² (%)	AS ³	Curtosis	Min	Max	Percentiles			
										25	50	75	95
Cu	-3,58	-3,76	-3,76	0,69	-19,27	2,3	5,7	-4,38	-1,36	-3,94	-3,76	-3,5	-1,43
Pb	-3,04	-3,55	-3,21	0,89	-29,28	1,98	4,04	-4,02	-0,38	-3,6	-3,21	-2,8	-0,44
Zn	-3,02	-3,08	-3,03	0,1	-3,31	0,08	-0,67	-3,23	-2,84	-3,1	-3,03	-2,9	-2,8
Ni	-12,97	-13,03	-12,97	0,1	-0,77	0,11	-0,72	-13,17	-12,78	-13,05	-12,97	-12,88	-12,78
Co	-13,05	-13,11	-13,06	0,1	-0,77	0,11	-0,65	-13,26	-12,87	-13,13	-13,06	-12,97	-12,87
Cr	-24,14	-24,20	-24,14	0,1	-0,41	0,11	-0,72	-24,34	-23,95	-24,22	-24,14	-24,05	-23,95

¹Desviación Estándar

² Coeficiente de variación

³ Asimetría

Tabla 24. Propiedades Estadísticas del Índice de Geo-acumulación para metales pesados en concentración Biodisponible del suelo.

De la tabla 24 se tiene los parámetros estadísticos de éste índice, de los cuales se puede ver, según su media, que la totalidad de los metales Cu, Zn, Ni, Co, Cr y Pb, no se encuentran contaminados.

Para los parámetros de la distribución normal, curtosis y asimetría, al trabajar con una muestra, su rango corresponde a 1 y -1, por lo cual los metales pesados Zn, Ni, Co y Cr se distribuye de manera normal.

Los metales pesados Pb y Cu tienen un mayor rango intercuartilico (3,64mg/Kg, 3,02 mg/Kg, respectivamente), debido a la gran longitud que existe entre sus valores máximos y mínimos de concentración.

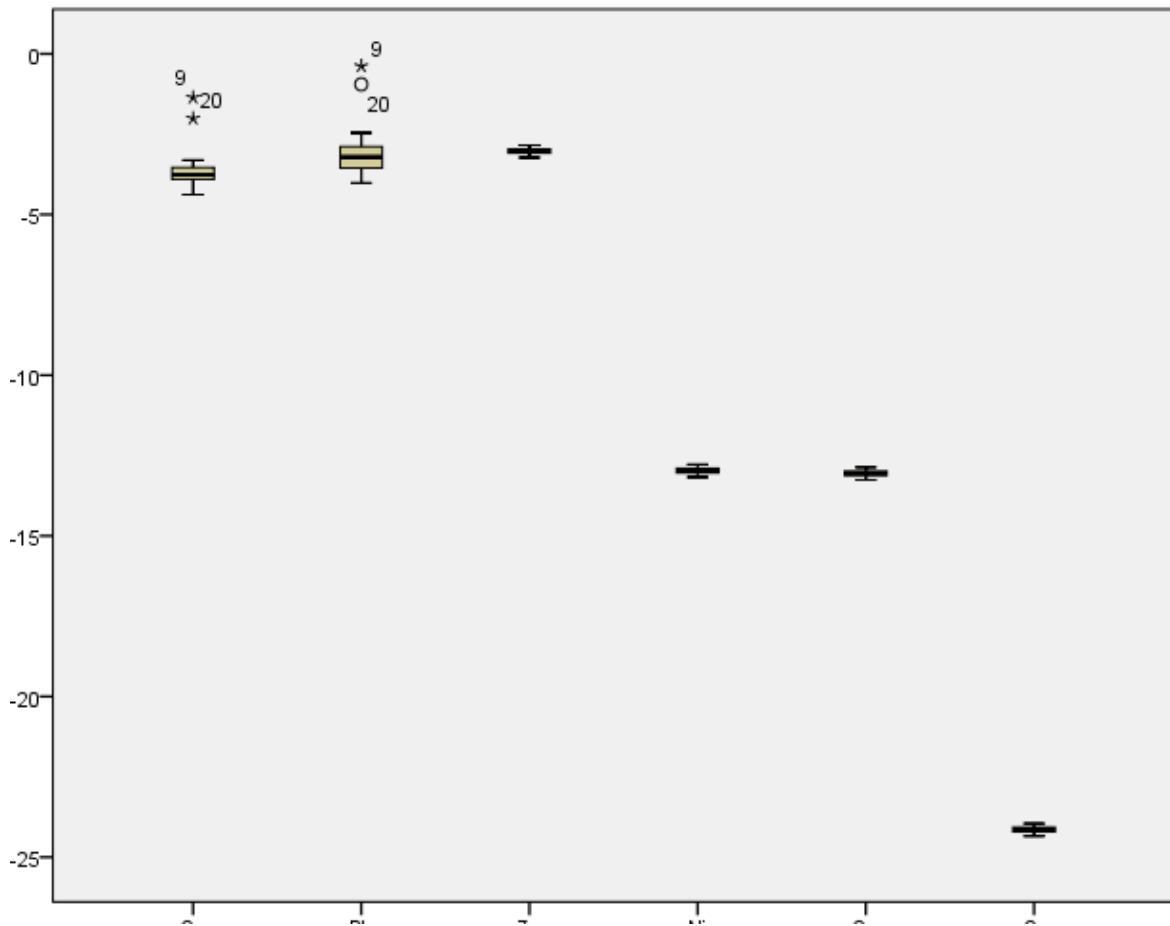


Figura 72. Gráficos de Box Plot del Índice de Geo-acumulación de todos los metales pesados en concentración Biodisponible del suelo.

De la figura 72, se tienen los metales pesados Biodisponible del suelo con sus respectivos Box Plot, de los cuales se puede visualizar lo dicho anteriormente, que todos estos, no se encuentran contaminados y tienen una distribución normal.

4.9.4 Índice integrado de Contaminación (IPI)

4.9.5 Índice integrado de contaminación para los maceteros con metales pesados en concentración Pseudo-Total del suelo.

De la Tabla Anexo 11, del Anexo IV, se tiene el cálculo del índice integrado de contaminación y se puede ver que solo algunos maceteros muestran niveles iguales a 1, lo

cual quiere decir que poseen un leve nivel de contaminación. Estos datos corresponden a los maceteros CM1, CM10, CM12, PM5, PM6, PM8, PM10 Y PM11.

A pesar de que este terreno se encuentre cerca de fuente de emisión de contaminación, es un sitio considerado como un lugar de esparcimiento, donde se está constantemente en mantención de parte de trabajadores o en cuidados de personas del sector, por eso su índice integrado de contaminación, se considera como suelo limpio.

4.9.6 Índice integrado de contaminación para los maceteros con metales pesados en concentración Biodisponible del suelo.

Del Anexo IV, Tabla Anexo 12, se tiene la tabla con el cálculo del índice integrado de contaminación y analizada según tabla 7 ubicada en la página 16.

En este caso, todos los maceteros nos dieron índices integrado de contaminación igual a 0, por lo tanto, el nivel del suelo es limpio.

Como todos índices son iguales a 0, no se puede realizar un análisis estadístico, debido a su nulo conjunto de datos. (Véase Anexo IV, Tabla Anexo 12).

4.9.7 Factor de Enriquecimiento

Del Anexo IV, Tabla Anexo 13, se tiene la tabla con el cálculo del factor de enriquecimiento y analizada según tabla 6 ubicada en la página 15. En este punto, solo se calculará el factor de enriquecimiento para concentraciones Pseudo-Total del suelo, debido a que el Al, no se encuentra en la concentración Biodisponible del suelo

	Estadísticos										Percentiles			
	Media	Moda	Mediana	SD ¹	CV ² (%)	AS ³	Curtosis	Min	Max					
										25	50	75	95	
Cu	5	5	5	1,3	26	2,1	4,6	4	9	4	5	5	8,9	
Pb	11,7	8	10	6,1	52,1	2,9	9,7	8	34	8	10	12	32,8	
Zn	6,3	6	6	0,6	9,5	1,9	3,2	6	8	6	6	6,5	7,9	
Ni	1,1	1	1	0,2	18,2	4,6	21	1	2	1	1	1	1,9	
Co	1	1	1	0	0	-	-	1	1	1	1	1	1	
Cr	0	0	0	0	0	-	-	0	0	0	0	0	0	

¹Desviación Estándar

² Coeficiente de variación

³ Asimetría

Tabla 25. Factor de enriquecimiento del suelo.

De la tabla 25, se puede ver , según su media, que los metales Ni, Co y Cr presentan una diferencia de enriquecimiento mínimo y los metales Cu, Zn y Pb tienen un enriquecimiento significativo.

El metal pesados Pb tiene un mayor rango intercuartilico (26mg/Kg) , debido a la gran longitud que existe entre sus valores máximos y mínimos de concentración.

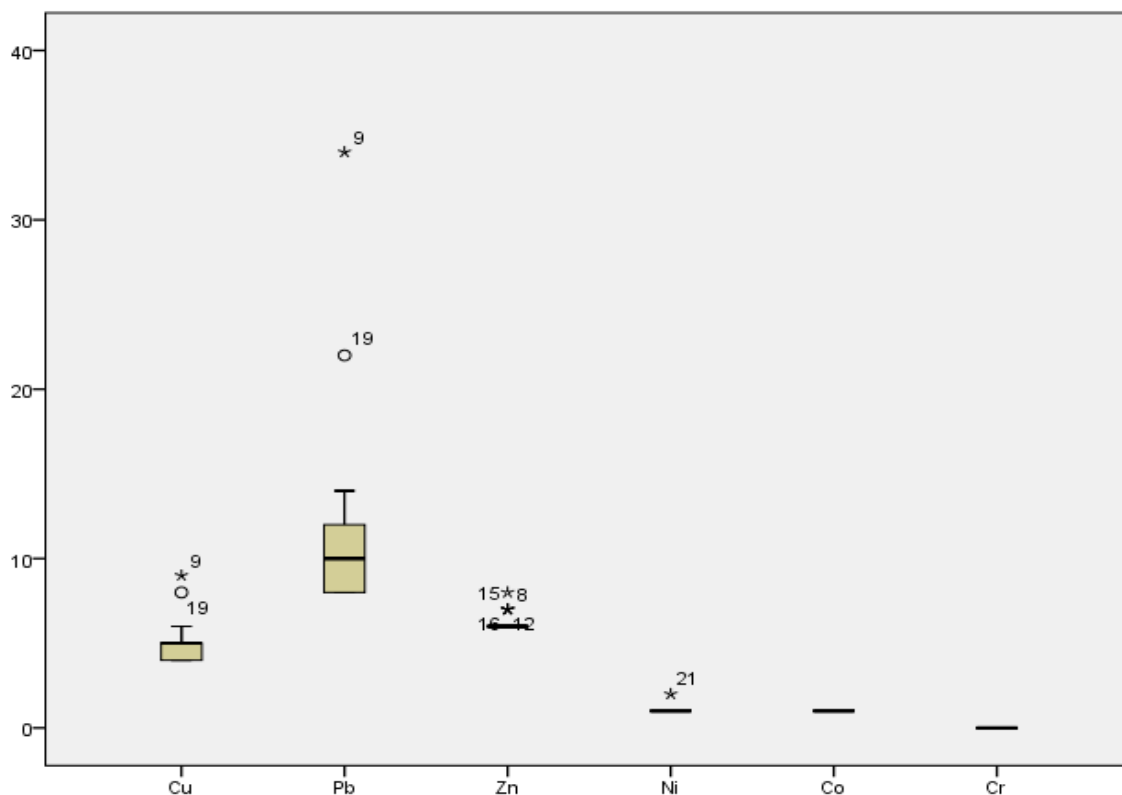


Figura 73. Gráficos de Box Plot para el factor de enriquecimiento para metales pesados en concentración Pseudo-total del suelo.

De la figura 73, en conjunto con la Tabla Anexo 13, del Anexo IV, se puede ver que los factores de enriquecimiento para los metales Ni (Excepto PM12), Co y Cr, son muy bajos con respecto a Cu, Pb y Zn, por lo tanto, el origen de éstos metales son producto de la roca madre o fuentes naturales.

Respecto a Cu (Excepto CM10, PM10 y PM12) y Ni , solamente con la muestra PM12, presentan un factor de enriquecimiento moderado.

Para el caso de Cu con CM10, PM10 y PM12, en Zn y Pb (Excepto CM10 y PM10), el factor de enriquecimiento de estos metales presenta un enriquecimiento significativo, debido a la presencia de valores superiores a 5 y menor a 20.

Finalmente los únicos metales pesados que muestran valores de factor de enriquecimiento superior a 20, es Pb con las muestras CM10 y PM10, teniendo estos un factor de enriquecimiento muy alto, por tanto, el suelo de estas muestras se encuentra enriquecido por fuentes antrópicas.

Lo explicado anteriormente sobre el factor de enriquecimiento, se encuentra resumido en un gráfico en el Anexo IV, Figura 84.

4.10 Fitoextracción

En este punto se analizará los dos tipos de plantas, las cuales son: *Lolium Perenne* ó Césped y *Salicornia* ó Espárrago de Mar, en conjunto con el suelo sacado de la comuna de Talcahuano, para ver si éstas cumplen con las condiciones para ser consideradas como plantas Hiperacumuladoras. Cabe destacar que del total de las 21 muestras de maceteros en conjunto con éstas plantas, crecieron solo 11 de éstas. En el caso de las salicornias solo creció un conjunto de éstas en la macetero CM7 y en los demás maceteros distribuidos en la tabla 3, no crecieron o creció muy poco para un análisis de digestión. En el caso de *lolium perenne* ésta creció en los maceteros CM2, CM3, CM4, CM5, CM6, PM1, PM2, PM3, PM7, PM8.

Los metales pesados encontrados tanto en la parte aérea raíz y suelo son: Zn, Cu, Cr, Ni, Pb, los cuales se utilizarán para este análisis.

Para el análisis de la fitoextracción, cabe destacar que la concentración de metales pesados del suelo que se debe analizar es la Biodisponible, pero como este proyecto es con fines de comparación, lo realizaremos con los metales pesados tanto Pseudo-Total como Biodisponibles, para así analizar de forma completa los resultados obtenidos.

4.10.1 Fitoextracción con Lolium Perenne ó Césped

4.10.1.1 Acumulación de metales pesados.

Los maceteros en los cuales finalmente creció la planta Lolium Perenne son CM2, CM3, CM4, CM5, CM6, PM1, PM2, PM3, PM7, PM8, los cuales se analizará los metales pesados en su parte aérea, raíz y suelo que tienen, para ver si se clasifica como planta hiperacumuladora.

Acumulación de metales pesados Pseudo-total y Biodisponible del suelo en Lolium Perenne ó Césped.

Metal	Partes de la planta	CM2	CM3	CM4	CM5	CM6	PM1	PM2	PM3	PM7	PM8
		[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]
Zn	Raíz	3836,882	162,093	179,579	120,879	111,85	85,5	87,1	164	123,3	108
	Parte aérea	108,492	70,4	74,14	98,061	76,979	71	86,3	103	61,2	59,7
	Suelo Pseudo-Total	132	129	124	129	128	127	139	120	134	132
	Suelo Biodisponible	14,7	17,57	17,72	19,24	15,98	17,02	16,86	15,5	16,28	16,43
Cu	Raíz	396,603	46,347	72,149	32,596	36,382	15,3	15,6	28	35,2	19,7
	Parte aérea	26,719	12,86	23,725	20,9	16,953	17,1	17,8	21	15,2	17,1
	Suelo Pseudo-Total	47	42	47	47	45	43	43	39	50	51
	Suelo Biodisponible	4,17	4,14	6,61	5,63	4,53	5,46	4,52	3,77	4,82	6,34
Pb	Raíz	24,108	13,003	28,946	14,702	14,684	3,8	3,8	4,7	6,7	1,7
	Parte aérea	9,768	ND	6,969	5,086	4,948	3,9	4,5	ND	5,1	ND
	Suelo Pseudo-Total	36	32	43	34	36	33	31	36	34	49
	Suelo Biodisponible	1,62	2,1	4,24	2,89	2,24	2,48	1,9	1,91	2,3	4,79
Cr	Raíz	12,602	ND	14,833	12,177	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	Parte aérea	ND	ND	3,707	12,873	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	Suelo Pseudo-Total	20	19	17	19	18	18	18	18	18	19
	Suelo Biodisponible	0,00002	0,00001	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002	0,00002
Ni	Raíz	8,062	3,35	4,176	3,044	2,557	ND	ND	0,4	0,4	0,5
	Parte aérea	3,39	ND	ND	ND	2,677	0,7	ND	ND	ND	ND
	Suelo Pseudo-Total	30	29	25	28	27	27	28	29	28	26
	Suelo Biodisponible	0,38	0,44	0,43	0,45	0,42	0,35	0,4	0,39	0,44	0,42

ND: No detectado

Tabla 26. Concentraciones de Zn, Cu, Pb, Cr y Ni en Lolium Perenne en los maceteros CM2, CM3, CM4, CM5, CM6, PM1, PM2, PM3, PM7, PM8.

De la tabla 26 se puede ver que de un total de 3945,374 mg/Kg de Zn en CM2 , el mayor porcentaje de éste metal absorbido por la planta. lo hizo la raíz con 3836,88 mg/Kg y solo un 108,492 mg/Kg su parte aérea u hojas, lo cual es un valor muy alto del promedio calculado. Ésta tendencia se ve en todos los maceteros, los cuales su mayor absorción de Zn se ven reflejados en la raíces más que en la parte aérea. Los maceteros con menor concentración de Zn en su raíz fueron PM1 y PM2 en el cual en este último sus concentraciones absorbidas por ambas partes de la planta (raíz y hojas) son prácticamente iguales (87,1 mg/Kg en su raíz y 86,3 mg/Kg en su parte aérea).

En el caso de Cu, su mayor contenido está acumulado en la raíz de la planta lolium perenne ubicada en CM2 con 396,603 mg/Kg, siendo este valor casi 15 veces superior al absorbido por su parte aérea (26,719 mg/Kg). Para PM1 y PM2 la mayor acumulación del contenido de Cu, se encuentra en la parte aérea que en la raíz, siendo los valores, de ambas partes, muy similares entre sí. Para el caso de PM1 la raíz tiene acumulado 15,3 mg/Kg y la parte aérea tiene acumulado 17,1 mg/Kg y PM2 en su raíz tiene acumulado 15,6 mg/Kg y en su parte aérea tiene acumulado 17,8 mg/Kg.

La mayor acumulación de Pb la tiene la raíz de lolium perenne ubicada en CM4 el cual tiene 28,946 mg/Kg, seguida de CM2 con una acumulación de este metal en la raíz de 24,108 mg/Kg. En los maceteros PM1 y PM2 la acumulación de Pb es mayor en su parte aérea que en la raíz. Este metal no se encontró acumulado en la parte aérea de CM3, PM3 y PM8, pero si fue encontrado en la raíz de lolium perenne ubicada en estos maceteros.

En el caso del metal pesado Cr, solamente en los maceteros CM4 y CM5 se encontraron acumulaciones tanto en la raíz como en la parte aérea. En CM4 el mayor contenido de Cr ha sido acumulado por la raíz con 14,833 mg/Kg y en CM5 el mayor contenido de Cr ha sido acumulado por la parte aérea con 12,873 mg/Kg. En el macetero CM2 se encontró acumulación de éste metal solamente en la raíz con 12,602 mg/Kg, en el caso de su parte aérea el metal no ha sido detectado. Para el caso de los maceteros CM3, CM6, PM1, PM2, PM3, PM7 y PM8 no se detectó la acumulación de este metal tanto en la raíz como en la parte aérea de la planta.

Finalmente para Ni, se encontraron solo 2 maceteros que acumularon tanto en su raíz y parte aérea éste metal, los cuales son CM2 y CM6, siendo CM2 el que acumuló el mayor contenido de Cu en su raíz con 8,062 mg/Kg y CM6 acumuló más contenido de Cu en su parte aérea con 2,677 mg/Kg. Los maceteros CM3, CM4, CM5, PM3, PM7 y PM8 solo se encontró contenido de este metal acumulado en su raíz y en su parte aérea no se detectó acumulación de Ni. En PM1 solo se encontró acumulación de este metal en la parte aérea y no se detectó acumulación en su raíz. Finalmente en el macetero PM2 no se detectó acumulación del metal ni en su raíz, ni en su parte aérea.

En resumen, el mayor contenido de los metales Zn, Cu y Ni ha sido acumulado por la raíz de Lolium perenne ubicada en el macetero CM2 y el mayor contenido de los metales Pb y Cr han sido acumulado por la raíz de Lolium perenne ubicada en el macetero CM4, lo cual da a entender que la parte de la planta que acumuló el mayor contenido del total de los metales (Zn, Cu, Pb, Cr y Ni) es la raíz de Lolium perenne.

4.10.1.2 Índices de valoración de tolerancia de metales.

En este punto se calculará el Factor de Bioacumulación (BAF) y el Factor de Traslocación (FT) para así determinar si la planta Lolium Perenne actúa como hiperacumuladora, según los parámetros determinados en el punto 2.7 de este proyecto.

1.- Factor de Traslocación (FT)

Los factores de traslocación de Lolium Perenne están calculados en el Anexo V, Tabla Anexo 14, fueron representados gráficamente en la figura 74. Como su cálculo no depende de las concentraciones del suelo, sino de su raíz y parte aérea, no se separó en Pseudo-Total y Biodisponible.

El gran porcentaje del factor de traslocación (80,65%) de la planta Lolium Perenne, dieron menores a 1, lo que indica una baja traslocación y que ésta planta no traslada eficazmente los metales Zn, Cu, Pb, Cr y Ni de la raíz a la parte aérea, teniendo así una mayor concentración de metales retenidos en su raíz que en las hojas y tallo, por lo que su potencial es la de fitoestabilizar metales en sus raíces, para que así se pueda minimizar la migración de los contaminantes en los suelos, ya que los metales pesados acumulados en

las raíces, se consideran relativamente estables en cuanto a su liberación al ambiente se refiere.

Solo un 19,35% de ésta planta actúa como hiperacumuladora al dar un factor de traslocación superior a 1, pero tampoco fueron valores muy elevados (entre 1,03 a 1,18) y los metales que trasladó solo fueron Cu, Pb, Cr y Ni, no la totalidad, por lo cual, esta característica de hiperacumuladora no se considera en su totalidad de la característica.

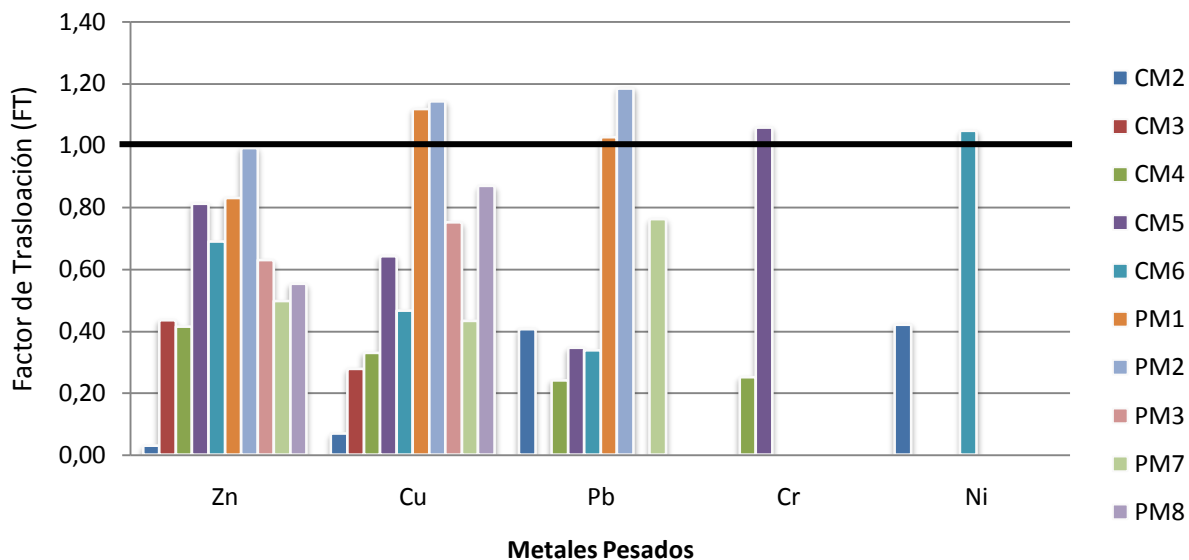


Figura 74. Gráfico del Factor de Traslocación (FT) para Lolium Perenne en los 10 maceteros.

2.- Factor de Bioacumulación (BAF)

Como se dijo en el punto 2.7 de este proyecto, para calcular la capacidad de hiperacumuladora de una planta, se debe verificar, que tanto el factor de bioacumulación en la raíz como en la parte aérea, deben ser mayores a 1, por lo cual, se debe analizar éstas 2 partes de la planta. Como el cálculo de este factor depende de las concentraciones de metales en el suelo, se analizará tanto las Pseudo-total como las Biodisponible.

2.1.- Factor de Bioacumulación en la raíz (RAF) para concentraciones Pseudo-Total del suelo.

Los factores de bioacumulación en la raíz (RAF) para concentraciones Pseudo-Total del suelo, calculados en el Anexo V, Tabla Anexo 15, fueron representados gráficamente en la figura 75.

El mayor porcentaje del factor de traslocación en la raíz para concentraciones Pseudo-Total del suelo, dieron valores menores a 1, lo cual significa que la planta es exclusora y que las mayores concentraciones se mantienen en el suelo, acumulando así, una menor cantidad de metales en la raíz.

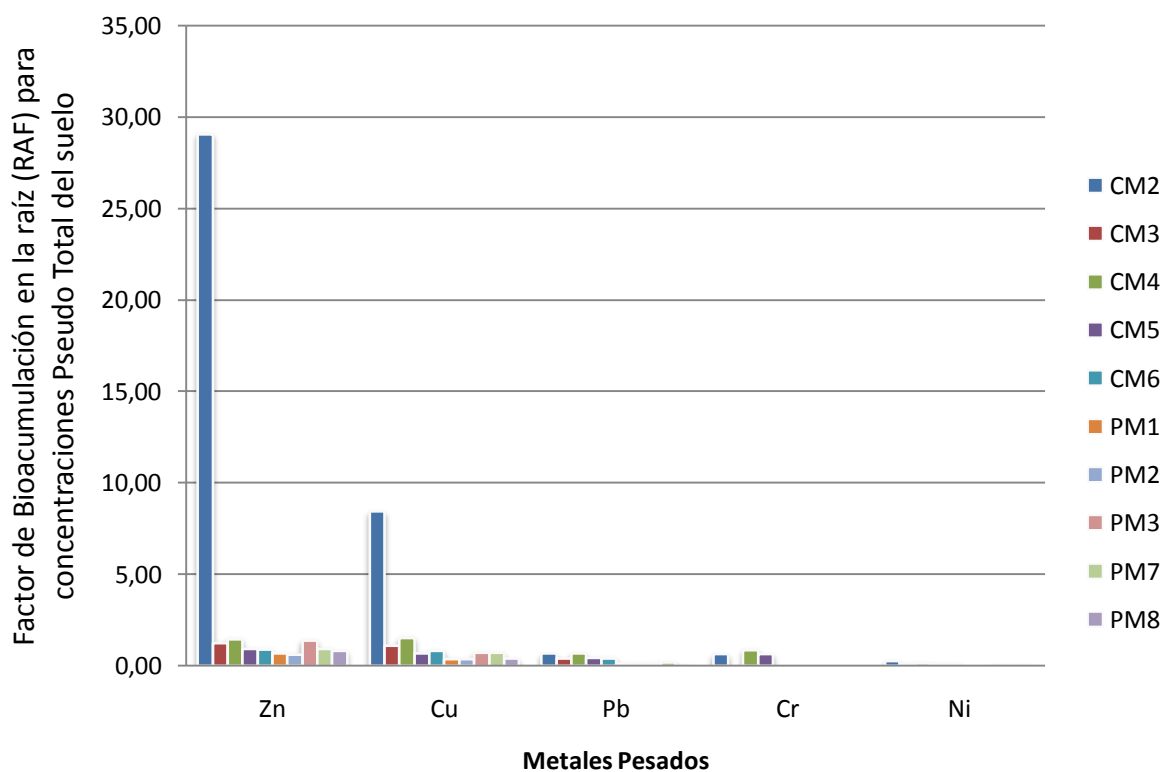


Figura 75. Gráfico del Factor de Bioacumulación en la raíz (RAF) para concentraciones Pseudo-Total del suelo en los 10 maceteros.

2.2.- Factor de Bioacumulación en la raíz (RAF) para concentraciones Biodisponible del suelo.

Los factores de bioacumulación en la raíz (RAF), calculados en el Anexo V, Tabla Anexo 16, fueron representados gráficamente en la figura 76.

El mayor porcentaje del Factor de Bioacumulación en la raíz para concentraciones Biodisponible del suelo, dieron valores mayores a 1 sobre todo para el caso de Zn y Cu, lo cual significa que la planta ha acumulado una mayor concentración de metales pesados en la raíz en relación a los que contiene el suelo.

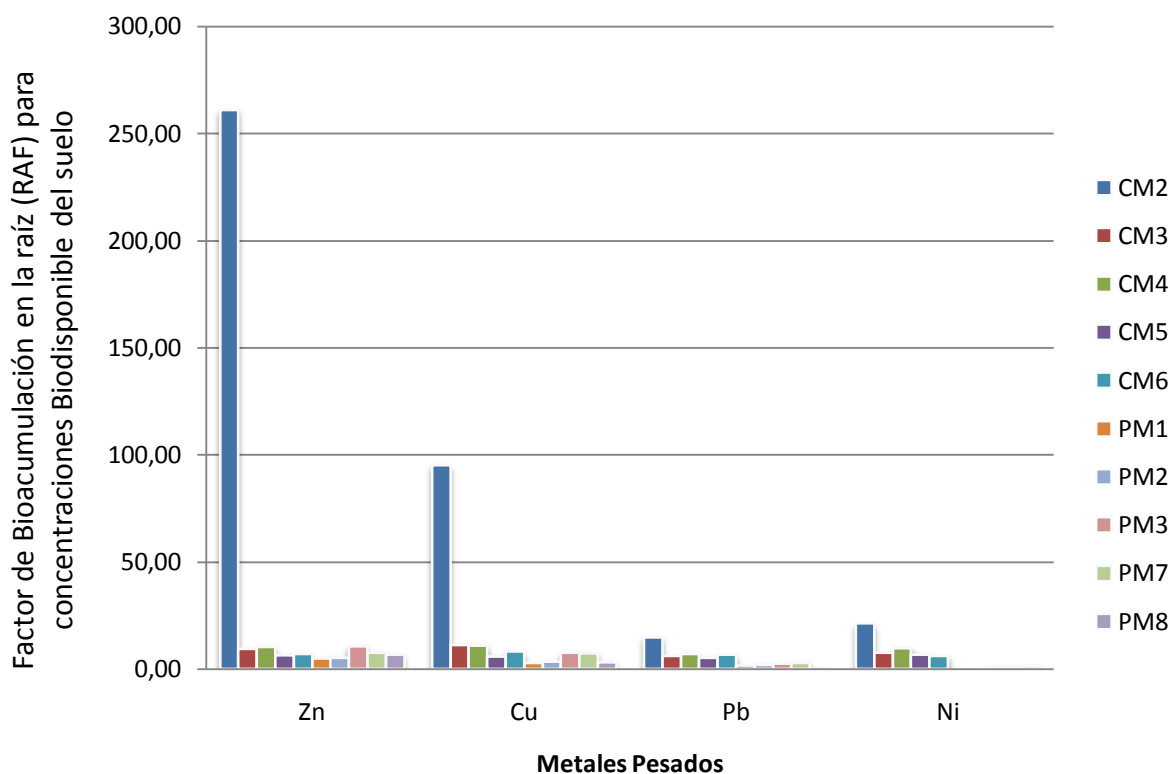


Figura 76. Gráfico del Factor de Bioacumulación en la raíz (RAF) para concentraciones biodisponibles del suelo en los 10 maceteros.

2.3.- Factor de Bioacumulación en parte aérea (SAF) para concentraciones Pseudo-Total del suelo

Los factores de bioacumulación en la parte aérea (SAF) para concentraciones Pseudo-total del suelo, calculados en el Anexo V, Tabla Anexo 17, fueron representados gráficamente en la figura 77.

La totalidad del factor de bioacumulación en la parte aérea para concentraciones Pseudo-Total del suelo dieron valores inferiores a 1, por lo cual significa que la planta es exclusora y que las concentraciones se mantienen en el suelo.

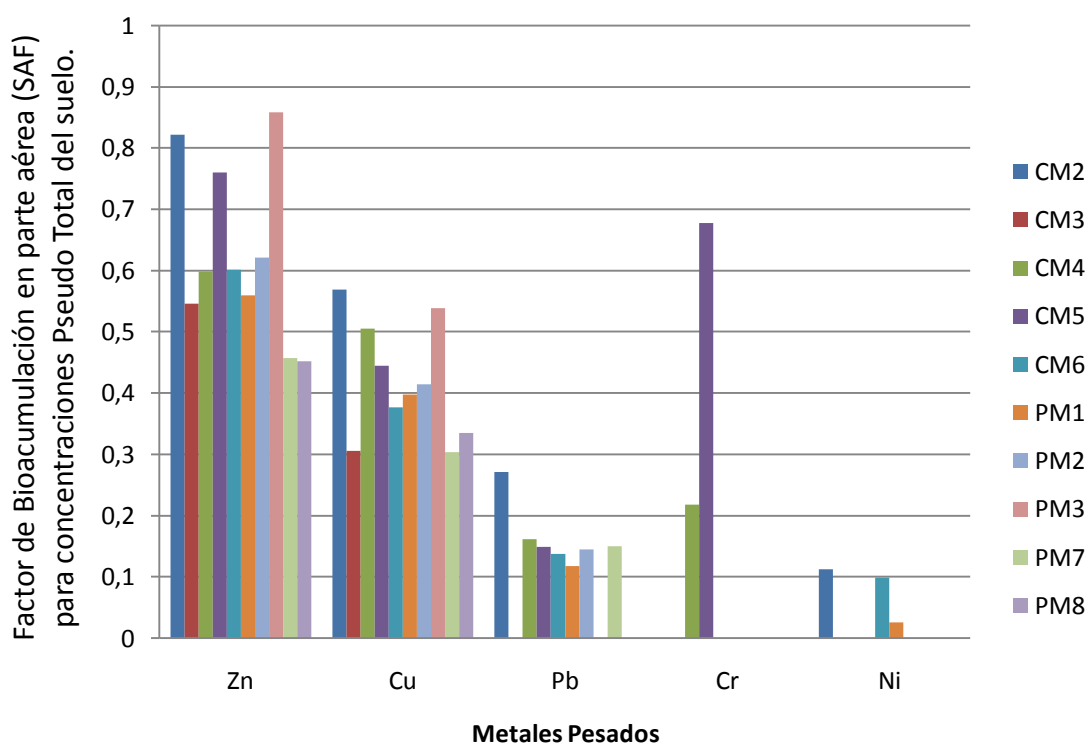


Figura 77. Gráfico del Factor de Bioacumulación en la parte aérea (SAF) para concentraciones Pseudo-Total del suelo en los 10 maceteros.

2.4.- Factor de Bioacumulación en parte aérea (SAF) para concentraciones Biodisponible del suelo

Los factores de bioacumulación en la parte aérea (SAF), calculados en el Anexo V, Tabla Anexo 18, fueron representados gráficamente en la figura 78.

La totalidad del Factor de Bioacumulación en parte aérea (100%) para concentraciones biodisponibles del suelo, dieron valores mayores a 1 en todos los metales, Zn, Cu, Pb y Ni, lo cual significa que la planta ha acumulado el total de las concentraciones de los metales en su parte aérea desde el suelo.

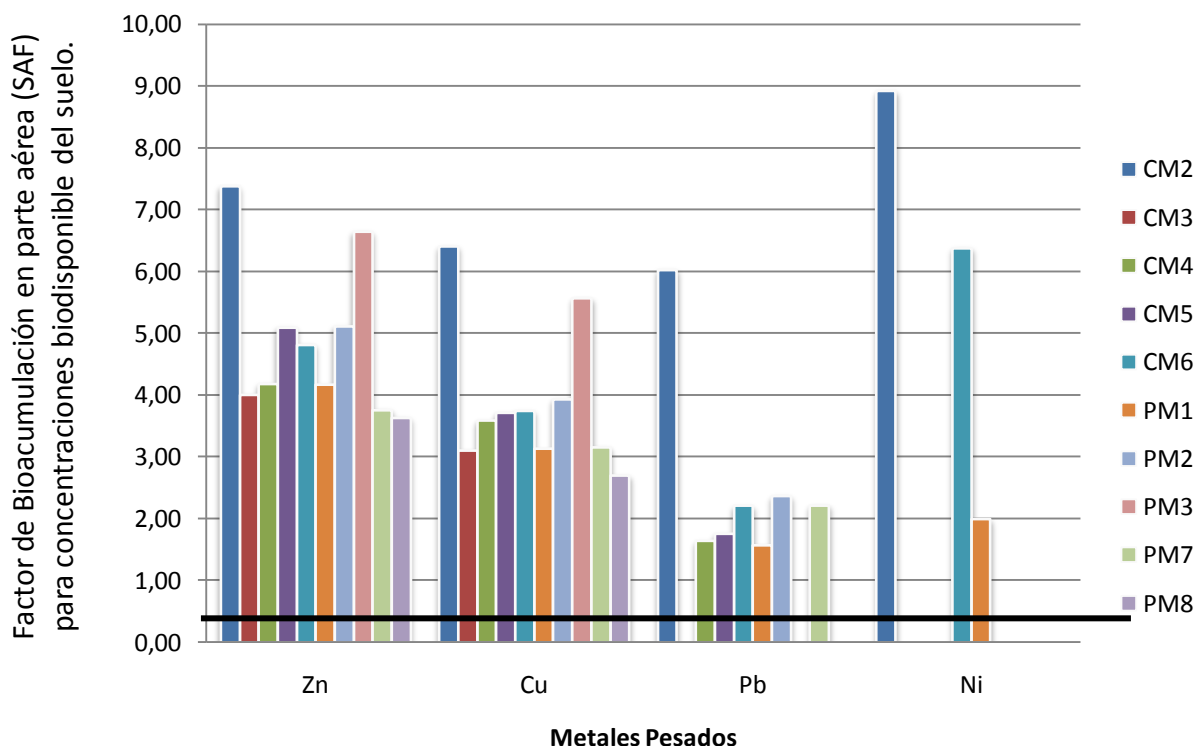


Figura 78. Gráfico del Factor de Bioacumulación en la parte aérea (SAF) para concentraciones biodisponibles del suelo en los 10 maceteros.

En resumen para el caso de RAF para concentraciones Pseudo- total dio valores menores a 1 y para concentraciones Biodisponible dieron valores mayores a 1. En el caso de SAF, para concentraciones Pseudo-Total dieron valores inferiores a 1 y para concentraciones Biodisponibles dieron concentraciones mayores a 1, por lo cual, la planta al utilizar concentraciones Pseudo-Total del suelo, da que ésta, no actúa como hiperacumuladora, sino como exclusora, siendo así, que las mayores concentraciones se mantienen en el suelo, y no en la raíz o en su parte aérea. En caso contrario, la planta al utilizar concentraciones Biodisponibles del suelo, da que ésta, actúa potencialmente como hiperacumuladora, acumulando la mayor concentración de metales pesados tanto en su raíz como en su parte aérea.

4.10.2 Fitoextracción con Salicornia o Espárrago de Mar

El único macetero en el cual creció la planta Salicornia o espárrago de mar es son CM7, la cual se analizará los metales pesados en su parte aérea, raíz y suelo que tienen, para ver si se clasifica como planta hiperacumuladora.

4.10.2.1 Acumulación de metales pesados Pseudo-Total y Biodisponible del Suelo en Salicornia o Espárrago de Mar.

Metal	Parte de la Planta	CM7 [mg/Kg]
Zn	Raíz	83,161
	Parte aérea	91,262
	Suelo Pseudo-Total	121
	Suelo Biodisponible	18,58
Cu	Raíz	14,258
	Parte aérea	31,962
	Suelo Pseudo-Total	39
	Suelo Biodisponible	3,79
Pb	Raíz	ND
	Parte aérea	ND
	Suelo Pseudo-Total	41
	Suelo Biodisponible	2,45
Cr	Raíz	ND
	Parte aérea	7,763
	Suelo Pseudo-Total	23
	Suelo Biodisponible	0,00002
Ni	Raíz	ND
	Parte aérea	ND
	Suelo Pseudo-Total	27
	Suelo Biodisponible	0,4

ND: No Detectado

Tabla 27. Concentraciones de Zn, Cu, Pb, Cr y Ni en Salicornia en el macetero CM7

De la tabla 27, se puede ver que el mayor contenido de metales en orden descendiente Zn > Cu > Cr , se encuentra en la parte aérea de ésta planta. No se encontró el contenido de metales Pb y Ni tanto en su raíz como en su parte aérea. En el caso de Cr solo se encontró este metal en su parte aérea, pero no en su raíz, por ende para los análisis posteriores, solo

se consideraron los metales Zn y Cu, ya que ambos tienen su contenido tanto en la raíz como en la parte aérea de la salicornia.

4.10.2.2 Índices de valoración de tolerancia de metales

En este punto se calculará el Factor de Bioacumulación (BAF) y el Factor de Traslocación (FT) para así determinar si la planta salicornia actúa como hiperacumuladora, según los parámetros determinados en el punto 2.7 de este proyecto.

1.- Factor de Traslocación (FT)

Los factores de traslocación calculados en el Anexo V, Tabla Anexo 19, fueron representados gráficamente en la figura 79. Como su cálculo no depende de las concentraciones del suelo, sino de su raíz y parte aérea, no se separó en Pseudo-Total y Biodisponible.

En el caso de Salicornia el factor de traslocación en ambos metales encontrado en esta planta, dieron valores superiores a 1, dando a entender así, que hay una eficiente traslocación y que la planta traslada eficazmente los metales pesados Zn y Cu de la raíz a la parte aérea, por lo que su potencial es el de hiperacumular metales en su parte aérea, sirviendo así para la fitoextracción, ya que este proceso generalmente requiere la traslocación de metales pesados a la parte cosechable de la planta, es decir, a la parte aérea de ésta.

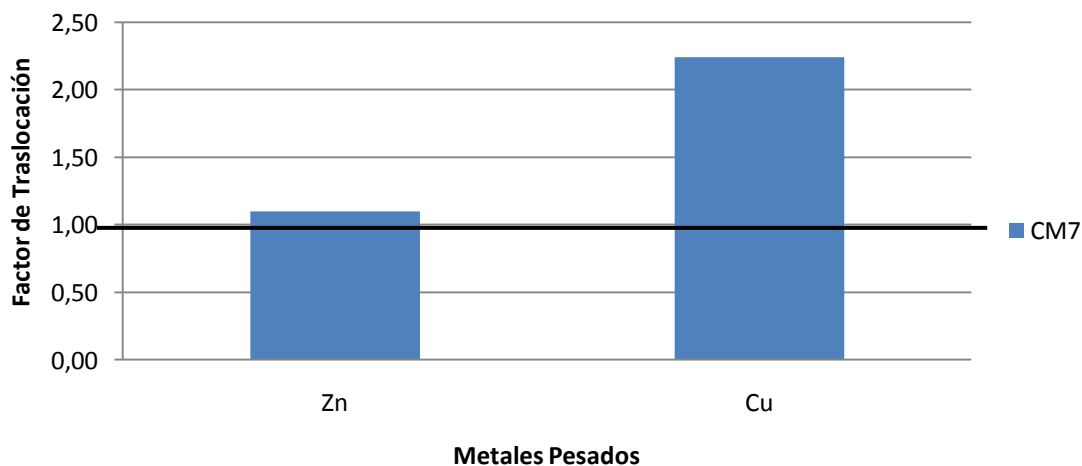


Figura 79. Gráfico del Factor de Traslocación (FT) para Salicornia en CM7.

2.- Factor de Bioacumulación (BAF)

Como se dijo en el punto 2.7 de este proyecto, para calcular la capacidad de hiperacumuladora de una planta, se debe verificar, que tanto el factor de bioacumulación en la raíz como en la parte aérea, deben ser mayores a 1, por lo cual, se debe analizar éstas 2 partes de la planta. Como el cálculo de este factor depende de las concentraciones de metales en el suelo, se analizará tanto las Pseudo-total como las Biodisponible.

2.1.- Factor de Bioacumulación en la raíz (RAF) para concentraciones Pseudo-Total del suelo.

Los factores de bioacumulación en la raíz (RAF) para concentraciones Pseudo-Total del suelo, calculados en el Anexo V, Tabla Anexo 20, fueron representados gráficamente en la figura 80.

El total del Factor de Bioacumulación en la raíz para concentraciones Pseudo-Total del suelo, dieron valores menores a 1 en Zn y Cu, por lo cual significa que la planta es exclusora y que las concentraciones se mantienen en el suelo.

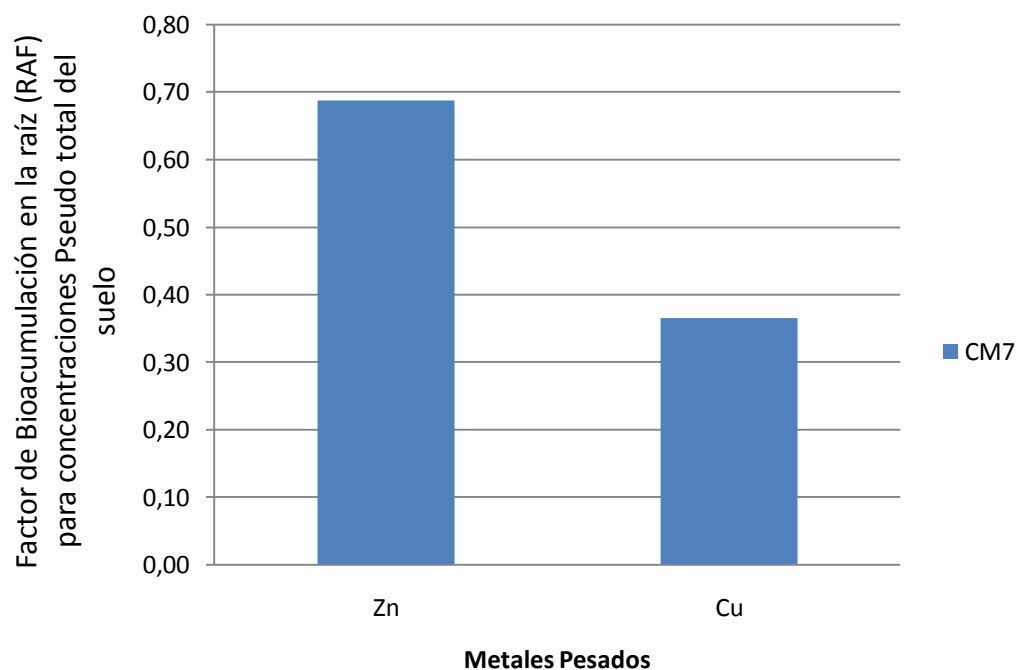


Figura 80. Gráfico del Factor de Bioacumulación en la raíz (RAF) para concentraciones Pseudo-Total del suelo en CM7.

2.2.- Factor de Bioacumulación en la raíz (RAF) para concentraciones Biodisponible del suelo.

Los factores de bioacumulación en la raíz (RAF), calculados en el Anexo V, Tabla Anexo 21, fueron representados gráficamente en la figura 81.

La totalidad del Factor de Bioacumulación en la raíz (100%) para concentraciones biodisponible del suelo, dieron valores mayores a 1 en Zn y Cu, lo cual significa que la planta ha acumulado el total de las concentraciones de los metales en su parte aérea con relación a su concentración del suelo.

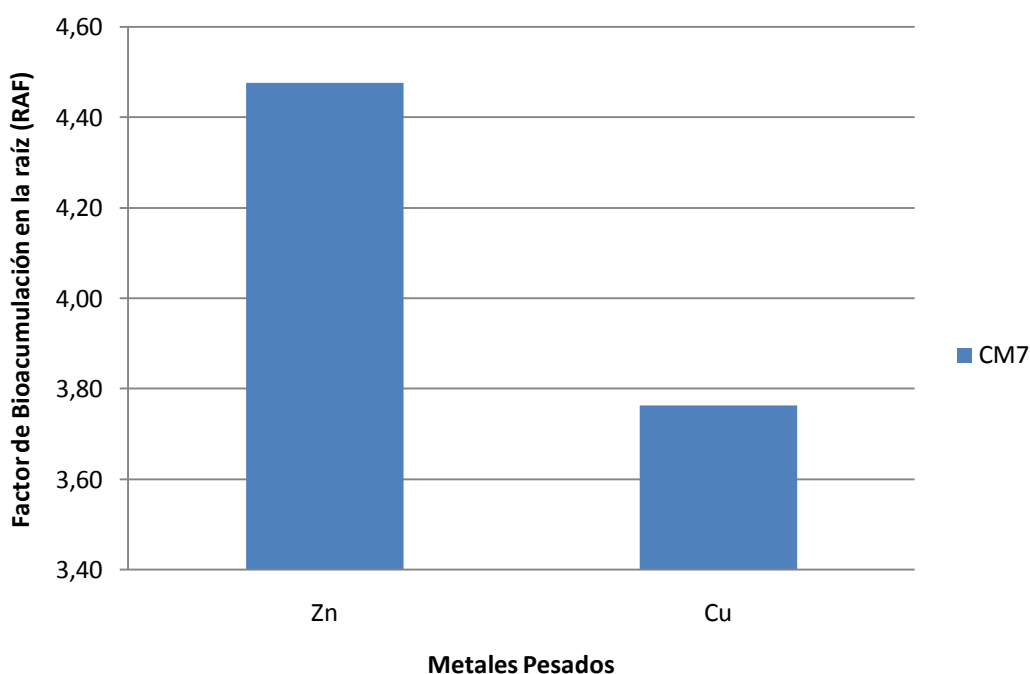


Figura 81. Gráfico del Factor de Bioacumulación en la raíz (RAF) para concentraciones Biodisponible del suelo en CM7.

2.3.- Factor de Bioacumulación en parte aérea (SAF) para concentraciones Pseudo-Total del suelo.

Los factores de bioacumulación en la parte aérea (SAF) para concentraciones pseudo-total del suelo, calculados en el Anexo V, Tabla Anexo 22, fueron representados gráficamente en la figura 82.

La totalidad del Factor de Bioacumulación en la parte aérea para concentraciones pseudo-total del suelo, dieron valores menores a 1 en Zn, Cr y Cu, lo cual significa, que la planta es exclusora y que las mayores concentraciones se mantienen en el suelo, acumulando así, una menor cantidad de metales en la parte aérea.

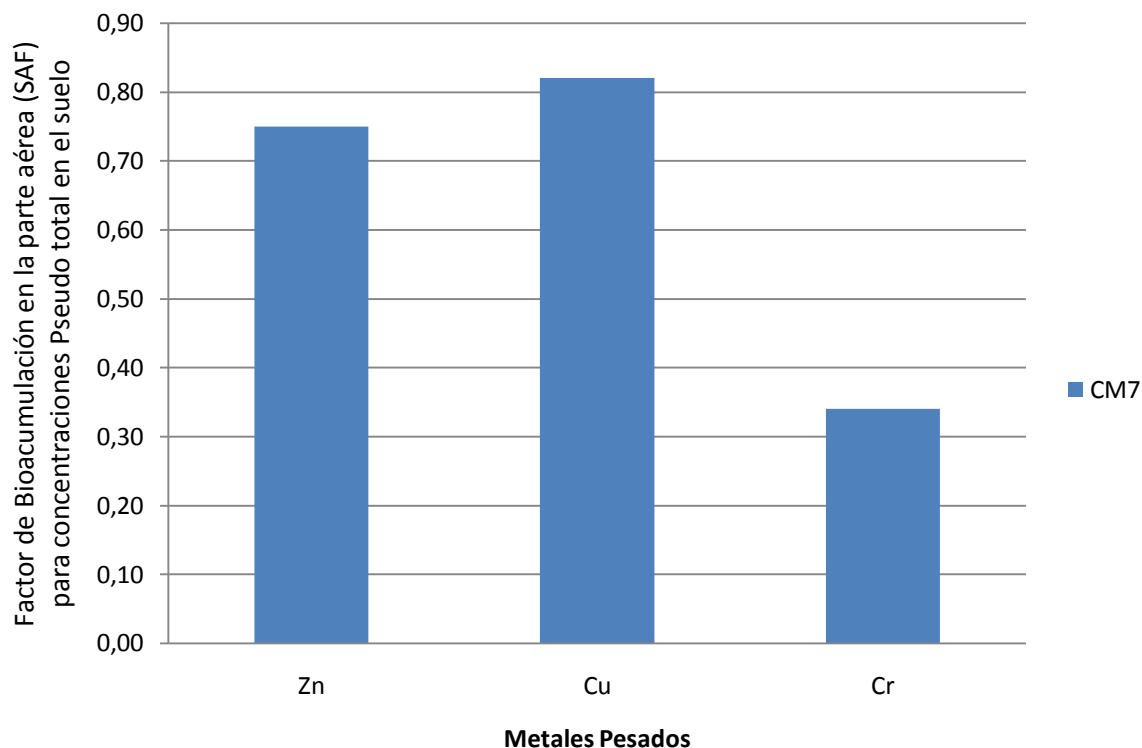


Figura 82. Gráfico del Factor de Bioacumulación en la parte aérea (SAF) para concentraciones pseudo-total en el suelo.

2.4.- Factor de Bioacumulación en parte aérea (SAF) para concentraciones Biodisponible del suelo.

Los factores de bioacumulación en la parte aérea (SAF) para concentraciones biodisponible del suelo, calculados en el Anexo V, Tabla Anexo 23, fueron representados gráficamente en la figura 83.

La totalidad del Factor de Bioacumulación en la raíz (100%) para concentraciones biodisponible del suelo, dieron valores mayores a 1 en Zn, Cu y Cr, lo cual significa que la

planta ha acumulado el total de las concentraciones de los metales en su parte aérea con relación a su concentración del suelo.

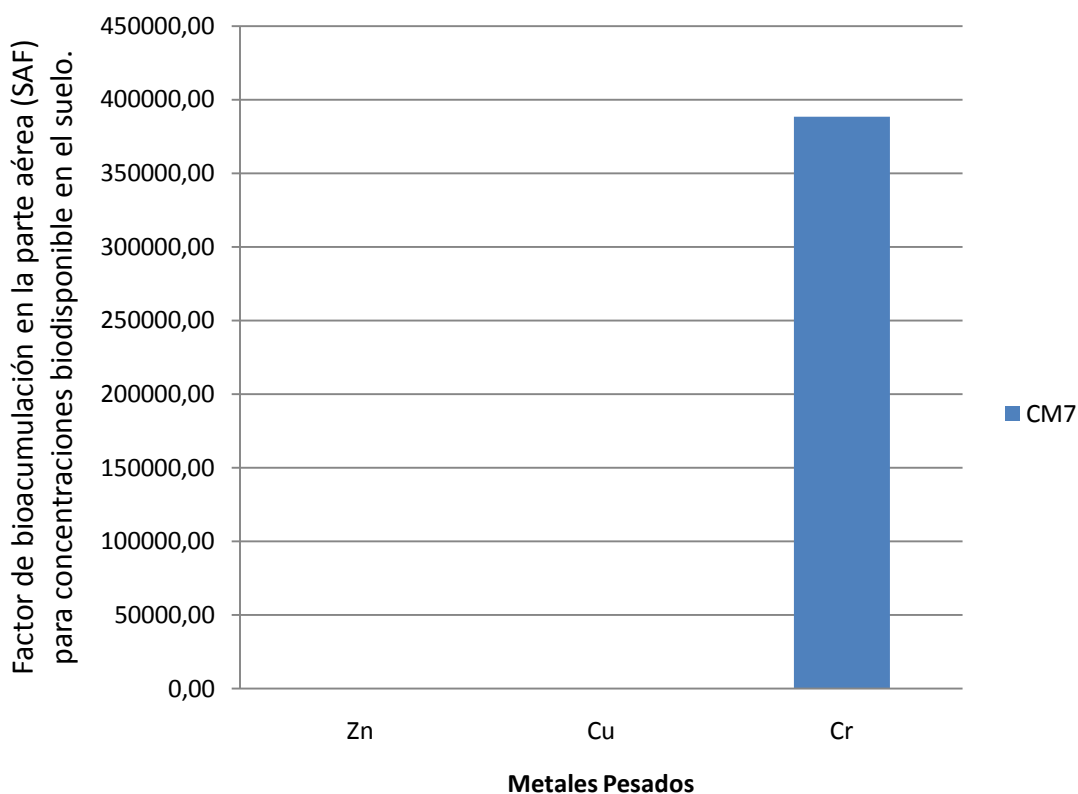


Figura 83. Gráfico del Factor de Bioacumulación en la parte aérea (SAF) para concentraciones biodisponibles en el suelo.

En resumen , para el caso de RAF para concentraciones Pseudo-total dio valores menores a 1 y para concentraciones Biodisponible dieron valores mayores a 1. En el caso de SAF, para concentraciones Pseudo-Total dieron valores inferiores a 1 y para concentraciones Biodisponibles dieron concentraciones mayores a 1, por lo cual, la planta al utilizar concentraciones Pseudo-Total del suelo, da que ésta, no actúa como hiperacumuladora, sino como exclusora, siendo así, que las mayores concentraciones se mantienen en el suelo, y no en la raíz o en su parte aérea . En caso contrario, la planta al utilizar concentraciones Biodisponibles del suelo, da que ésta, actúa potencialmente como hiperacumuladora, acumulando la mayor concentración de metales pesados tanto en su raíz como en su parte aérea.

CAPITULO 5: CONCLUSIONES

Según los resultados obtenidos en esta investigación, se puede concluir que:

El análisis textural del suelo, presenta que es de tipo , para top soil, Areno Francosa, donde se tiene un suelo con bastante arena, pero también cuenta con suficiente cantidad de arcilla y limo. Para el caso de sub soil, se encontró un suelo mayoritariamente del tipo, Franco arenosa, donde la proporción de arcilla y limo aumenta, lo que le da mucha más cohesión que la areno francosa.

La concentraciones Pseudo-Total del suelo presentan un alto contenido de metales pesados en casi la totalidad de los maceteros, con respecto a la línea base, siendo éstos en orden descendente $Zn > Cu > Pb$, a diferencia de las concentraciones Biodisponibles del suelo que solo en un macetero presentó un alto contenido de un solo metal, que es Pb, el cual es CM10 con 20,15 mg/Kg.

Para las concentraciones Pseudo-Total del suelo, el índice de geo-acumulación, muestra que solo un porcentaje de los maceteros (20%) con algunos metales pesados, se encuentra contaminado. Para el índice integrado de contaminación muestra que solo 13 maceteros, de un total de 21, tienen un nivel de suelo limpio y finalmente su factor de enriquecimiento muestra que el suelo es enriquecido solo por los metales Ni, Co y Cr. Para el caso de las concentraciones Biodisponibles del suelo, el índice de geoacumulación e integrado de contaminación sostiene que la totalidad de las muestras presentan un suelo no contaminado, limpio.

Para el caso de la fitoextracción, para la comuna de Talcahuano, se puede concluir que ninguna de las 2 plantas analizadas, tanto para concentraciones Pseudo- total como Biodisponible, se comportan como hiperacumuladoras de metal pesado, ya que no cumplen con el parámetro número 3, señalado en el punto 2.7, los cuales son :

- 1) Factor de Traslocación debe ser mayor a 1.
- 2) Factor de Bioacumulación, debe ser mayor a 1.

3) La parte aérea de la planta, debe tener concentraciones superiores a 100 mg/Kg para Cd; 1000 mg/Kg para Al, As, Co, Cu, Cr, Ni, Se, Pb y 10000 mg/Kg para Zn y Mn.

Sin embargo, la especie *Salicornia*, analizada con las concentraciones biodisponibles del suelo, posee factores tanto de traslocación como de bioacumulación superiores a 1, por lo tanto, esta planta puede transferir los metales pesados desde la raíz hacia la parte aérea, sirviendo así, para una fitoextracción, al contrario de lo logrado con las concentraciones pseudo-total del suelo donde ambos factores (Traslocación y Bioacumulación) son menores que 1, lo cual no sirve para la utilización de fitoextracción.

Para el caso de *Lolium Perenne*, analizada con las concentraciones Biodisponibles del suelo, posee un factor de traslocación inferior a 1 y un factor de Bioacumulación superior a 1. En el caso de las concentraciones Pseudo-Total del suelo, su factor de traslocación y bioacumulación son inferiores a 1, por lo cual, ésta planta, independiente del tipo de concentración del suelo que se ocupe, tiene un mayor contenido de metal en sus raíces que en las hojas y tallo, por ende, esta especie no se puede considerar para una fitoextracción, pero si para una fitoestabilización.

Finalmente se puede concluir que la mejor concentración del suelo, con la que se llega a un óptimo resultado de fitoextracción, es la Biodisponible por sobre la Pseudo-Total, ya que éste último no da una valoración apropiada del impacto ambiental causado.

BIBLIOGRAFÍA

Álvarez, M. (2015). Concentraciones y distribuciones de metales en suelos de la comuna de Talcahuano. *Proyecto de título, Universidad Católica de la Santísima Concepción*.

Bakieva, M., García-Bellido, R., González Such, J., Jornet, J.M., (2010). Spss: Gráficos, Diagrama de caja. *Grupo de Innovación Educativa (innovaMIDE). Universitat de València*.

Bech, J., Roca N., Barceló J., Duran P., Tume P., Poschenrieder C., (2012). Soil and planta contamination by lead mining in Bellmunt (Western Mediterranean Area). *Journal of Geochemical Exploration*.

Bellver, E., (2016). Causas principales de la contaminación del suelo. <http://tendencias.com/eco/causas-principales-de-la-contaminacion-del-suelo/>. Revisado (01/07/2016).

Benavente, David., (2015). Estadística descriptiva y test de normalidad. <http://web.ua.es/es/lpa/docencia/analisis-estadistico-de-datos-geoquimicos-con-r/estadistica-descriptiva-y-test-de-normalidad.html> Revisado (1/09/2016).

Codelco., (2014). El cobre y el medio ambiente. https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/artic/20110217/pags/20110217155005.html . Revisado (10/08/2016).

Conabio, 2012. Fichas de especie Lolium Perenne. <http://www.naturalista.mx/taxa/52801-Lolium-perenne>

Cubillos, A., (2011). Evaluación de la fitorremediación como alternativa de tratamiento de aguas contaminadas con hidrocarburos. *Tesis de maestría. Universidad Tecnológica de Pereira*.

Del Aguila, P., Lugo, J., Vaca, R., (2005). Determinación de factores de enriquecimiento y geoacumulación de Cd, Cr, u, Ni, Pb y Zn en suelos de la cuenca alta del río Lerma. *Revista Ciencia Ergo Sum. Universidad Autónoma del Estado de México.*

Delgadillo - López, A., González-Ramírez, C., Prieto-García, F., Villagómez - Ibarra, J., Acevedo-Sandoval, O., (2011). Fitorremediación: una alternativa para eliminar la contaminación. *Artículo Tropical ans Subtropical Agroecosystems. Universidad Autónoma del Estado Hidalgo, Instituto de ciencias básicas e Ingeniería, Centro de investigaciones Químicas.*

Desaules, A. (2012). Critical evaluation of soil contamination assessment methods for trace metals. *Science of the Total Environment.*

Escuela Superior de Informática, Prácticas Estadística. *Análisis descriptivo con SPSS.*

Falasca, S., (2013). Salicornia, una especie promisoría para bioenergía en suelos salinos. *Artículo de energía renovable*

Frías - Navarro., D (2015). Pruebas paramétricas y no paramétricas. *Apunte Estudiantil. Universitat de València.*

Galán, E., Bloundi, K., González, I., Duplay, j., (2009). Evaluación de la contaminación por elementos traza en sedimentos de la laguna de nador (Marruecos). *Revista de la sociedad española de minerología. Universidad de Sevilla, Institut de Geologie, Centre de Geochimie de la Surface, Rue Blessing, Strasbourg.*

Garbisu, C., Epelde, L., Becerril, J.M., (2008). Fitorremediación. *Revista el ecologista n°57.*

González, D., Almendros, P., Álvarez, J.M., (2009). Métodos de análisis de elementos en suelos: Disponibilidad y fraccionamiento. *Química y medio ambiente, Universidad Politécnica de Madrid.*

González, E., Tornero, M., Ángeles, Y., Bonilla, N., (2009). Concentración total y especiación de metales pesados en biosólidos de origen urbano. *Revista online cubana SciELO Cuba*.

Herrera - Murilo, J., Rodríguez, S., (2010). Validación de un método de análisis para la determinación de metales pesados en partículas PM10 colectadas en aire ambiente. *Artículo de Tecnología en marcha. Universidad Nacional, Universidad de Costa Rica*.

Hontoria, C., Rodríguez-Murillo, J.C., SAA, A., (2004). Contenido de carbono orgánico en el suelo y factores de control en la España peninsular. *Artículo Edafología, Universidad Politécnica de Madrid*.

IBM Project., (2012). Manual del usuario del sistema básico de IBM SPSS Statistics 21.

Kim, R., Yoon, J., Kim, T., Yang, J., Owens, G., Kim, K. Bioavailability of heavy metals in soils: definitions and practical implementation - a critical review. Original Paper. National Institute of Environmental, Kangwon National University, University of South Australia, Gyeongnam National University of Science and Technology.

León, G., (2009). Diagramas de Caja. *Apuntes de métodos estadísticos I. Universidad de los Andes*.

Machado, A; Giraldoth, D; Garcia, N; Colina, G; Garcia, C; Granadillo, V. (2008). Estudio de cinc, cromo, níquel y plomo mediante factores de enriquecimiento como indicadores de contaminación en suelo y sedimentos viales en la ciudad de Maracaibo. *Scientific Journal of the Experimental Faculty of Sciences, at the Universidad de Zulia Volumen 16, N° 4. 449 – 456*.

Manzano, V., (2014). Relaciones entre dos variables, una visión de urgencia. *PDF de Siseño y análisis de datos en psicología I. DADI*

Martínez, R., Tuya, L., Martínez, M., Pérez A., Cánovas A.M., (2009). El coeficiente de correlación de los rangos de spearman. *Revista online Cubana SciELO Cuba*.

May,C., (2004). Evaluación del método multiextractante bicarbonato de amonio-DTPA (AB-DTPA) en suelos chilenos. *Magister en ciencias vegetales, Pontificia Universidad Católica de Chile*.

Medina, K., Montano, Y., (2014). Determinación del factor de Bioconcentración y Traslocación de metales pesados en el *Juncus arcticus* Willd. y *Cortaderia rudiusscula* Stapf. de áreas contaminadas con el pasivo ambiental minero alianza - ANCASH 2013. *Proyecto de Título, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo.*

Mendita, C., Taisigüe, K., (2014). Acumulación de traslocación de metales, metaloides y no metales en plantas nativas de la zona minera de Chontales: Implicaciones para el potencial de Fito-remediación. *Informe de laboratorio de Biotecnología. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua.*

Menéndez, J., Oliveros, J., (2016). "*Lolium perenne* L.". Num. 83, <http://www.asturnatura.com/especie/lolium-perenne.html>

Mentaberry, A., (2011). Fitorremediación. *Exponencia de Agrobiotecnología. Universidad de Buenos Aires.*

Miliarium (2004). Contaminación por Metales Pesados. <http://www.miliarium.com/Proyectos/SuelosContaminados/Manuales/Contmetalespesados.asp>

Molina, J., Rodrigo, M., (2010). Estadísticos de la forma de la distribución. *Apunte de estadística descriptiva (Open Course Ware). Universitat de València.*

Munita, L. (2012). Concentraciones y distribuciones de metales pesados y elementos traza en suelos del distrito Sentmenat (Cataluña, España). *Proyecto de título, Universidad Católica de la Santísima Concepción.*

Ocampo, P., (2016). Transferencia de Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn desde suelos a plantas en la comuna de Talcahuano, Chile. *Proyecto de título, Universidad Católica de la Santísima Concepción.*

Pascal, E., (2015). Contaminación del Suelo. <http://elblogverde.com/contaminacion-del-suelo/>. Revisado (01/07/2016)

Reyes, N., Duarte, F., (2008). Evaluación de la capacidad bioacumuladora de mercurio de siete especies vegetales. *Proyecto de Título. Universidad Industrial de Santander.*

Rubio, R., (2015). Concentración y distribución de metales Ba, Cr, Cu, Ni, Pb, V, Zn en suelos urbanos de Arica. *Proyecto de título, Universidad Católica de la Santísima Concepción.*

Ruiz, E., Armienta, M., (2012). Acumulación de arsénico y metales pesados en maíz en suelos cercanos a jales o residuos mineros. *Artículo de contaminación ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México.*

Sola, M.J., Canton, L., (1990). Contaminación por metales pesados en sedimentos superficiales de los ríos de Guipuzcoa. *Informe de laboratorio de contaminación - Departamento de Química Aplicada. Universitat Politècnica de València.*

Tomlinson, D.C., Wilson, J.G., Harris, C.R., & Jeffrey, D.W., (1980). Problems in assessment of heavy metals in and the formation of pollution index estuaries. *Helgol Meeresunters* 33 :566-575.

Tume, P., King, R., Gonzalez, E., (2013). Concentration and distribution of heavy metals in Talcahuano (Chile). *Proyecto Fondecyt 1130366.*

Tume, P., King, R., Gonzalez, E., Bustamante, G., Reverter, F., Roca, N., Bech J., (2014). Trace element concentrations in shooyard soils from the port city of Talcahuano, Chile. *Journal of Geochemical Exploration,*

Unesco., (2012). El plomo en el ambiente. http://www.revistanova.org/index.php?option=com_content&view=article&id=100&Itemid=108. Revisado (25/08/2016)

USDA, (1999). Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044786.pdf

Valencia, A., (2010). Prueba de Shapiro - Wilk para probar normalidad. *Apunte de prueba de normalidad.*

ANEXOS

ANEXO I

Línea Base

Maceteros que superan la línea base.

a) Metales pesados en concentración Pseudo-Total del suelo.

	Cu (mg/Kg)	Pb (mg/Kg)	Zn (mg/Kg)
CM1	49	38	140
CM2	47	36	132
CM3	-	32	129
CM4	47	43	124
CM5	47	34	129
CM6	45	36	128
CM7	-	41	121
CM8	45	44	130
CM10	86	134	126
CM12	49	40	137
PM1	-	33	127
PM2	-	31	139
PM3	-	36	120
PM4	-	30	121
PM5	46	45	135
PM6	48	43	137
PM7	50	34	134
PM8	51	49	132
PM10	79	94	132
PM11	48	57	134
PM12	49	46	130

Tabla Anexo 1. Maceteros que superan los valores de fondo.

b) Metales pesados en concentración Biodisponible del suelo.

	Pb (PPM)
CM1	-
CM2	-
CM3	-
CM4	-
CM5	-
CM6	-
CM7	-
CM8	-
CM10	20,15
CM12	-
PM1	-
PM2	-
PM3	-
PM4	-
PM5	-
PM6	-
PM7	-
PM8	-
PM10	-
PM11	-
PM12	-

Tabla Anexo 2. Macetero que supera el valor de fondo.

ANEXO II

Correlación de Spearman

Correlación de Spearman entre metales pesados del suelo.

a) Metales pesados en concentración Pseudo-Total del suelo.

Combinación	Correlación	Tipo de Correlación
Pb/Cu	0,65	Regular
Co/Ni	0,568	
Cr/Ni	0,528	
Co/Zn	0,517	
Ni/Zn	0,495	Mala
Zn/Cu	0,473	
Cr/Zn	0,421	
Cr/Co	0,262	
Ni/Pb	-0,29	
Cr/Pb	0,218	No hay
Zn/Pb	0,13	
Co/Cu	0,046	
Cr/Cu	0,013	
Ni/Cu	-0,069	
Co/Pb	-0,241	

Tabla Anexo 3. Jerarquía entre las correlaciones de metales pesados en concentración Pseudo-Total del suelo.

b) Metales pesados Biodisponible del suelo.

Combinación	Correlación	Tipo de Correlación
Cr/Ni	1	Perfecta
Co/Zn	0,922	Buena
Pb/Cu	0,833	
Zn/Pb	0,388	Mala
Ni/Pb	0,369	
Cr/Pb	0,369	
Ni/Zn	0,369	
Cr/Zn	0,369	
Co/Ni	0,362	
Cr/Co	0,362	
Co/Pb	0,267	
Ni/Cu	0,222	No Hay
Cr/Cu	0,222	
Zn/Cu	0,195	
Co/Cu	0,069	

Tabla Anexo 4. Jerarquía entre las correlaciones de metales pesados en concentración Biodisponible del suelo.

c) Metales pesados Pseudo-Total y Biodisponible del suelo

Combinación	Correlación	Tipo de Correlación
Pb-Bio/Pb-Pseudo	0,812	Buena
Pb-Bio/Ni-Pseudo	0,812	Regular
Cu-Bio/Cu-Pseudo	0,674	
Cu-Bio/Pb-Pseudo	0,653	
Pb-Bio/Cu-Pseudo	0,591	
Zn-Bio/Ni-Pseudo	-0,261	Mala
Ni-Bio/Cr-Pseudo	-0,267	
Ni-Bio/Ni-Pseudo	-0,34	
Cr-Bio/Ni-Pseudo	-0,34	
Cu-Bio/Ni-Pseudo	-0,349	
Co-Bio/Cr-Pseudo	0,182	No hay
Cu-Bio/Zn-Pseudo	0,137	
Zn-Bio/Pb-Pseudo	0,119	
Ni-Bio/Pb-Pseudo	0,111	
Cr-Bio/Pb-Pseudo	0,111	
Co-Bio/Zn-Pseudo	0,097	
Co-Bio/Co-Pseudo	0,049	
Pb-Bio/Zn-Pseudo	0,048	
Co-Bio/Pb-Pseudo	0,023	
Zn-Bio/Cr-Pseudo	0,023	
Ni-Bio/Cu-Pseudo	0	
Cr-Bio/Cu-Pseudo	0	
Cu-Bio/Co-Pseudo	-0,005	
Pb-Bio/Cr-Pseudo	-0,006	
Zn-Bio/Cu-Pseudo	-0,022	
Zn-Bio/Zn-Pseudo	-0,04	
Zn-Bio/Co-Pseudo	-0,045	
Ni-Bio/Co-Pseudo	-0,067	
Cr-Bio/Co-Pseudo	-0,067	
Ni-Bio/Zn-Pseudo	-0,074	
Cr-Bio/Zn-Pseudo	-0,074	
Cu-Bio/Cr-Pseudo	-0,101	
Co-Bio/Cu-Pseudo	-0,118	
Co-Bio/Ni-Pseudo	-0,124	
Pb-Bio/Co-Pseudo	-0,202	
Cr-Bio/Cr-Pseudo	-0,267	

Tabla Anexo 5. Jerarquía entre las correlaciones de metales pesados en concentración Pseudo-Total y Biodisponible del suelo

d) Correlación se Spearman entre los metales pesados en concentración Pseudo-Total del suelo y las propiedades edafológicas.

Combinación	Correlación	Tipo de Correlación
Co-Pseudo/Arcilla	0,497	Mala
Cu-Pseudo/Limo	0,351	
Zn-Pseudo/Arcilla	0,342	
Ni-Pseudo/Arcilla	0,315	
Co-Pseudo/Limo	0,293	
Pb-Pseudo/Limo	0,264	
Pb-Pseudo/Arena	-0,249	
Pb-Pseudo/C.O	-0,272	
Co-Pseudo/C.O	-0,279	
Co-Pseudo/Arena	-0,33	
Cu-Pseudo/C.O	-0,334	
Cu-Pseudo/Arena	-0,349	
Cr-Pseudo/pH	-0,351	
Zn-Pseudo/C.O	-0,436	
Co-Pseudo/pH	0,229	No Hay
Cu-Pseudo/pH	0,181	
Cu-Pseudo/Arcilla	0,173	
Ni-Pseudo/pH	0,124	
Zn-Pseudo/Limo	0,093	
Zn-Pseudo/pH	0,09	
Cr-Pseudo/Arcilla	0,071	
Cr-Pseudo/Arena	0,067	
Pb-Pseudo/Arcilla	0,038	
Ni-Pseudo/Limo	0,002	
Ni-Pseudo/C.O	-0,013	
Ni-Pseudo/Arena	-0,025	
Cr-Pseudo/C.O	-0,043	
Cr-Pseudo/Limo	-0,071	
Zn-Pseudo/Arena	-0,127	
Pb-Pseudo/pH	-0,221	

Tabla Anexo 6. Jerarquía entre las correlaciones de los metales pesados en concentración Pseudo-total del suelo y las propiedades edafológicas

e) **Correlación se Spearman entre los metales pesados en concentración Biodisponible del suelo y las propiedades edafológicas.**

Combinación	Correlación	Tipo de Correlación
Co-Bio/pH	-0,342	Mala
Ni-Nio/C.O	-0,258	
Cr-Bio/C.O	-0,258	
Cu-Bio/Arena	-0,451	
Cu-Bio/Limo	0,475	
Cu-Bio/pH	0,153	No Hay
Pb-Bio/pH	-0,143	
Zn-Bio/pH	-0,192	
Ni-Bio/pH	0,037	
Cr-Bio/pH	0,037	
Cu-Bio/C.O	-0,195	
Pb-Bio/C.O	-0,222	
Zn-Bio/C.O	0,058	
Co-Bio/C.O	0,082	
Pb-Bio/Arena	-0,16	
Zn-Bio/Arena	-0,012	
Ni-Bio/Arena	0	
Co-Bio/Arena	0,149	
Cr-Bio/Arena	0	
Pb-Bio/Limo	0,192	
Zn-Bio/Limo	0,039	
Ni-Bio/Limo	-0,037	
Cr-Bio/Limo	-0,143	
Cr-Bio/Limo	-0,037	
Cu-Bio/Arcilla	0,206	
Pb-Bio/Arcilla	-0,063	
Zn-Bio/Arcilla	-0,046	
Ni-Bio/Arcilla	0,185	
Co-Bio/Arcilla	-0,1	
Cr-Bio/Arcilla	0,185	

Tabla Anexo 7. Jerarquía entre las correlaciones de los metales pesados en concentración Biodisponible del suelo y las propiedades edafológicas

ANEXO III

Relación entre metales pesados Pseudo-Total y Biodisponible.

	Cu (PPM)	Pb (PPM)	Zn (PPM)	Ni (PPM)	Co (PPM)	Cr (PPM)
CM1	0,09	0,06	0,12	0,0005	0,001	0,000001
CM2	0,09	0,04	0,11	0,0005	0,001	0,000001
CM3	0,10	0,07	0,14	0,0006	0,001	0,000001
CM4	0,14	0,10	0,14	0,0007	0,001	0,000001
CM5	0,12	0,09	0,15	0,0007	0,001	0,000001
CM6	0,10	0,06	0,12	0,0006	0,001	0,000001
CM7	0,10	0,06	0,15	0,0007	0,001	0,000001
CM8	0,11	0,08	0,15	0,0008	0,001	0,000001
CM10	0,30	0,15	0,14	0,0007	0,001	0,000001
CM12	0,10	0,07	0,12	0,0006	0,001	0,000001
PM1	0,13	0,08	0,13	0,0006	0,001	0,000001
PM2	0,11	0,06	0,12	0,0006	0,001	0,000001
PM3	0,10	0,05	0,13	0,0005	0,001	0,000001
PM4	0,08	0,07	0,13	0,0006	0,001	0,000001
PM5	0,11	0,07	0,13	0,0006	0,001	0,000001
PM6	0,09	0,08	0,14	0,0007	0,001	0,000001
PM7	0,10	0,07	0,12	0,0006	0,001	0,000001
PM8	0,12	0,10	0,12	0,0006	0,001	0,000001
PM10	0,08	0,04	0,14	0,0007	0,001	0,000001
PM11	0,34	0,24	0,12	0,0006	0,001	0,000001
PM12	0,10	0,06	0,12	0,0006	0,001	0,000001

Tabla Anexo 8. Relación entre Metales Pesados en concentración Pseudo-Total y Biodisponible del suelo en cada macetero.

ANEXO IV

Índices de contaminación

Factor de Geo - acumulación (I_{geo})

a) Factor de Geo - acumulación de metales pesados en concentración Pseudo-Total del suelo

Maceteros	Cu (mg/Kg)	Pb (mg/Kg)	Zn (mg/Kg)	Ni (mg/Kg)	Co (mg/Kg)	Cr (mg/Kg)
CM1	-0,42	0,53	0,03	-2,13	-3,26	-3,97
CM2	-0,48	0,46	-0,06	-2,18	-3,36	-3,97
CM3	-0,64	0,29	-0,09	-2,23	-3,36	-4,04
CM4	-0,48	0,71	-0,15	-2,44	-3,47	-4,20
CM5	-0,48	0,37	-0,09	-2,28	-3,36	-4,04
CM6	-0,54	0,46	-0,10	-2,33	-3,36	-4,12
CM7	-0,75	0,64	-0,18	-2,33	-3,47	-3,77
CM8	-0,54	0,75	-0,08	-2,44	-3,36	-4,04
CM10	0,39	2,35	-0,13	-2,44	-3,47	-4,20
CM12	-0,42	0,61	-0,01	-2,28	-3,36	-4,04
PM1	-0,61	0,33	-0,12	-2,33	-3,26	-4,12
PM2	-0,61	0,24	0,02	-2,28	-3,36	-4,12
PM3	-0,75	0,46	-0,20	-2,23	-3,36	-4,12
PM4	-0,83	0,19	-0,18	-2,44	-3,47	-4,20
PM5	-0,51	0,78	-0,03	-2,23	-3,36	-3,97
PM6	-0,45	0,71	-0,01	-2,28	-3,36	-4,04
PM7	-0,39	0,37	-0,04	-2,28	-3,36	-4,12
PM8	-0,36	0,90	-0,06	-2,38	-3,36	-4,04
PM10	0,27	1,84	-0,06	-2,33	-3,36	-4,12
PM11	-0,45	1,12	-0,04	-2,28	-3,36	-3,90
PM12	-0,42	0,81	-0,08	-2,33	-3,47	-4,04

Tabla Anexo 9. Factor de Geo - acumulación para cada macetero y metal pesado en concentración pseudo-total del suelo.

b) Factor de Geo - acumulación de metales pesados en concentración Biodisponible del suelo

Maceteros	Cu (mg/Kg)	Pb (mg/Kg)	Zn (mg/Kg)	Ni (mg/Kg)	Co (mg/Kg)	Cr (mg/Kg)
CM1	-3,83	-3,55	-3,03	-12,98	-13,06	-24,15
CM2	-3,97	-4,02	-3,23	-13,17	-13,26	-24,34
CM3	-3,98	-3,65	-2,97	-12,91	-13,00	-24,08
CM4	-3,31	-2,63	-2,96	-12,90	-12,99	-24,07
CM5	-3,54	-3,18	-2,84	-12,78	-12,87	-23,95
CM6	-3,85	-3,55	-3,11	-13,05	-13,14	-24,22
CM7	-4,11	-3,42	-2,89	-12,83	-12,92	-24,00
CM8	-3,76	-2,89	-2,85	-12,80	-12,88	-23,97
CM10	-1,36	-0,38	-3,01	-12,96	-13,11	-24,13
CM12	-3,72	-3,19	-3,08	-13,03	-13,04	-24,20
PM1	-3,59	-3,40	-3,01	-12,96	-13,05	-24,13
PM2	-3,86	-3,79	-3,03	-12,97	-13,06	-24,14
PM3	-4,12	-3,78	-3,15	-13,10	-13,18	-24,27
PM4	-4,38	-3,64	-3,09	-13,04	-13,12	-24,21
PM5	-3,65	-2,99	-2,98	-12,93	-13,02	-24,10
PM6	-3,90	-2,94	-2,89	-12,84	-12,92	-24,01
PM7	-3,76	-3,51	-3,08	-13,03	-13,11	-24,20
PM8	-3,37	-2,46	-3,07	-13,01	-13,10	-24,18
PM10	-3,33	-2,71	-2,91	-12,86	-12,94	-24,03
PM11	-2,01	-0,95	-3,14	-13,09	-13,17	-24,26
PM12	-3,69	-3,21	-3,13	-13,07	-13,16	-24,24

Tabla Anexo 10. Factor de Geo - acumulación para cada macetero y metal pesado en concentración Biodisponible del suelo.

Índice integrado de contaminación (IPI)

a) Índice integrado de contaminación para los metales pesados en concentración Pseudo-total del suelo en cada macetero.

Maceteros	Factor de Contaminación (CF)						IPI
	Cu (mg/Kg)	Pb (mg/Kg)	Zn (mg/Kg)	Ni (mg/Kg)	Co (mg/Kg)	Cr (mg/Kg)	
CM1	1,12	2,17	1,53	0,34	0,16	0,10	1
CM2	1,08	2,06	1,44	0,33	0,15	0,10	0
CM3	0,96	1,83	1,41	0,32	0,15	0,09	0
CM4	1,08	2,46	1,35	0,28	0,14	0,08	0
CM5	1,08	1,94	1,41	0,31	0,15	0,09	0
CM6	1,03	2,06	1,40	0,30	0,15	0,09	0
CM7	0,89	2,34	1,32	0,30	0,14	0,11	0
CM8	1,03	2,51	1,42	0,28	0,15	0,09	0
CM10	1,97	7,66	1,37	0,28	0,14	0,08	1
CM12	1,12	2,29	1,49	0,31	0,15	0,09	1
PM1	0,98	1,89	1,38	0,30	0,16	0,09	0
PM2	0,98	1,77	1,52	0,31	0,15	0,09	0
PM3	0,89	2,06	1,31	0,32	0,15	0,09	0
PM4	0,85	1,71	1,32	0,28	0,14	0,08	0
PM5	1,05	2,57	1,47	0,32	0,15	0,10	1
PM6	1,10	2,46	1,49	0,31	0,15	0,09	1
PM7	1,14	1,94	1,46	0,31	0,15	0,09	0
PM8	1,17	2,80	1,44	0,29	0,15	0,09	1
PM10	1,81	5,37	1,44	0,30	0,15	0,09	1
PM11	1,10	3,26	1,46	0,31	0,15	0,10	1
PM12	1,12	2,63	1,42	0,30	0,14	0,09	0

Tabla Anexo 11. Índice integrado de contaminación para cada macetero con metales pesados en concentración Pseudo-total.

b) Índice integrado de contaminación para los metales pesados en concentración Biodisponible del suelo en cada macetero.

Maceteros	Factor de Contaminación (CF)						IPI
	Cu (mg/Kg)	Pb (mg/Kg)	Zn (mg/Kg)	Ni (mg/Kg)	Co (mg/Kg)	Cr (mg/Kg)	
CM1	0,11	0,13	0,18	0,000186	0,000176	0,0000001	0
CM2	0,10	0,09	0,16	0,000162	0,000153	0,0000001	0
CM3	0,09	0,12	0,19	0,000194	0,000183	0,0000001	0
CM4	0,15	0,24	0,19	0,000196	0,000185	0,0000001	0
CM5	0,13	0,17	0,21	0,000213	0,000201	0,0000001	0
CM6	0,10	0,13	0,17	0,000177	0,000167	0,0000001	0
CM7	0,09	0,14	0,20	0,000205	0,000194	0,0000001	0
CM8	0,11	0,20	0,21	0,000211	0,000199	0,0000001	0
CM10	0,58	1,15	0,19	0,000189	0,000170	0,0000001	0
CM12	0,11	0,16	0,18	0,000180	0,000178	0,0000001	0
PM1	0,12	0,14	0,19	0,000188	0,000177	0,0000001	0
PM2	0,10	0,11	0,18	0,000186	0,000176	0,0000001	0
PM3	0,09	0,11	0,17	0,000171	0,000162	0,0000001	0
PM4	0,07	0,12	0,18	0,000178	0,000168	0,0000001	0
PM5	0,12	0,19	0,19	0,000192	0,000181	0,0000001	0
PM6	0,10	0,20	0,20	0,000205	0,000193	0,0000001	0
PM7	0,11	0,13	0,18	0,000180	0,000170	0,0000001	0
PM8	0,15	0,27	0,18	0,000182	0,000171	0,0000001	0
PM10	0,15	0,23	0,20	0,000202	0,000191	0,0000001	0
PM11	0,37	0,77	0,17	0,000172	0,000162	0,0000001	0
PM12	0,12	0,16	0,17	0,000174	0,000164	0,0000001	0

Tabla Anexo 12. Índice integrado de contaminación para cada macetero con metales en concentración pesados Biodisponible del suelo.

Factor de enriquecimiento (EF)

EF						
	Cu (mg/Kg)	Pb (mg/Kg)	Zn (mg/Kg)	Ni (mg/Kg)	Co (mg/Kg)	Cr (mg/Kg)
CM1	5	9	6	1	1	0
CM2	5	9	6	1	1	0
CM3	4	8	6	1	1	0
CM4	5	11	6	1	1	0
CM5	4	8	6	1	1	0
CM6	4	9	6	1	1	0
CM7	4	10	6	1	1	0
CM8	5	12	7	1	1	0
CM10	9	34	6	1	1	0
CM12	5	10	6	1	1	0
PM1	4	8	6	1	1	0
PM2	4	8	7	1	1	0
PM3	4	9	6	1	1	0
PM4	4	8	6	1	1	0
PM5	5	11	7	1	1	0
PM6	5	11	7	1	1	0
PM7	5	8	6	1	1	0
PM8	5	12	6	1	1	0
PM10	8	22	6	1	1	0
PM11	5	14	6	1	1	0
PM12	6	14	8	2	1	0

Tabla Anexo 13. Factor de enriquecimiento para cada macetero según su metal pesado.

Gráfica de los Factores de Enriquecimiento

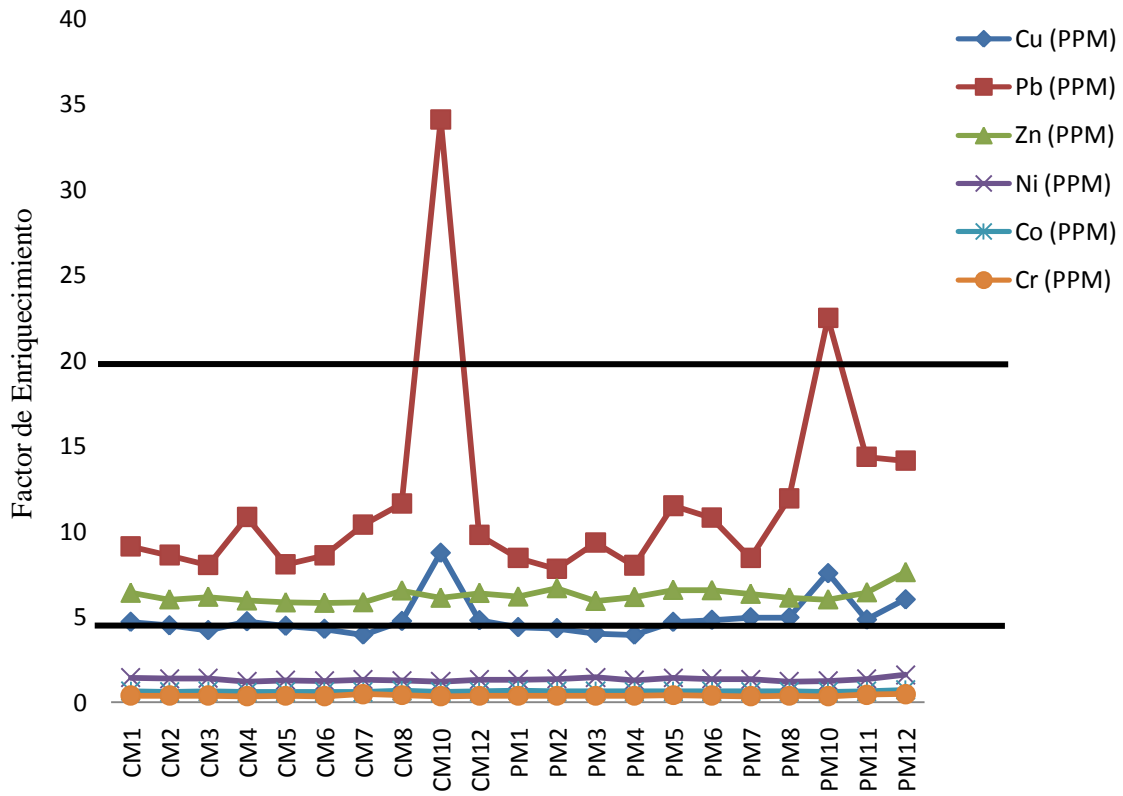


Figura 84. Gráfico factor de enriquecimiento

ANEXO V

Índices de valoración de tolerancia de metales para
Lolium Perenne y Salicornia

Lolium Perenne

Factor de Traslocación (FT)

Factor de Traslocación (FT)										
Metales	CM2	CM3	CM4	CM5	CM6	PM1	PM2	PM3	PM7	PM8
	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]
Zn	0,03	0,43	0,41	0,81	0,69	0,83	0,99	0,63	0,50	0,55
Cu	0,07	0,28	0,33	0,64	0,47	1,12	1,14	0,75	0,43	0,87
Pb	0,41	ND	0,24	0,35	0,34	1,03	1,18	ND	0,76	ND
Cr	ND	ND	0,25	1,06	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Ni	0,42	ND	ND	ND	1,05	ND	ND	ND	ND	ND

ND: No detectado

Tabla Anexo 14. Factor de traslocación (FT) en Lolium perenne.

Factor de Bioacumulación (BCF)

a) Factor Bioacumulación en la raíz (RAF) para concentraciones Pseudo-Total del suelo.

Factor de Bioacumulación en la raíz										
Metales	CM2	CM3	CM4	CM5	CM6	PM1	PM2	PM3	PM7	PM8
	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]
Zn	29,07	1,26	1,45	0,94	0,87	0,67	0,63	1,37	0,92	0,82
Cu	8,44	1,10	1,54	0,69	0,81	0,36	0,36	0,72	0,70	0,39
Pb	0,67	0,41	0,67	0,43	0,41	0,12	0,12	0,13	0,20	0,03
Cr	0,63	ND	0,87	0,64	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Ni	0,27	0,12	0,17	0,11	0,09	ND	ND	0,01	0,01	0,02

ND: No detectado

Tabla Anexo 15. Factor de Bioacumulación en la raíz (RAF) de Lolium Perenne para concentraciones Pseudo-Total del suelo.

b) Factor Bioacumulación en la raíz (RAF) para concentraciones Biodisponible del suelo.

Factor de Bioacumulación en la raíz										
	CM2	CM3	CM4	CM5	CM6	PM1	PM2	PM3	PM7	PM8
Metales	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]
Zn	261,01	9,23	10,13	6,28	7,00	5,02	5,17	10,58	7,57	6,57
Cu	95,11	11,19	10,92	5,79	8,03	2,80	3,45	7,43	7,30	3,11
Pb	14,88	6,19	6,83	5,09	6,56	1,53	2,00	2,46	2,91	0,35
Cr	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Ni	21,22	7,61	9,71	6,76	6,09	ND	ND	1,03	0,91	1,19

ND: No detectado

Tabla Anexo 16. Factor de Bioacumulación en la raíz (RAF) de Lolium Perenne para concentraciones Biodisponible del suelo.

c) Factor Bioacumulación en la parte aérea (SAF) para concentraciones Pseudo-Total del suelo.

Factor de Bioacumulación en parte aérea										
Metales	CM2	CM3	CM4	CM5	CM6	PM1	PM2	PM3	PM7	PM8
	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]
Zn	0,82	0,55	0,60	0,76	0,60	0,56	0,62	0,86	0,46	0,45
Cu	0,57	0,31	0,50	0,44	0,38	0,40	0,41	0,54	0,30	0,34
Pb	0,27	ND	0,16	0,15	0,14	0,12	0,15	ND	0,15	ND
Cr	ND	ND	0,22	0,68	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Ni	0,113	ND	ND	ND	0,10	0,03	ND	ND	ND	ND

ND: No detectado

Tabla Anexo 17. Factor de Bioacumulación en la parte aérea (SAF) de Lolium Perenne para concentraciones Pseudo-Total del suelo.

d) Factor Bioacumulación en la parte aérea (SAF) para concentraciones Biodisponible del suelo.

Factor de Bioacumulación en parte aérea										
	CM2	CM3	CM4	CM5	CM6	PM1	PM2	PM3	PM7	PM8
Metales	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]	[mg/Kg]
Zn	7,38	4,01	4,18	5,10	4,82	4,17	5,12	6,65	3,76	3,63
Cu	6,41	3,11	3,59	3,71	3,74	3,13	3,94	5,57	3,15	2,70
Pb	6,03	ND	1,64	1,76	2,21	1,57	2,37	ND	2,22	ND
Cr	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Ni	8,92	ND	ND	ND	6,37	2,00	ND	ND	ND	ND

ND: No detectado

Tabla Anexo 18. Factor de bioacumulación en la parte aérea (SAF) de Lolium Perenne para concentraciones Biodisponible del suelo.

Salicornia

Factor de Traslocación (FT)

Factor de traslocación (FT)	
Metales	CM7
	[mg/Kg]
Zn	1,10
Cu	2,24
Pb	ND
Cr	ND
Ni	ND

ND: No detectado

Tabla Anexo 19. Factor de Traslocación en Salicornia.

Factor de Bioacumulación (BCF)

a) Factor Bioacumulación en la raíz (RAF) para concentración Pseudo-Total del suelo.

Factor Bioacumulación en la raíz (RAF)	
Metales	CM7
	[mg/Kg]
Zn	0,69
Cu	0,37
Pb	ND
Cr	ND
Ni	ND

ND: No detectado

Tabla Anexo 20. Factor de Bioacumulación en la raíz (RAF) de Salicornia para concentración Pseudo-Total del suelo.

b) Factor de Bioacumulación en la raíz (RAF) para concentraciones Biodisponibles del suelo.

Factor Bioacumulación en la raíz (RAF)	
Metales	CM7
	[mg/Kg]
Zn	4,48
Cu	3,76
Pb	ND
Cr	ND
Ni	ND

ND: No detectado

Tabla Anexo 21. Factor de Bioacumulación en la raíz (RAF) de Salicornia para concentración Biodisponible del suelo.

c) Factor Bioacumulación en la parte aérea (SAF) para concentraciones Pseudo-Total del suelo

Factor Bioacumulación en la parte aérea (SAF)	
Metales	CM7
	[mg/Kg]
Zn	0,75
Cu	0,82
Pb	ND
Cr	0,34
Ni	ND

ND: No detectado

Tabla Anexo 22. Factor de bioacumulación en la parte aérea (SAF) para concentraciones pseudo-total en el suelo.

c) Factor Bioacumulación en la parte aérea (SAF) para concentraciones Biodisponible del suelo.

Factor Bioacumulación en la parte aérea (SAF)	
Metales	CM7
	[mg/Kg]
Zn	4,91
Cu	8,43
Pb	ND
Cr	388150
Ni	ND

ND: No detectado

Tabla Anexo 23. Factor de bioacumulación en la parte aérea (SAF) para concentraciones Biodisponible del suelo.