



UNIVERSIDAD DE CHILE -FACULTAD DE CIENCIAS-ESCUELA DE
CIENCIAS AMBIENTALES Y BIOTECNOLOGÍA

**“ANÁLISIS DE ELEMENTOS TRAZA METÁLICOS EN SUELOS
DE LA CIUDAD DE ARICA Y ESTUDIO CASO POLIMETALES
CORRESPONDIENTE A CONTAMINACIÓN POR RESIDUOS
MINEROS”**

Seminario de título entregado a la Universidad de Chile en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de:

QUÍMICA AMBIENTAL

DIEGO A. AYALA BUSTOS

Director de Tesis: Carlos A. Manzano, Ph.D.

Co Director: M. Cs. Sylvia V. Copaja C.

2022
Santiago-Chile



UNIVERSIDAD DE CHILE -FACULTAD DE CIENCIAS-ESCUELA DE
CIENCIAS AMBIENTALES Y BIOTECNOLOGÍA

INFORME DE APROBACIÓN SEMINARIO DE TITULO

Se informa a la Escuela de Ciencias Ambientales y Biotecnología de la Facultad de Ciencias, de la Universidad de Chile que el Seminario de Título, presentado por el **Sr. Diego Ayala Bustos** ha sido aprobado por la Comisión de Evaluación, en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Químico ambiental.

Director Seminario de Título: _____

Comisión Revisora y Evaluadora

Presidente Comisión: _____

Evaluador: _____

Santiago de Chile,

RESEÑA



Mi nombre es Diego Ayala Bustos, nacido el 28 de octubre de 1997 en la ciudad de Iquique. A la edad de 1 año me fui a vivir a mi amada ciudad de Arica, donde fui criado por mis padres Gerardo Ayala Pinto y Verónica Bustos Espinoza hasta los 18 años y donde también crecí junto a mis hermanos Gerardo y Paulina de quienes aprendí bastante.

Estudí toda mi enseñanza básica y media en el colegio North American College. Luego, por error de postulación y cosas del destino, llegué a estudiar a la ciudad de Santiago a la Universidad de Chile, cumpliendo un sueño de pequeño que jamás pensé se iba a concretar.

La química, el medioambiente y su cuidado me llamó la atención cursando la enseñanza media y fue ahí donde me interesé y descubrí esta carrera.

El último año de mis estudios superiores realicé una práctica en Izarra de lo Aguirre, donde fui recibido por Daniela Vargas, quien me enseñó el rubro de las empresas sanitarias de agua potable.

Hoy en día, luego de esta práctica y de finalizar mi seminario de título, puedo decir que los rubros que más me apasionan en materia de contaminación son agua y suelos y espero responder de la mejor manera en los desafíos que vengan de aquí en adelante.

DEDICATORIA

Dedicado especialmente a mis padres Gerardo Ayala y Verónica Bustos por hacer posible cumplir mi sueño de poder empezar y terminar este proceso de la mejor manera además de apoyarme en cada momento que se les necesitó. Sin duda, la gran crianza que me dieron, fue el impulso para poder llegar hasta aquí, y por ello este trabajo es para ustedes.

“El horizonte siempre queda lejos, pero si caminas llegarás”

Dread Mar I.

AGRADECIMIENTOS

Principalmente quiero agradecer a la profesora Sylvia Copaja por haberme dado el espacio dentro de su laboratorio, tener el tiempo y la paciencia para enseñarme todo de la mejor manera posible, y por solucionar mis problemas, especialmente cuando las cosas iban mal. Dentro de este proyecto, la buena voluntad para poder conseguirme los materiales y gestionar el buen funcionamiento de los equipos, hicieron que fuera un pilar fundamental para darle un buen inicio y término.

Agradecer también al profesor Carlos Manzano, quien fue el que me dio el ánimo para poder iniciar este proyecto e hizo posible que se pudiera llevar a cabo mediante la gestión que hizo con la profesora Sylvia. También dio apoyo económico para llevarlo a cabo.

A el profesor Carlos Rojas, por estar presente y tener la buena disposición de aclarar cada duda que tenía. Fue quién me consiguió materiales fundamentales para poder terminar este proyecto y además fue un buen guía dentro de este proceso.

A mi compañera de vida Paulette, a quien prácticamente veía todos los días, fuiste un apoyo fundamental en todo este proceso, al darme el apoyo y la compañía cuando más se necesitaba e incluso dándome soluciones a mis problemas y salvando en ocasiones importantes este proyecto.

A mis amigos de laboratorio Felipe Polanco y Marcelo Cumian, con quienes sin duda no se pasaban penas. Cada vez que salía algo mal, entre los 3 nos sabíamos levantar el ánimo y los chistes en cada espacio que se tenía no faltaban. Se extrañará no pasar el día a día con ustedes, pero el contacto siempre prevalecerá. También agradecer a Javiera Salgado

que en las pocas semanas que estuvo en el laboratorio, se pasaba muy bien, especialmente en nuestras convivencias.

A todas las personas y familias a modo general para no dejar nadie fuera, que me apoyaron de una u otra forma en la ciudad de Santiago. También a mi familia en Arica, que en cada visita me daban ánimos para seguir adelante.

Finalmente, y los más importantes, a mi familia que a pesar de la dificultad de no estar con ustedes presente conviviendo estos años, puedo decir hoy en día que cada sacrificio que hicimos valió la pena. Mil gracias por todo su apoyo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

I.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	Elementos traza metálicos.....	1
1.2.	Origen de los metales	2
1.3.	Metales y su relación con el suelo.....	3
1.4.	Principales parámetros que influyen en la biodisponibilidad de metales en el suelo 5	
1.5.	Efectos de metales en la salud de las personas	9
1.6.	Situación de matriz suelo en Chile.....	12
1.7.	Características generales de la ciudad de Arica	13
1.7.1.	Cronología y descripción del caso polimetales en Arica.....	16
1.7.2.	Encuesta realizada a la población de Arica	21
1.7.3.	Normas de referencia internacional en caso polimetales Arica.....	27
1.7.4.	Naturaleza de los metales de interés en el caso Polimetales.....	28
1.8.	Objetivo General	30
1.8.1.	Objetivos específicos	31
II.	METODOLOGÍA	32
2.1.	Área de estudio y descripción de los sitios.	32
2.2.	Extracción de muestras de suelo en la ciudad de Arica	32
2.3.	Materiales de laboratorio.....	35
2.4.	Equipos de laboratorio	36
2.5.	Preparación de material.....	37
2.5.1.	Lavado material para caracterización fisicoquímica de suelos.....	37
2.5.1.	Lavado material para análisis de metales.	37
2.6.	Caracterización Fisicoquímica de Suelos de Arica.....	38
2.6.1.	Textura.....	38
2.6.2.	Color	39
2.6.3.	pH y Conductividad Eléctrica.....	39
2.6.4.	Factor de humedad.....	40
2.6.5.	Carbono Orgánico Fácilmente Oxidable (CO).....	40
2.7.	Análisis de Elementos Metálicos en suelos de Arica.....	41

2.7.1. Digestión ácida de las muestras.....	41
2.7.2. Curva de calibración metales.....	42
2.7.3. Determinación de metales totales.....	44
2.7.3.1 Determinación Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb y Zn.....	44
2.7.3.2 Determinación de As por EAA con generador de hidruro.....	45
2.8. Análisis de calidad del suelo.....	46
2.8.1. Índice de Geoacumulación (<i>Igeo</i>).....	46
2.8.2. Factor de enriquecimiento (FE).....	48
2.8.3. Índice de carga contaminante.....	49
2.9. Análisis estadístico.....	50
2.9.1. Análisis de componentes principales (ACP).....	50
2.9.2. Coeficiente de correlación de Pearson.....	50
III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	51
3.1. Caracterización fisicoquímica de los suelos.....	51
3.2. Determinación de MO.....	54
3.3. Determinación textura del suelo.....	55
3.4. Determinación de metales en suelos de Arica.....	56
3.5. Análisis de riesgo.....	59
3.5.1. Criterios de comparación con valores de referencia.....	59
3.5.2. Comparación con normativas referenciales extranjeras.....	59
3.5.3. Comparación con niveles guía para evaluación de medios ambientales (EMEG).....	62
3.6. Análisis de la calidad de los suelos.....	65
3.6.1. Índice de geoacumulación (<i>Igeo</i>).....	65
3.6.2. Factor de enriquecimiento.....	67
3.6.3. Índice de carga contaminante.....	69
3.6.4. Comparación con estudios de similar problemática.....	70
3.6.4.1 Concentraciones de metales en diferentes estudios cercanos a relaves o explotaciones mineras.....	70
3.7. Análisis estadístico.....	74
3.7.1. Análisis de componentes principales (ACP).....	74
3.7.2. Covariación de correlación de Pearson.....	75

3.8. Discusión general.....	76
IV. CONCLUSIONES.....	81
V. RECOMENDACIONES.....	83
VI. REFERENCIAS.....	84
VII. ANEXOS.....	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Dinámica de los metales en el suelo.....	5
Figura 2: Ejemplo de un estudio acerca del efecto del pH en la biosorción de diferentes iones metálicos con el alga marina L13 (Cuizano & col, 2010).	7
Figura 3: Visión esquemática del intercambio iónico.....	8
Figura 4: Ejemplo de sustrato arcillo-húmico adsorbiendo los elementos.	9
Figura 5: Mapa ciudad de Arica con zona urbana demarcada. Fuente: Google Earth, 2022.....	14
Figura 6: Mapa con tramo demarcado de ferrocarril Arica – Visviri. Fuente: DIA Saneamiento Suelos Vía Férrea Arica – Visviri.	15
Figura 7: Zonas más afectadas cercanas al sitio F por contaminación de polimetales. ...	19
Figura 8: Diagrama de distribución de especies plomo/hidróxido. (Fuente: Burriel, 1967)	29
Figura 9: Imagen satelital (Google Earth, 03/01/22) de la ciudad con los sitios muestreados.....	32
Figura 10: Valores de pH en suelos de Arica.....	51
Figura 11: Valores de conductividad eléctrica en suelos de Arica	52
Figura 12: Valores de materia orgánica (M.O) en suelos de Arica.....	55
Figura 13: Concentraciones de Al y Fe para muestras de la ciudad de Arica.....	56
Figura 14: Concentraciones de As, Cd, Cr y Ni para muestras de la ciudad de Arica.....	57
Figura 15: Concentraciones de Cu, Pb, Mn, y Zn para muestras de la ciudad de Arica..	58
Figura 16: Gráfico ACP muestras de suelo Arica en relación con metales	74
Figura 17: Esquema del funcionamiento del equipo de EAA (Ferrer, 2017).	93
Figura 18: Mapa con zonas de mayor contaminación demarcados en rojo de forma aproximada, según estudio de CONAMA, 2009.	97
Figura 19: Curva de calibración de Cd, Cr y Zn,	103
Figura 20: Curva de calibración de Cu, Pb y Mn,.....	103
Figura 21: Curva de calibración de Fe y Ni,	104
Figura 22: Curva de calibración de Al y Mo.....	104
Figura 23: Curva de calibración de As.....	105
Figura 24 :Gráfico correspondiente a metales mayoritarios en los suelos de Arica	113
Figura 25: Gráfico correspondiente a metales mayoritarios en los suelos de Arica	113
Figura 26: Mapa de Arica con el cuadrante “blanco” elegido (en azul) y zonas que históricamente tuvieron mayores concentraciones de elementos traza metálicos (en rojo).	116
Figura 27 :Mapa con distribución de concentraciones de Cu aproximada	117
Figura 28: Mapa con distribución de concentraciones de Pb aproximada.....	118
Figura 29: Mapa con distribución de concentraciones de Zn aproximada.....	119
Figura 30:Mapa con distribución de concentraciones de As aproximada.....	120

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Primeras sección “ Encuesta para seminario de título: Análisis de concentración de metales en suelos de la ciudad de Arica (caso “Polimetales”)”	22
Tabla 2: Segunda sección “ Encuesta para seminario de título: Análisis de concentración de metales en suelos de la ciudad de Arica (caso “Polimetales”)”	24
Tabla 3: Recipientes, temperatura de preservación y tiempo de conservación de muestras ambientales para los parámetros correspondientes (MINAM, Ministerio del Medioambiente de Perú, 2014).	34
Tabla 4: Condiciones del microondas para la digestión de muestras de suelo.	42
Tabla 5: Concentraciones y alícuotas necesarias para construcción de curvas de calibración de los metales.	43
Tabla 6: Especificaciones de las lámparas y llamas para diferentes metales.....	44
Tabla 7: Especificaciones de las lámparas y llamas para As.	46
Tabla 8: Rangos y niveles de contaminación según <i>Igeo</i> (Fuente: Pérez-Mora, 2021) .	47
Tabla 9: Rangos y origen del elemento según el FE (Fuente: Barbieri, 2016)	49
Tabla 10: Clasificación de suelos según su pH (Fuente: Soil Survey Division Staff , 1993)	53
Tabla 11 :Clasificación de suelos según su CE (Fuente: Abrol & col, 1988).....	54
Tabla 12: Numero de muestras que superan las referencias de los países de Australia, Canadá, México y Brasil.	59
Tabla 13: Resumen de los metales cuyos valores máximos son mayores que las respectivas EMEG para infantes y niños.	64
Tabla 14: Selección de valores de índice de geoacumulación para suelos de Arica.....	65
Tabla 15: Valores de factor de enriquecimiento para suelos de Arica.....	67
Tabla 16: Valores de ICC de sitios seleccionados con valores >1.....	69
Tabla 17: Concentraciones de metales: As, Cd, Cu, Pb, Zn ($mg * L - 1$), de diversos estudios nacionales e internacionales respecto a estudio de suelos potencialmente contaminados(SPC) por actividad minera.....	71
Tabla 18: Correlación de Pearson sobre parámetros fisicoquímicos y metales. (CP = Correlación de Pearson; ** = la correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral). * = la correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral)).....	75
Tabla 19: Primera sección “ Encuesta para seminario de título: Análisis de concentración de metales en suelos de la ciudad de Arica (caso “Polimetales”)”	93
Tabla 20: Medidas de terreno de muestreo	96
Tabla 21: Coordenadas de los puntos muestreados de suelo.	96
Tabla 22: Datos experimentales de pH, conductividad eléctrica (CE) y color en los suelos de Arica.	98
Tabla 23: Datos experimentales necesarios para el cálculo de humedad y fh en los suelos de Arica,	99
Tabla 24: Datos experimentales de CO y MO en los suelos de Arica,	101

Tabla 25: Resultados de % de limo, arcilla y arena, con la respectiva clasificación de cada suelo	102
Tabla 26: Datos experimentales de la concentración de As en la fracción total obtenidos del equipo de EAA,	106
Tabla 27: Datos experimentales de la concentración de Al en la fracción total obtenidos del equipo de EAA,	106
Tabla 28: Datos experimentales de la concentración de Cd en la fracción total obtenidos del equipo de EAA,	107
Tabla 29: Datos experimentales de la concentración de Cr en la fracción total obtenidos del equipo de EAA,	107
Tabla 30: Datos experimentales de la concentración de Cu en la fracción total obtenidos del equipo de EAA,	108
Tabla 31: Datos experimentales de la concentración de Fe en la fracción total obtenidos del equipo de EAA,	109
Tabla 32: Datos experimentales de la concentración de Mn en la fracción total obtenidos del equipo de EAA,	109
Tabla 33: Datos experimentales de la concentración de Mo en la fracción total obtenidos del equipo de EAA,	110
Tabla 34: Datos experimentales de la concentración de Ni en la fracción total obtenidos del equipo de EAA,	110
Tabla 35: Datos experimentales de la concentración de Pb en la fracción total obtenidos del equipo de EAA,	111
Tabla 36: Datos experimentales de la concentración de Zn en la fracción total obtenidos del equipo de EAA,	112
Tabla 37: Niveles referenciales de normas internacionales expresados en mg/kg,	114
Tabla 38: EMEG para infantes y niños,	114
Tabla 39: Niveles basales utilizados de cada elemento con su respectiva fuente de información,	115
Tabla 40: Valores de Igeo de elementos traza metálicos en suelos de la ciudad de Arica	121
Tabla 41: Valores de FE de elementos traza metálicos en suelos de la ciudad de Arica	122
Tabla 42: Ubicación de muestras de suelos de la ciudad de Arica	123

LISTA DE ABREVIACIONES

ATDSR	La Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades
EMEG	Guía de Evaluación para Medios Ambientales
FE	Factor de Enriquecimiento
I_{geo}	Índice de geoacumulación
MRL	Minimal Risk Levels
PROMEL	Procesadora de Metales Ltda.
RfD	Reference Dose
SMA	Superintendencia del Medioambiente
SPPC	Suelos con potencial presencia de contaminantes

RESUMEN

Entre los años 1984 y 1985, en Arica ocurrió un grave evento contaminante que se produjo debido a desechos sólidos mineros que fueron transportados desde Suecia hacia el puerto de la ciudad para que luego una empresa local se hiciera cargo de ellos. Esta empresa llamada PROMEL, se encargaría de procesar y explotar estos desechos llamados borras para que así fueran recicladas. Sin embargo, en 1993 las abandonaron por completo. Más tarde, la población cercana a estas, comenzó a tener diferentes síntomas asociados a la exposición de estos metales. Por ello, después de más de 3 décadas con el problema aún presente, en este estudio se buscará estudiar un estatus general de estos metales en algunos suelos de la ciudad. Las muestras de suelos fueron obtenidas de diferentes puntos de la ciudad de Arica, los cuales se definieron de acuerdo a trabajos previos. Se caracterizaron mediante parámetros fisicoquímicos como pH, color, materia orgánica (MO), textura del suelo, conductividad eléctrica empleando métodos analíticos descritos. Las concentraciones de metales de interés, fueron medidas mediante espectrofotometría de absorción atómica (EAA).

Los resultados fueron comparados con algunas guías y/o límites internacionales acorde a las características naturales del suelo. También se aplicaron análisis de factor de enriquecimiento (FE), índice de geoacumulación (I_{geo}), índice de carga contaminantes (ICC), coeficiente de correlación de Pearson y análisis de componentes principales (ACP).

La comparación con normas extranjeras indica que As, Cu, Pb y Zn son los metales que mayoritariamente sobrepasan los límites referenciales de cada país. Además, M1, M5 y M14, son las muestras que según la “Guía de Evaluación para Medios Ambientales

(EMEG)” para la categoría infantes requieren evaluación de riesgo, ya que tienen 4 o más metales involucrados en la superación de este. De acuerdo con los resultados de índices de calidad de suelos, los metales que conllevan una mayor contaminación hacia casi la totalidad de las muestras son Pb y Zn. En general los sitios más contaminados debido a las altas concentraciones que presentan, serían Oscar Bonilla/Barros Arana (M5) y Luis Beretta Poncel (M14).

En relación con la encuesta realizada, la mayor parte de la población de Arica siente que no se ha informado ni ha recibido información correctamente por parte de las autoridades, además de creer que las soluciones hasta ahora no han sido completamente eficientes.

Como recomendaciones, se hace necesario en un futuro cercano, obtener información acerca de las concentraciones de polvo suspendido que hay en los techos de las viviendas de la ciudad complementándolo con estudios meteorológicos de esta. Además, se recomienda estudiar la bioaccesibilidad de metales en la población.

ABSTRACT

Between 1984 and 1985, a serious polluting event took place in Arica that occurred due to solid mining waste that was transported from Sweden to the port of the city. So, then a local company took care of it. This company called PROMEL, would be the responsible for processing and exploiting this waste called borras in order to be recycled. However, in 1993 they completely abandoned it. Later, the population close to these metals began to have different symptoms associated with its exposure. Therefore, after more than 3 decades this problem is still present nowadays, this study will research a general status of these metals in some soils of the city. The soil samples were obtained from different places of Arica which were defined in previous researches. They were characterized by physicochemical parameters such as pH, color, organic matter (OM), soil texture, electrical conductivity using analytical methods. Metal concentrations of interest were measured by atomic absorption spectrophotometry (AAS).

The results were compared with some international guidelines and/or boundaries according to the natural characteristics of the soil. Enrichment factor (EF), geoaccumulation index (I_{geo}), pollutant load index (ICC), Pearson correlation coefficient and principal component analysis (PCA) were also applied.

The comparison with foreign standards indicates that As, Cu, Pb and Zn are the metals that mostly exceed the reference limits of each country. In addition, M1, M5 and M14, are the samples that according to the "Evaluation Guide for Environmental Media (EMEG)" for the infant category require risk assessment, since they have 4 or more metals

involved in the growth of it. According to the results of soil quality index, metals which imply a higher contamination to almost all the samples are Pb and Zn.

In general, the most contaminated sites due to the high concentrations they present would be Oscar Bonilla/Barros Arana (M5) and Luis Beretta Poncel (M14).

In relation to the survey carried out, most of the population in Arica feels that information has not been reported or received correctly from the authorities. In addition, they believe that solutions so far have not been completely efficient.

As recommendations, it is necessary in the near future, to obtain information about the concentrations of suspended dust which exist on the roofs of the houses of Arica complementing it with meteorological studies of it. In addition, it is recommended to study the bioaccessibility of metals in the population.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Elementos traza metálicos

Los elementos traza metálicos se pueden definir como un grupo de elementos químicos que presentan una densidad relativamente alta ($\geq 5 \frac{g}{cm^3}$) y presentan una toxicidad para la salud del ser humano (Ferrer, 2017). Hoy en día varios autores prefieren hablar de estos como “elementos traza metálicos”, ya que, a pesar de que la mayoría de los contaminantes inorgánicos son “metales pesados”, a veces, la contaminación del suelo se puede producir por altas concentraciones de otros elementos mayoritarios como Na, Fe, o Al (Balmonte & col, 2010). Sin embargo, para mayor comodidad al momento de redactar y discutir este estudio, desde ahora simplemente se nombrarán como “metales”. Estos se encuentran naturalmente en la corteza de la Tierra, pero los procesos industriales como la minería producen un aumento en la exposición de los seres humanos hacia estos metales al dispersarlos a través del aire, del agua y los alimentos. Sus características más comunes son: persistencia, bioacumulación, biotransformación y elevada toxicidad, lo cual hace que se encuentren en los ecosistemas por largos periodos, ya que su degradación natural no es posible (Rodríguez, 2017).

Los definidos elementos se pueden clasificar en 2 grandes grupos: esenciales y no esenciales. En el primero se destacan los oligoelementos o micronutrientes, los cuales son requeridos en pequeñas cantidades, o cantidades traza por las plantas y animales, debido a que permiten completar el ciclo de vida de los organismos. Sin embargo,

cuando estos metales superan un cierto umbral en cuanto a concentración, se vuelven tóxicos. En este grupo se encuentra: cobalto (Co), cromo (Cr), cobre (Cu), hierro (Fe), níquel (Ni) y zinc (Zn).

El grupo de los no esenciales, son aquellos que carecen de función biológica, puesto que su presencia en cantidades mínimas en los seres vivos llegan a causar graves disfunciones orgánicas, además de resultar altamente tóxicos y con la posibilidad de acumularse en los organismos vivos. A esta categoría pertenecen: cadmio (Cd), mercurio (Hg), plata (Ag), arsénico (As) y plomo (Pb) (Moolenaar, S.W. y col, 1997).

1.2. Origen de los metales

Los metales pueden tener su origen de naturaleza geogénica, proveniente de procesos naturales de meteorización de las rocas y de ciclos biogeoquímicos, donde se encuentran erupciones volcánicas y disolución por aguas lluvias, entre otras; o también pueden ser de origen antropogénico, que derivan de actividades principalmente industriales, mineras y agrícolas (SAG, 2005). Generalmente, producto de estas actividades, los metales pueden verse convertidos en contaminantes potenciales para el agua, aire y/o suelo.

Según Shuman (1991), los metales presentes en el suelo se pueden encontrar en siete formas diferentes según el origen, características del metal, propiedades edáficas y de las condiciones ambientales. Estas formas son:

- En la solución del suelo como metal libre, formando complejos o asociados a coloides móviles.

- En las posiciones de intercambio de los constituyentes inorgánicos del suelo.
- Adsorbidos específicamente a los constituyentes inorgánicos.
- Adsorbidos a la materia orgánica insoluble.
- Precipitados en forma de carbonatos, fosfatos, hidróxidos, entre otros.
- En la estructura de los minerales secundarios.
- En la estructura de los minerales primarios.

Los metales que han sido introducidos a través de las actividades humanas suelen encontrarse en las cinco primeras formas, mientras que los metales de origen natural pueden presentarse en cualquiera de las formas mencionadas, relacionados con la formación y evolución del suelo. En ambos casos, la solución del suelo y las reacciones de equilibrio entre las diferentes fracciones representan los factores más importantes que determinan el comportamiento y la movilidad de estos metales.

1.3. Metales y su relación con el suelo

En general, según García, I. y Dorronsoro, C. (2005), los metales incorporados al suelo pueden seguir cuatro diferentes vías, como se observa en la Figura 1:

- Pueden quedar retenidos en el suelo, ya sea disueltos en la fase acuosa del suelo, ocupando sitios de intercambio o específicamente adsorbidos sobre constituyentes inorgánicos del suelo, asociados con la materia orgánica del suelo y/o precipitados como sólidos puros o mixtos. Desde la base fisicoquímica se sabe que los metales

precipitan como resultado de cambios en el pH, oxidación y otros cambios de su composición química.

- Pueden ser absorbidos por las plantas y así incorporarse a las cadenas tróficas. De acuerdo con Navarro-Aviñó (2007), las fases del proceso por el cual las plantas incorporan y acumulan metales son 3, donde implican el transporte de los metales (ayudada por la interacción de carga positivas por parte del metal con las cargas positivas de las raíces) al interior de la planta , al interior de la célula y para finalmente quedar retenidos en la vacuola. El consumo podría llegar a ser directo por parte de los humanos, o a través de diversos escalafones dentro de una cadena trófica.
- Pueden pasar a la atmósfera por volatilización, la cual puede ser a través de algunas bacterias y hongos mediante biovolatilización. llevando a cabo la metilación de metales pesados y metaloides como el Hg, As y Se (Covarrubias & col, 2015).
- Pueden movilizarse a las aguas superficiales o subterráneas.

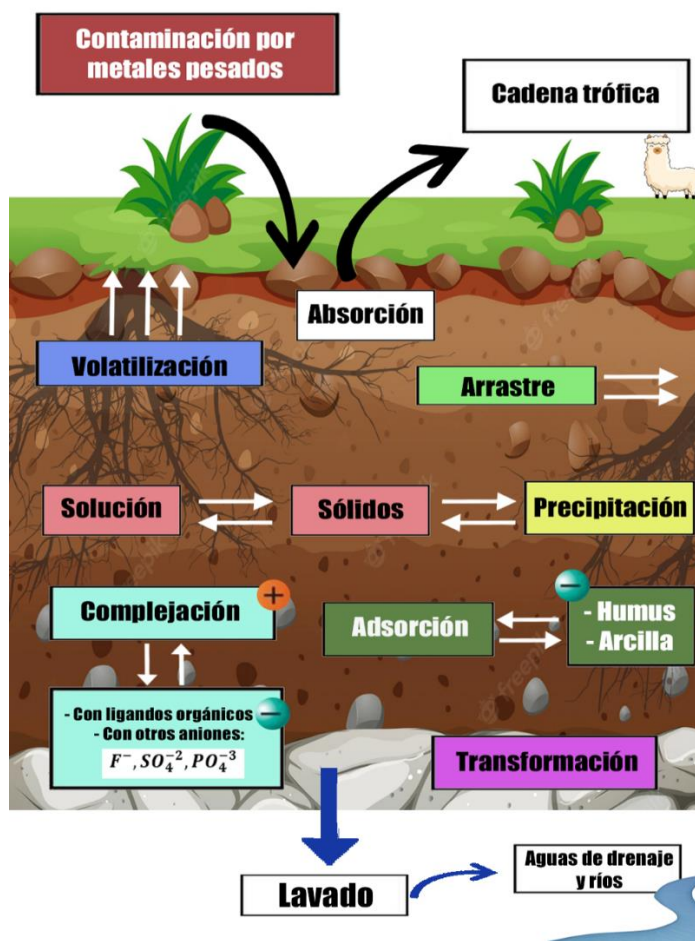


Figura 1: Dinámica de los metales en el suelo.

1.4. Principales parámetros que influyen en la biodisponibilidad de metales en el suelo

Las características del suelo cumplen un rol importante en reducir o aumentar la toxicidad de los metales. La distribución de los metales en los perfiles del suelo, así como su disponibilidad, está controlada tanto por parámetros como propiedades intrínsecas del metal y características de los suelos (Colombo & col., 1998).

Los metales suelen presentarse desde actividades industriales, donde en Chile, en gran medida es por parte de la minería. Los más vertidos son Mn, Zn, Cu, Pb, Ni, Mo, As, entre otros, de los cuales su grado de contaminación dependerá del estado en el que estén y las condiciones del medio, los cuales se describirán a continuación:

pH: Es uno de los parámetros que controla el comportamiento de los metales, ya que los cationes son más móviles cuando el pH de la solución del medio es ácido, pudiendo pasar a las cadenas tróficas, bien como tóxicos o en cantidades que producen deficiencia. En cambio, a pH básicos producen el efecto inverso, quedándose inmovilizados en el medio. Es por ello, que el pH es uno de los factores más importantes en cuanto a la biodisponibilidad de los metales.

En todos los metales (excepto Mo, Se y As), la biodisponibilidad de los metales disminuye en suelos con pH ácidos, debido a la precipitación como hidróxidos insolubles, carbonatos y complejos orgánicos (SAG, 2005, Silveira & col., 2003). Además, el pH del suelo tiene un efecto sobre la carga eléctrica de los componentes de la fracción $<2 \mu\text{m}$ que constituye a las arcillas, óxidos y materia orgánica humificada, las cuales poseen carga dependiente de este factor. Por lo tanto, a mayor pH, mayor es la retención de cationes metálicos y se reduce en suelos ácidos. En la Figura 2 se observa un ejemplo sobre cómo el pH puede afectar la biosorción de diferentes metales metálicos en un tipo de alga marina.

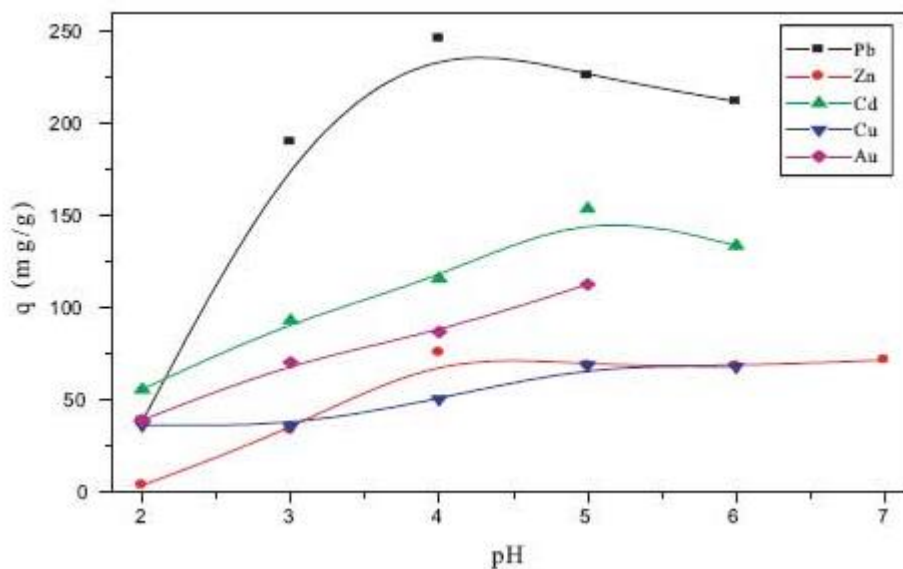


Figura 2: Ejemplo de un estudio acerca del efecto del pH en la biosorción de diferentes iones metálicos con el alga marina L13 (Cuizano & col, 2010).

Arcilla: La textura es una de las características fundamentales en la dinámica de los metales en el suelo, donde dentro de ello toma importancia la relación que lleva la proporción de arcilla con el contenido de metales en esta matriz. La arcilla tiende a adsorber los metales, ya que, como se ilustra en la Figura 3, estas se caracterizan por presentar cargas eléctricas negativas en su superficie, siendo responsables de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo. Esto hace que los metales queden retenidos en sus posiciones de cambio, disminuyendo su solubilidad y biodisponibilidad. Por el contrario, los suelos arenosos carecen de esta capacidad de fijación, donde pueden pasar rápidamente al subsuelo y así contaminar los niveles freáticos, aunque también algunos recubrimientos como óxidos o especialmente la materia orgánica, pueden llevar a incrementar en cierta medida la CIC (Pineda, 2004).

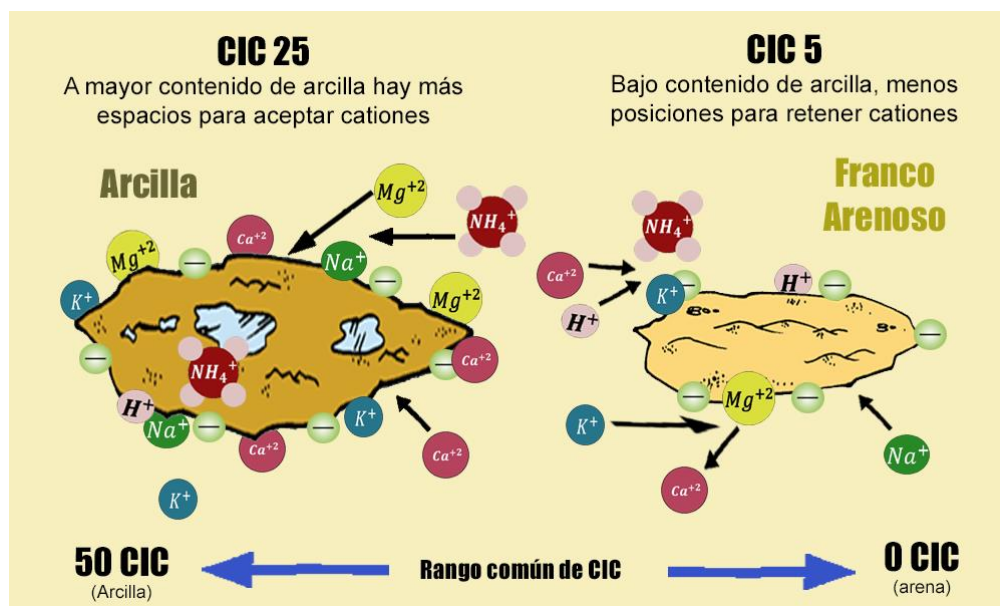


Figura 3: Visión esquemática del intercambio iónico

Materia Orgánica: La materia orgánica tiene una capacidad de fijación de iones aún más alta que la de las arcillas, quedando los metales en posición no biodisponible. Por otra parte, la materia orgánica reacciona con estos formando complejos de cambio y quelatos, y es por ello que, en suelos orgánicos, algunas plantas presentan carencia de ciertos elementos.

La toxicidad de los metales se potencia en gran medida por su fuerte tendencia a formar complejos organometálicos, lo que facilita su solubilidad, disponibilidad y dispersión. La estabilidad de muchos de estos complejos frente a la degradación por los organismos del suelo es una causa muy importante de la persistencia de la toxicidad. Pero también la presencia de abundantes quelatos puede reducir la concentración de otros iones tóxicos en la solución del suelo.



Figura 4: Ejemplo de sustrato arcillo-húmico adsorbiendo los elementos.

1.5. Efectos de metales en la salud de las personas

Los metales, como cualquier otro grupo de agentes químicos, pueden producir una patología aguda, desarrollada rápidamente tras el contacto con una dosis alta, o crónica por exposición a dosis baja a largo plazo. Los sistemas que mayormente pueden verse afectados por la presencia de metales en el cuerpo son el gastrointestinal, neurológico central y periférico, hemático y renal (Ferrer, 2003).

Una de las principales formas de exponerse hacia estos metales, se produce principalmente por la ingestión de material particulado de tamaño pequeño, correspondiente a partículas finas y ultrafinas. Estas presentan un riesgo para la salud debido a su entrada en el torrente sanguíneo desde los alvéolos pulmonares, mientras que las partículas más grandes ($>PM_{2.5}$) se retienen momentáneamente en los bronquios y bronquiolos y luego se expulsan de los cilios de las células epiteliales en el tracto respiratorio. Posteriormente, las partículas llegan al estómago, donde el ácido clorhídrico gástrico a un pH muy ácido de 2.0 solubiliza parcialmente los componentes que

constituyen la fracción bioaccesible del polvo que es la que se absorbe a través de la barrera gastrointestinal (Bradham & col., 2017).

Las patologías asociadas a la exposición hacia estos metales según la doctora Sandra Cortés de la Escuela de Salud Pública de la UC serían cáncer de pulmón, vejiga o riñón y también aumentaría el riesgo de aborto o el bajo peso al nacer (TERRAM, 2012 y Londroño – Franco, 2016). Además, por exposición prolongada a estos materiales, se incluyen trastornos en el desarrollo mental y/o intelectual de infantes (Muñoz & col., 2020, Moraga y col., 2020), enfermedades de origen cardiovascular, lesiones en la piel, trastornos vasculares y hasta la infertilidad (Tchernitchin y col., 2015, Moraga & col., 2020).

En particular, el Pb entra en el cuerpo humano por ingestión directa, por inhalación de polvo o por la cadena alimentaria. En el organismo se acumula principalmente en el tejido óseo, pero también en el hígado, medula renal y eritrocitos. Su principal vía de eliminación es la orina, aunque también se hará por las heces, sudor y leche materna. La intoxicación por este metal afecta al sistema hematopoyético produciendo anemia, al sistema nervioso central (SNC) produciendo encefalopatías y en casos extremos puede producir la muerte, debido, por ejemplo, a causantes graves como la encefalopatía por plomo, que incluye hinchazón cerebral y puede evolucionar a coma y la posterior muerte. Esta, no es una situación frecuente, pero puede ocurrir en niños expuestos accidentalmente a altos niveles de plomo.

Para el As, una intoxicación aguda puede llevar efectos inmediatos como náusea, vómito, diarrea, dolor abdominal, delirio, coma y convulsiones, entre otros. Una intoxicación crónica se puede derivar entre los más importantes, diabetes, aumento de

riesgo de cáncer de piel, pulmón, hígado y sistemas hematopoyéticos (Rodríguez, 2017), gangrena, vaso espasmo, entre otros (Hu H, 2019).

Cuando estos elementos se ingieren de alguna forma que se integren al tracto digestivo (que por lo general ocurre en niños), su absorción gastrointestinal varía en gran medida según el estado nutricional del hospedador y la forma química específica del metal. Una vez que éste se ha absorbido, se transporta en primera instancia por la sangre. Algunos órganos (por ejemplo, los huesos, el hígado y los riñones) almacenan metales en concentraciones altas, en términos relativos, durante años. La mayor parte de dichos elementos se excreta por vía renal o gastrointestinal, y en menor medida a través de otros factores como la saliva, transpiración, etc. (Hu H, 2019).

En las regiones de Arica y Parinacota y Antofagasta, el cáncer es la primera causa de muerte, con un 22,4% y un 29,0%, respectivamente, donde le siguen Atacama (20%) y Tarapacá (11,18 %) (Roco & col, 2013). Además, Arica y Parinacota, se encuentra dentro de las que tienen mayor incidencia de cáncer de pulmón (INE,2018), donde el porcentaje de este en la ciudad fue de 25,2% en 2009 (respecto a enfermedades de cáncer), el cual está sólo por debajo de la región de Antofagasta que corresponde a un 30,6%. Por su parte, Arica no es una región donde la minería sea la principal actividad económica para que exista de manera tan pronunciada esta patología, a diferencia de las regiones del norte del país mencionadas anteriormente (Roco & col, 2013).

1.6. Situación de matriz suelo en Chile

En Chile no existe una legislación que regule parámetros físicos y químicos en suelos y, por ende, este medio carece de protección legal (Cornejo, 2021), siendo así uno de los pocos miembros de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) que no cuenta con una, pese a que ciertas concentraciones anómalas de algunos de sus componentes podrían tener graves consecuencias tanto para el medio ambiente como para la salud de las personas. El Ministerio del Medio Ambiente analizó el 2011 la posibilidad de normar la matriz suelo, a través de un instrumento jurídicamente vinculante, para lo cual mandató la realización del estudio “Preparación de antecedentes para la elaboración de la norma de calidad primaria de suelos”. Debido a este estudio, en el año 2012 el Ministerio desarrolló un instrumento denominado “Guía Metodológica para la Gestión de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes”, que es una de las guías que será considerada en este trabajo. Dentro de su contenido, se encuentran los principales procedimientos involucrados en la gestión de suelos con potencial presencia de contaminantes (SPPC), ello en base a los principios de la evaluación de riesgo ambiental y ecológico (ERA y ERE), (MMA, 2018).

Sin embargo, según el observatorio parlamentario, universidades, gremios y ONG trabajan con senadores para redactar una futura Ley Marco de Suelos para así en cierto modo regular la degradación física, química y biológica de los suelos e impedir la pérdida de biodiversidad, como también mitigar los efectos del cambio climático y la contaminación (BCN, 2020).

Según el último informe diseñado para analizar los suelos en los territorios de todo el país, se detectaron 3314 sitios potencialmente contaminados (Analab, 2012). Es

importante mencionar que las mayores problemáticas por metales son, la contaminación por As en Quillagua (Antofagasta), por Cd en las regiones de Valparaíso y Metropolitana, por Zn en Diego de Almagro, Elqui, y por plomo en los valles de Aconcagua y Puchuncaví. También dentro de estos sitios contaminados, se encuentra la ciudad de Arica, que es donde se presentó una de las mayores problemáticas por contaminación de metales ocurridas en Chile, especialmente por Pb y As. Su respectiva contaminación por “polimetales”, causó daños en la salud de las personas que se vieron afectadas directamente, incluso en algunos casos llegando a ser irreparables.

1.7. Características generales de la ciudad de Arica

Arica se ubica en el norte de Chile ($18^{\circ}28'42''S$ $70^{\circ}19'16''O$), cuenta con 4799,4 km² de superficie y 221.364 habitantes (INE, 2018). La ciudad, se extiende sobre una extensa planicie costera que, debido a la inexistencia de la cordillera de la Costa y la presencia de valles al interior, permiten la extensión urbana de la ciudad. Tiene un clima seco pero moderado debido a sus altos niveles de humedad relativa promedio. Presenta muy escasas precipitaciones y una baja oscilación térmica tanto diaria como anual, donde sus temperaturas varían en promedio unos 5,5°C (CITUC, 2016).



Figura 5: Mapa ciudad de Arica con zona urbana demarcada. Fuente: Google Earth, 2022.

Los suelos en estas zonas correspondientes al norte grande de Chile se caracterizan por presentar un escaso desarrollo del perfil, donde los principales órdenes son Entisoles y Aridisoles (SAG, 2005). Los entisoles son suelos de escaso desarrollo, sin horizontes intermedios y con un horizonte superficial muy débil (Fredes & col., 2008). Los aridisoles se desarrollan en lugares secos, pueden tener una acumulación de carbonato cálcico, yeso o sales en el subsuelo y son de bajo contenido orgánico, limitando así el crecimiento de vegetación (Guerra & col., 2003).

La ciudad limita con Perú mediante la ciudad de Tacna, y tiene gran relación comercial con Bolivia, dado que existió un tren con un tramo de línea férrea que unía el

Puerto de Arica con la localidad de La Paz indicado en la Figura 6, lo que trajo consigo gran movimiento de minerales en aquel tramo, provocando contaminación del suelo. Ante ello, en 2007, con motivo de remediar estos suelos contaminados en territorio chileno se presenta un proyecto llamado “Remediación de Suelos para la Reparación y Rehabilitación de la Vía Férrea Arica – Visviri”, el cual contemplaba remover y trasladar hasta un relleno de seguridad, 60200 m³ de suelo contaminado. Además, se contemplaba la confinación *in situ* de 40000 m² de suelo (EFE, 2007). Sin embargo, no se puede concluir algo acerca de este proyecto dado que no hay mayores antecedentes de seguimiento y fiscalización.

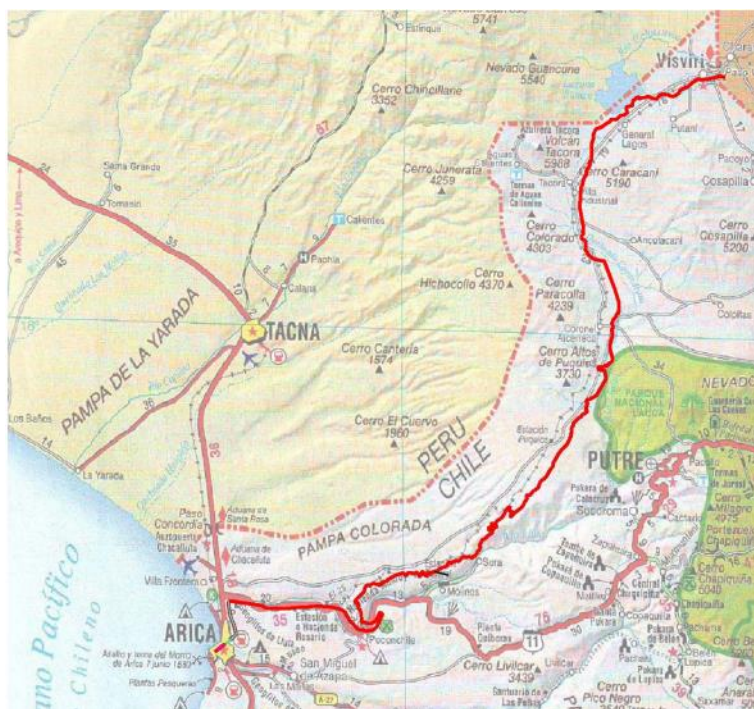


Figura 6: Mapa con tramo demarcado de ferrocarril Arica – Visviri. Fuente: DIA Saneamiento Suelos Vía Férrea Arica – Visviri.

Otra actividad importante ligada a lo anterior es el terminal puerto de Arica, donde dentro de sus funciones, se encuentra el embarque y acopio de graneles de minerales. En

abril de 2021 la Superintendencia del Medioambiente (SMA), formula cuatro cargos contra esta empresa. Los cargos graves fueron 2, donde uno es por el mal funcionamiento de lo mencionado anteriormente, y el otro tiene relación con las deficientes operaciones en uno de sus almacenes, provocando en ambos casos, la fuga de material hacia el exterior, lo que podría llevar consigo nuevamente contaminación de metales hacia la ciudad, ya que, mediante análisis, se pudo constatar la dispersión y arrastre de concentrado de zinc y plomo hacia el exterior del almacén, evidenciando también la presencia de cobre y Caso Polimetales Arica.

1.7.1. Cronología y descripción del caso polimetales en Arica

Entre 1984 y 1985 se utiliza una zona específica de la ciudad como lugar de acopio de desechos con altos contenidos de plomo y arsénico provenientes de Suecia e ingresados al país por la empresa Procesadora de Metales Ltda. (Promel), los cuales fueron catalogados como “barros con contenidos minerales”. Esto ocurrió con diversas irregularidades, y según informó la empresa en su momento, los desechos no presentaban peligro para la salud al no ser tóxicos y podían ser manipulados por cualquier persona (CONAMA, 2009), lo que resultó no ser cierto en lo absoluto, dados los graves efectos que comenzaron a presenciarse en la población aledaña al lugar. Las personas, especialmente los niños que vivían en las cercanías donde se encontraban los desechos, al no saber que era un peligro y al tener forma de un cerro de arena, iban a jugar en él, por lo que tenían constantemente contacto de alguna manera con los contaminantes. Las vías de exposición, incluyen la inhalación e ingestión de material particulado fino, contacto dérmico con el suelo e ingestión accidental de suelo (CITUC, 2016).

En la década de los 90', entre 1985 y 1995 posterior al cierre de esta empresa, en el espacio contaminado por las actividades de PROMEL hubo procesos de autoconstrucción y "tomas de terreno", especialmente en las poblaciones de Cerro Chuño y Zica-Zica, zona que fue nombrada posteriormente "Sitio F". También, en su mayoría fue utilizado por el Gobierno Regional y el Ministerio de Vivienda para ubicar hogares destinados a la población vulnerable, aunque bajo condiciones irregulares, dado que estas fueron construidas sobre un terreno que se ocupaba como basural, en un sector industrial fuera del barrio urbano, sin permiso municipal, sin saneamiento y sin fiscalización del departamento de obras del municipio (Programa Contacto, agosto de 2009). Además, el terreno se encontraba alrededor de varias fuentes de contaminación, como el vertedero municipal, y algunas industrias que producen ácido sulfúrico, secadoras de pescado, entre otras (Martinic, 2000). Poco tiempo después de habitadas, la población empezó a manifestar síntomas de envenenamiento por plomo y arsénico, como los mencionados anteriormente.

Debido a lo anteriormente dicho, en 1996 el Servicio de Salud Arica comenzó a hacer gestiones para retirar los acopios del lugar donde se encontraban. En 1997, a través del ISP se analizó el contenido de este relave, dando como resultados 61940 mg kg^{-1} de arsénico, 20800 mg kg^{-1} de zinc, 19000 mg kg^{-1} de cobre, 6000 mg kg^{-1} de plomo, 1900 mg kg^{-1} de mercurio y $191,2 \text{ mg kg}^{-1}$ de cadmio. Ante esto, en 1998 mediante una resolución del mencionado ente, se trasladan los residuos a un lugar transitorio. Luego, se decidió llevar los residuos a un sector denominado Quebrada Encantada que, según lo indicado por SERNAGEOMIN, cumplía las condiciones geológicas para lo

indicado. El traslado completo de los residuos finalizó en marzo de 1998, los cuales fueron protegidos por una lámina plástica resistente y sobre ella una cubierta protectora de suelo, levantándose, además, un cierre perimetral de albañilería con portón metálico y señalización adecuada (CONAMA, 2009).

En 1999 se finalizó la construcción y entrega de nuevas viviendas sociales en la zona y se levantó el cierre perimetral del Sitio F, nivelándose la superficie del terreno y cubriéndolo transitoriamente con una capa arcillosa de 20 cm de espesor, con la finalidad de impedir la dispersión del suelo contaminado por el viento.

En la figura 7, se observa dónde se encuentran ubicados actualmente estos residuos que se trasladaron en 1998 y también se muestra el sitio F con los sitios que mayormente fueron afectados a su alrededor por la contaminación de los desechos metálicos.



Figura 7: Zonas más afectadas cercanas al sitio F por contaminación de polimetales.

Fuente: BBC News Mundo, 2021.

Más de 2 décadas después del acontecimiento, específicamente en 2009, hubo un reconocimiento oficial de la gravedad de la situación en el documento principal del “Programa Maestro de Intervención en Zonas con presencia de Polimetales en Arica”. Este Plan Maestro, además de reconocer oficialmente el problema, indicó una serie de medidas de intervención en el territorio, lo cual vendría siendo parecido a un “plan de descontaminación”, ya que no bastaba con solamente trasladar los residuos hacia un lugar seguro.

Dentro de este plan, el Ministerio de Salud ordenó y tomó 4 992 muestras de sangre a pobladores de sectores en los cuales existió el acopio de metales, como asimismo a trabajadores portuarios que manipularon los cargamentos del material traído desde Suecia. Dado que este caso sufrió y sigue sufriendo de diversas irregularidades, es que las muestras de sangre se extraviaron. Según las conclusiones de contraloría en su INFORME FINAL N° 37, DE 2009, se “verificó que el computador que contenía las planillas de control se dio de baja”, donde los respaldos de información obtenidos y entre otros antecedentes no fueron hallados. Ante ello, se estableció que no era posible determinar quiénes fueron las 4.992 personas que se tomaron las respectivas muestras de sangre.

Finalmente, el llamado “Programa Maestro” se convirtió en ley (N°20590) y entró en ejecución en 2013. En este proceso, el proyecto de ley sufrió numerosas modificaciones y su resultado final no fue aprobado por las organizaciones involucradas, pero sigue en pie realizándose actualmente algunas de las obras que contempla. Dentro de la variada información que contiene este documento, se tiene un estudio acerca de las concentraciones de metales en diversos puntos de la ciudad, evidenciando que en algunas zonas de la ciudad de Arica hay contaminación de Plomo y Arsénico, poniendo como límites estándares internacionales, ya que en Chile estos hasta la fecha, como se dijo anteriormente, estos parámetros no se encuentran regulados.

En cuanto a los contaminantes y su evolución en el tiempo, dado lo tardío de la toma de acciones para resolver el problema, y debido a que durante el horario de la tarde se presentan las mayores velocidades de viento, incluso con presencia de eventos inusuales como “tormentas de arena” (la última ocurrida en 2016), estos podrían haberse trasladado hacia otros lugares de la ciudad, debido al levantamiento de material

particulado y posterior deposición en el suelo. Es importante recalcar que el suelo es un receptor geoquímico para los contaminantes y llega a ser un regulador natural que controla el transporte de elementos químicos y sustancias a la atmósfera, hidrósfera y biota (SAG, 2005). Por ello, es la relevancia de la correcta medición de metales en este medio, ya sea de manera preventiva o por eventos y/o actividades que sean fuente de posibles contaminantes.

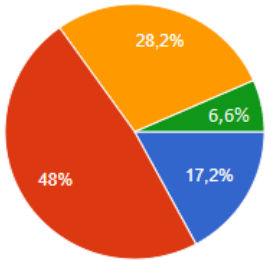
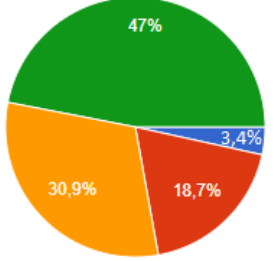
Es por esto, que es necesario obtener las concentraciones de metales de interés en los suelos después de varias décadas, especialmente de aquellos responsables de generar daños en la población y los cuales superaban considerablemente los límites expuestos en algunas zonas, como los son plomo y arsénico.

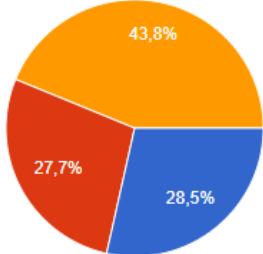
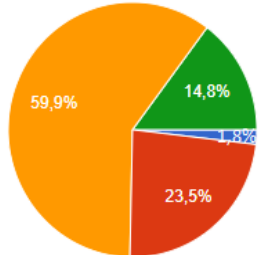
1.7.2. Encuesta realizada a la población de Arica

Con motivo de conocer la visión de la población respecto a la anteriormente descrita problemática de polimetales en Arica, se realiza la llamada “ Encuesta para seminario de título: Análisis de concentración de metales en suelos de la ciudad de Arica (caso “Polimetales”)”, la cual fue totalmente anónima y constó de 9 preguntas cortas con alternativas únicas o múltiples según era el caso en cada una de ellas. Se aplicó casi en su totalidad de manera on-line mediante la plataforma “Formularios de Google”, a excepción de algunas encuestas que fueron hechas de manera presencial especialmente a personas de mayor edad. Las personas encuestadas fueron 379 en total, todas mayores de 15 años y sin límite de edad. El 68,6% de la población encuestada fue del sexo femenino y un 31,1% masculino.

Esta encuesta se basa en el estudio realizado por la Universidad de Tarapacá, llamada “Percepción de la población de la ciudad de Arica acerca de las medidas adoptadas por el estado de Chile a raíz del problema de exposición a polimetales”, dado que hasta esa fecha no existía claridad sobre la opinión de la población respecto de los impactos de la aplicación de esta ley en su salud, luego de varios años desde su puesta en marcha (Moraga & col, 2020). Sin embargo, en la encuesta del presente estudio, se buscó especificar aún más en las preguntas, para poder tener una mirada más detallada acerca de la percepción y conocimiento de la población ya sea en temas de salud, legislación y de la problemática en sí.

Tabla 1: Primeras sección “ Encuesta para seminario de título: Análisis de concentración de metales en suelos de la ciudad de Arica (caso “Polimetales”)”

PREGUNTAS	GRÁFICO	ALTERNATIVAS										
1.- ¿Cuál es el nivel de conocimiento acerca de la problemática de polimetales en Arica?	 <table border="1"> <caption>Data for Question 1</caption> <thead> <tr> <th>Nivel de conocimiento</th> <th>Porcentaje</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Alto</td> <td>17,2%</td> </tr> <tr> <td>Medio</td> <td>48%</td> </tr> <tr> <td>Bajo</td> <td>28,2%</td> </tr> <tr> <td>No sé acerca del tema</td> <td>6,6%</td> </tr> </tbody> </table>	Nivel de conocimiento	Porcentaje	Alto	17,2%	Medio	48%	Bajo	28,2%	No sé acerca del tema	6,6%	<ul style="list-style-type: none"> ● Alto ● Medio ● Bajo ● No sé acerca del tema
Nivel de conocimiento	Porcentaje											
Alto	17,2%											
Medio	48%											
Bajo	28,2%											
No sé acerca del tema	6,6%											
2.- ¿Cuál es el nivel de conocimiento que tiene ud acerca de la Ley N° 20590?	 <table border="1"> <caption>Data for Question 2</caption> <thead> <tr> <th>Nivel de conocimiento</th> <th>Porcentaje</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Alto</td> <td>3,4%</td> </tr> <tr> <td>Medio</td> <td>18,7%</td> </tr> <tr> <td>Bajo</td> <td>30,9%</td> </tr> <tr> <td>Ningún tipo de conocimiento</td> <td>47%</td> </tr> </tbody> </table>	Nivel de conocimiento	Porcentaje	Alto	3,4%	Medio	18,7%	Bajo	30,9%	Ningún tipo de conocimiento	47%	<ul style="list-style-type: none"> ● Alto ● Medio ● Bajo ● Ningún tipo de conocimiento
Nivel de conocimiento	Porcentaje											
Alto	3,4%											
Medio	18,7%											
Bajo	30,9%											
Ningún tipo de conocimiento	47%											

3.- ¿Encuentra que ud ha sido afectado por esta problemática?		<ul style="list-style-type: none"> ● Si ● No ● Tal vez (No estoy seguro/a)
4.- ¿Cree ud que se ha informado correctamente a la población de Arica acerca del tema?		<ul style="list-style-type: none"> ● Sí, completamente ● Sí, pero aún falta que se de más información ● No, ha sido insuficiente ● No se ha informado nada a la población

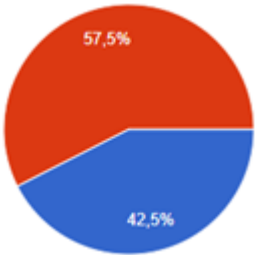
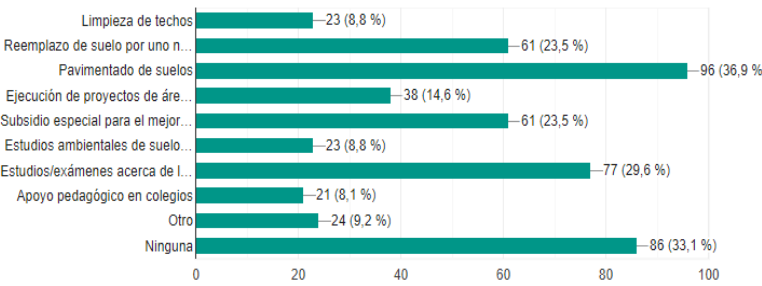
En las primeras 4 preguntas que se observan en la Tabla 1, se tiene que alrededor de la mitad de las personas encuestadas tienen un conocimiento medio acerca de la problemática de polimetales en la ciudad y una muy poca cantidad de personas no sabe acerca del tema. En cuanto a el conocimiento que se tiene sobre la Ley 20590, que “establece un programa de intervención en zonas con presencia de polimetales en la comuna de Arica”, sólo un 3,4 % de los encuestados tiene un alto conocimiento en esta y casi la totalidad tiene un conocimiento bajo (30,9%) o ningún tipo de conocimiento (47%). Esto nos indicaría que a pesar de que la mayor parte de la población sabe al menos algo sobre la problemática ambiental presente en la ciudad, no se tiene conocimiento sobre la ley que busca remediar esta.

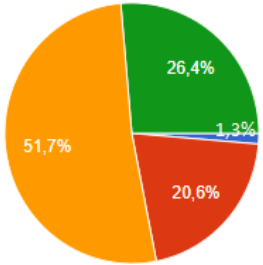
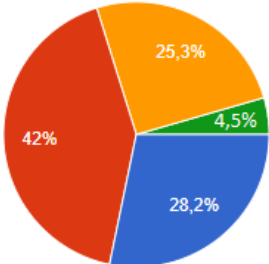
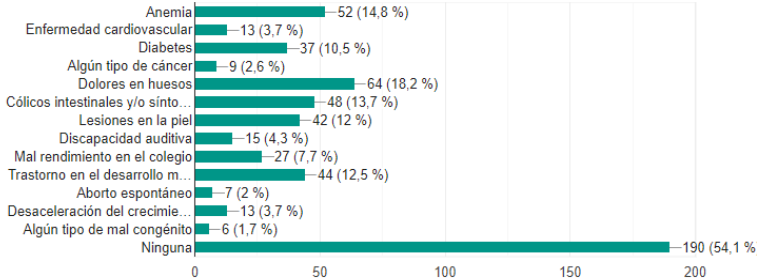
Los dichos resultados tienen bastante relación con las siguientes 2 preguntas, ya que como se observa en la pregunta 3, la mayoría no está seguro (43,8%) o siente que no ha sido afectado por esta problemática (27,7%). Además, alrededor del 60% piensa que la

información que se ha dado por parte de los encargados de ello, ha sido insuficiente, donde sólo un 1,8% responde que ha sido de forma completa.

Ante esto, se puede decir que la mayoría de población al no sentirse seguros o pensar que no han sido afectados por la problemática, tal vez no les interesaría ahondar aún más en cuanto a las remediaciones que se puedan dar o exigir de acuerdo con lo que se establece en la ley.

Tabla 2: Segunda sección “ Encuesta para seminario de título: Análisis de concentración de metales en suelos de la ciudad de Arica (caso “Polimetales”)”

<p>5.- ¿Tiene conocimiento de algún tipo de reparo/remediación que han hecho en su población o en las zonas afectadas? (por ejemplo, limpieza de techos, reemplazo del suelo, pavimentado, etc).</p>	 <p>● Si ● No</p>																																		
<p>6.- Si su respuesta anterior fue Si, ¿de cuál/es de las siguientes reparaciones/remediaciones/medidas tiene conocimiento ud que se han hecho en su población o en las zonas afectadas? (Puede escoger más de una).</p>	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Medida</th> <th>Número de respuestas</th> <th>Porcentaje</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Limpieza de techos</td> <td>23</td> <td>8,8 %</td> </tr> <tr> <td>Reemplazo de suelo por uno n...</td> <td>61</td> <td>23,5 %</td> </tr> <tr> <td>Pavimentado de suelos</td> <td>96</td> <td>36,9 %</td> </tr> <tr> <td>Ejecución de proyectos de área...</td> <td>38</td> <td>14,6 %</td> </tr> <tr> <td>Subsidio especial para el mejor...</td> <td>61</td> <td>23,5 %</td> </tr> <tr> <td>Estudios ambientales de suelo...</td> <td>23</td> <td>8,8 %</td> </tr> <tr> <td>Estudios/exámenes acerca de l...</td> <td>77</td> <td>29,6 %</td> </tr> <tr> <td>Apoyo pedagógico en colegios</td> <td>21</td> <td>8,1 %</td> </tr> <tr> <td>Otro</td> <td>24</td> <td>9,2 %</td> </tr> <tr> <td>Ninguna</td> <td>86</td> <td>33,1 %</td> </tr> </tbody> </table>		Medida	Número de respuestas	Porcentaje	Limpieza de techos	23	8,8 %	Reemplazo de suelo por uno n...	61	23,5 %	Pavimentado de suelos	96	36,9 %	Ejecución de proyectos de área...	38	14,6 %	Subsidio especial para el mejor...	61	23,5 %	Estudios ambientales de suelo...	23	8,8 %	Estudios/exámenes acerca de l...	77	29,6 %	Apoyo pedagógico en colegios	21	8,1 %	Otro	24	9,2 %	Ninguna	86	33,1 %
Medida	Número de respuestas	Porcentaje																																	
Limpieza de techos	23	8,8 %																																	
Reemplazo de suelo por uno n...	61	23,5 %																																	
Pavimentado de suelos	96	36,9 %																																	
Ejecución de proyectos de área...	38	14,6 %																																	
Subsidio especial para el mejor...	61	23,5 %																																	
Estudios ambientales de suelo...	23	8,8 %																																	
Estudios/exámenes acerca de l...	77	29,6 %																																	
Apoyo pedagógico en colegios	21	8,1 %																																	
Otro	24	9,2 %																																	
Ninguna	86	33,1 %																																	

<p>7.- ¿Cree que las soluciones han sido eficientes para reparar el daño?</p>		<ul style="list-style-type: none"> ● Sí, completamente ● Sí, pero no en su totalidad ● No, han sido insuficientes ● No se ha solucionado nada
<p>8.- ¿Qué nivel de conocimiento tiene acerca de las afectaciones en la salud que puede tener una exposición prolongada a metales como el plomo, arsénico, cadmio, mercurio, entre otros?</p>		<ul style="list-style-type: none"> ● Alto (Dominio en enfermedades, tipos de síntomas, tiempo de exposición, toxicidad, etc) ● Medio ● Bajo ● Ningún tipo de conocimiento
<p>9.- ¿Ha sufrido ud o algunos de sus hijos (si es que tiene) alguno de estos síntomas y/o enfermedades ¿ (Puede escoger más de una).</p>		

En las siguientes preguntas de la tabla 2, se tiene que el 57,5% no tiene conocimientos sobre alguna remediación que se haya hecho en la ciudad concordante con

la contaminación por polimetales, mientras que un 42,5% si lo tiene. Dentro de los que respondieron que si, respecto a la siguiente pregunta, en relación con las remediaciones indicadas por parte de la ley N°20590 (en teoría), la mayor parte de ellos tiene algún indicio en cuanto a remediación de pavimentado de suelos (36,9%), estudio/exámenes acerca de la salud de las personas (29,6%), reemplazo de suelos (23,5%) y subsidio especial para el mejoramiento y reparación de viviendas (23,5%). En menor medida se tenía conocimiento de estudios ambientales de atmósfera o suelo (8,8%), limpieza de techos (8,8%), apoyo pedagógico en colegios (8,1%), u otro (9,2%). Estas respuestas van de acuerdo con la realidad, ya que generalmente se toman exámenes de sangre a las personas de las zonas afectadas para ver su evolución, además de contar con un centro de salud ambiental donde ello se aplica. El pavimentado y reemplazo de suelos es algo que está a la vista de todos y que aún se sigue haciendo, por lo que es esperable que tenga un mayor porcentaje de respuestas. Los estudios ambientales y el apoyo pedagógico en colegios son acciones que se dan de forma más privada o que no están a la vista de toda la población, por lo que se esperaban bajos porcentajes en estos. En cuanto a la limpieza de techos dado que al parecer se hicieron sólo una vez y se aplicó en área de viviendas muy acotada desde implementada la ley es probable que muy poca parte de la población se haya enterado de ello.

En cuanto a la efectividad de las soluciones que se han aplicado por el momento correspondientes a la ley N°20590, solamente el 21,9% de los encuestados cree han sido en algún grado efectivas. Por el contrario, dentro de los que creen que las medidas no han sido suficientes, más de la mitad responde que han sido insuficientes (51,7%) y un 26,4% cree que no se ha solucionado nada.

Por último, de acuerdo con el tema de la salud de las personas, las respuestas se presentan más divididas. La mayor parte de la población encuestada (en total 95,5%) tiene algún tipo de conocimiento ya sea en un nivel bajo (25,3%), medio (42%) o alto (28,2%) acerca de las afectaciones en la salud que puede tener una exposición prolongada a metales y solo el 4,5% no tendría ningún tipo de conocimiento. Entre los mayores síntomas y/o enfermedades que se estarían presentando en la población o en sus hijos, serían dolores en huesos (18,2%), anemia (14,2%), cólicos intestinales y/o síntomas gastrointestinales asociados (13,7%) y trastorno en el desarrollo mental (12,5%).

Dado que nos encontramos ante un universo de encuestados de un rango de edad entre jóvenes y adultos jóvenes, sorprende que el mayor porcentaje corresponda a dolores en los huesos. Además, igualmente sorprende que haya un alto porcentaje de trastorno en el desarrollo mental (que se asumirá mayormente en los hijos de los encuestados), ya que son síntomas o enfermedades que están fuera de lo común, a diferencia de la anemia o afecciones gastrointestinales, que se dan de forma más general en la población, independiente si se está presente en un lugar no contaminado o contaminado. Igualmente, de manera positiva, más de la mitad de los encuestados (54,1%) responde que no sufre de ninguna de las enfermedades o síntomas mencionados en la pregunta 9.

1.7.3. Normas de referencia internacional en caso polimetales Arica

Dado que los metales que estuvieron en mayores concentraciones en la ciudad en estudios anteriores correspondientes al llamado “Plan Maestro” fueron arsénico y plomo, es que estos particularmente se compararon con referencias internacionales. Se utilizó para

el plomo la establecida por la EPA de Estados Unidos siendo de 400 mg kg^{-1} en Pb y para el arsénico se utilizó la de diversos países como Australia, Italia y la Unión Europea, el cual es de 20 mg kg^{-1} . Según establece este estudio, no se utilizaron límites inferiores correspondiente a otros países como Canadá, dado que las concentraciones de los blancos o niveles basales estudiados en la ciudad, se encontraban alrededor o por sobre estos. Cabe destacar que la mayor parte de las normas referenciales de cada país, han sido desarrolladas de acuerdo con las distintas realidades geográficas, geológicas y antropogénicas asociadas a cada uno de ellos (AGQ, 2009), y por esto, es que las comparaciones con normas extranjeras (las aplicadas en Anexo 6) pueden llevar a tener conclusiones equívocas respecto a lo que se está estudiando, al ser zonas muy distintas una de otra, como lo son Estados Unidos o la región Europea, respecto a la ciudad de Arica y a Chile en general. Ante esto, la empresa AGQ labs, encargada en ese momento de analizar los suelos para CONAMA, recomienda hacer un estudio basal para así conocer la real condición del suelo local en cuanto a su composición química, comparando los posibles resultados en función de datos referencia representativos y no en función de normas internacionales, donde las condiciones difieren totalmente de la realidad de la ciudad. Es por ello también, que, si los límites hubieran sido un poco más estrictos, las zonas “contaminadas”, hubieran sido de mayor proporción, en comparación con las mostradas en mapas que se verán posteriormente.

1.7.4. Naturaleza de los metales de interés en el caso Polimetales

Tal como se mencionó anteriormente, los principales elementos involucrados en la problemática de polimetales de Arica, son el Plomo y el Arsénico.

El plomo, se presenta de forma natural como minerales de galena (PbS), cerusita (PbCO₃) y anglesita (PbSO₄), si es que están presentes en la roca madre. De forma antropogénica, llega a los suelos a partir de residuos industriales y de la minería. En tiempos previos a la minería y el uso del plomo, sólo existían de por sí, trazas del metal en las capas terrestres que provenían del polvo atmosférico, alcanzando 0,5 ng/Kg. Sin embargo, durante la era romana aumentó a 2 ng/Kg, debido a la posible fundición de alrededor de 80.000 toneladas anuales de plomo. Con la caída del imperio “Romano de Occidente” luego del 400 DC, el nivel bajó a rangos prehistóricos (Romero, 2017), donde cientos de años después, debido a su intenso uso en la gasolina, se produjo un notable incremento de este entre los años 1950 y 2000. En el suelo se le puede inmovilizar gracias a la materia orgánica y la arcilla, pero si hay pH ácido el Pb es móvil quedando disponible para las plantas, como se observa en la Figura 8.

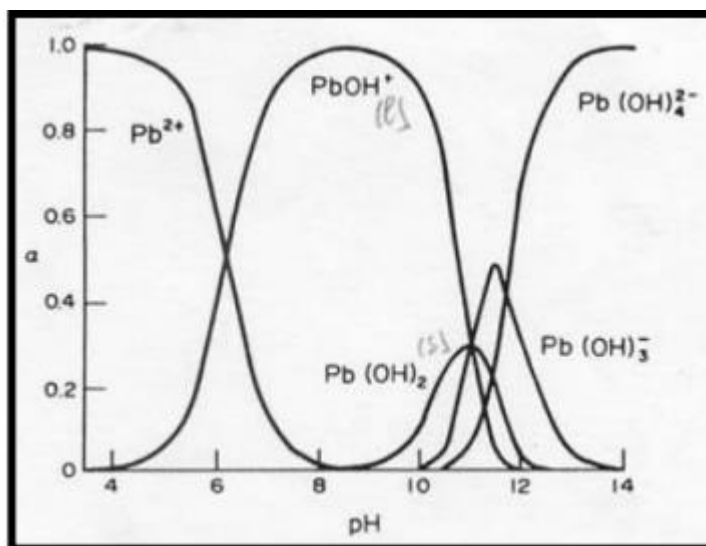


Figura 8: Diagrama de distribución de especies plomo/hidróxido. (Fuente: Burriel, 1967)

En cuanto al arsénico, se utiliza para la fabricación de vidrio, como pigmento, insecticidas, entre otros. Ocupa el lugar 20 en abundancia de los elementos en la corteza terrestre y se distribuye de manera no uniforme por todo el mundo, dependiendo de la región geográfica, características geoquímicas del suelo y actividad industrial (Mandal y Susuki, 2002).

La cantidad de As en el suelo dependerá del pH y actividad biológica, estando su disponibilidad para las plantas restringida por la presencia de hierro, arcilla y materia orgánica. Este elemento puede permanecer en dos estados de oxidación, como arsenito (AsO_3) o como arseniato (AsO_4). Este último estado es el más habitual en condiciones de campo y laboratorio; además de ser el más susceptible de ser adsorbido por las partículas del suelo (Violante y Pigna, 2002), teniendo en cuenta la presencia de los elementos dichos anteriormente. Las altas concentraciones de arsénico en agua y suelo se han convertido en un problema global, ya que las exposiciones prolongadas a este metaloide pueden causar daños crónicos a la salud, y se clasifica como uno de los elementos químicos más tóxicos y carcinogénicos. Es por ello que, dada la importancia de lo dicho anteriormente, se plantean los siguientes objetivos.

1.8. Objetivo General

- Determinar concentraciones de metales (Al, As, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Fe, Mo, Hg, Pb, Zn) de los suelos de la ciudad de Arica, para así obtener información sobre el estado actual de estos en relación con la problemática de contaminación por Polimetales.

1.8.1. Objetivos específicos

- Determinar sitios de muestreo de acuerdo con información histórica aproximada del evento contaminante ocurrido.
- Caracterizar fisicoquímicamente los suelos en estudio.
- Determina concentraciones totales de los metales seleccionados.
- Relacionar y discutir las concentraciones obtenidas con algunas normas internacionales.
- Estimar el enriquecimiento de las concentraciones de metales respecto a un nivel basal mediante el índice de geoacumulación (Igeo), factor de enriquecimiento (FE) y el índice de carga contaminante (ICC).
- Comparar concentraciones obtenidas con normas extranjeras y EMEG.
- Determinar posibles correlaciones de cada metal respecto a variables fisicoquímicas.
- Obtener información de la población de la ciudad mediante encuestas para observar su nivel de conocimiento respecto a la problemática de contaminación por polimetales en Arica, además de conocer su conformidad respecto a las acciones llevadas a cabo para descontaminar la ciudad.

II. METODOLOGÍA

2.1. Área de estudio y descripción de los sitios.

El sitio estudiado se ubica en la ciudad de Arica, específicamente en la zona urbana, donde las características del muestreo están descritas en el Anexo 2. La toma de muestras se realizó en 2 periodos correspondientes a marzo y julio del año 2021, recolectando 16 sitios posiblemente contaminados y un posible “blanco” como se muestra en la Figura 9, los cuales se encuentran geo referenciados en el Anexo 2.



Figura 9: Imagen satelital (Google Earth, 03/01/22) de la ciudad con los sitios muestreados.

2.2. Extracción de muestras de suelo en la ciudad de Arica

Se aplicaron metodologías basadas en guías y estudios nacionales e internacionales como: “método de análisis recomendados para los suelos de Chile”

(Revisión 2006), la “Guía de muestreo y de análisis químicos, para la investigación confirmatoria y evaluación de riesgo en suelos/sitios con presencia de contaminantes”, el libro “SUELOS: Guía de prácticas simplificadas en campo y laboratorio, de la Universidad Piloto de Colombia” (Lorenzo-Rivas, 2018), entre otros.

Además, se procedió a la búsqueda de información para hacer una recopilación de las características del suelo y los sitios que se requerían analizar, para luego poder seleccionar aquellos donde mayor representatividad se tuviera, y donde el acceso sea lo mejor posible. También, se consideró que el muestreo permita obtener conclusiones, que la toma de muestra sea confiable y que la evaluación sea costo-efectiva.

Para la toma de muestras se realizó una calicata de entre 10 y 15 cm de profundidad, tomando 3 puntos aleatorios dentro de un cuadrante de 1 x 1 m de área. Para el envasado, se utilizaron bolsas plásticas (tipo “Ziploc”). En la identificación de las muestras, se dispuso de etiquetas en la parte exterior del envase elegido, las cuales contenían información como: codificación de la muestra (número), ubicación de colección, nombre proyecto, nombre de la persona que realiza el muestreo, fecha y hora de colección, características del suelo, profundidad de muestreo y análisis solicitado.

Se dispuso de elementos para hacer más seguro el muestreo como guantes con puntos pvc, mascarilla, bloqueador Solar ≥ 50 fps, gorro, zapatos cómodos, y elementos de trabajo como cinta métrica, pala de mano, lápiz, bloc de hojas tamaño cuadrícula, bandejas de plástico, bolsas tipo “Ziploc” y agua destilada.

En cuanto al tipo de cuidado que deban tener las muestras de suelos, para el caso de análisis de metales, no se deben tener restricciones adicionales en cuanto a temperatura

o tiempo de conservación, como lo requieren otros parámetros que se muestran en la tabla

3.

Tabla 3: Recipientes, temperatura de preservación y tiempo de conservación de muestras ambientales para los parámetros correspondientes (MINAM, Ministerio del Medioambiente de Perú, 2014).

Parámetro	Tipo de recipiente	Temperatura de conservación	Tiempo máximo de conservación
COV's	Frasco de vidrio boca ancha, con tapa y sello de teflón	4°C	14 días
BTEX			
Hidrocarburos Fracción Ligera			
Hidrocarburos Fracción Media			
Hidrocarburos Fracción Pesada			
COSV's y Plaguicidas			
Metales pesados y Metaloides	Bolsa de polietileno densa	Sin restricciones	Sin restricciones
Mercurio (Hg)	Frasco de vidrio con tapa de teflón	4°C	14 días
PCB	Viales de vidrio con cierre de teflón	4°C	14 días
PAH	Viales de vidrio con cierre de teflón	4°C	14 días

2.3. Materiales de laboratorio

- Bandejas plásticas
- Bureta 25 mL.
- Cronómetro digital.
- Embudos analíticos.
- Espátulas.
- Filtros de PDVF de 0,22 μm
- Frascos de polietileno de 150 mL.
- Guantes de nitrilo para procedimiento.
- Gradillas.
- Jeringas plásticas desechables de 5 mL.
- Magneto.
- Matracas de aforo de 10, 100, 250, 500 y 1000 mL.
- Matracas Erlenmeyer 250 mL.
- Navecillas plásticas.
- Pala de plástico.
- Parafilm
- Pinza de bureta.
- Pipeta total de 5 mL.
- Pipetas Pasteur.
- Probeta de 10, 50, 100 y 1000 mL.
- Propipeta.
- Soporte universal.
- Tamiz malla luz diámetro 2 mm (Humboldt Mfg. USA Standard Sieve).
- Tamiz malla de luz diámetro 63 μm (USA Standard Testing Sieve, VWR).
- Termómetro digital.
- Tubos de centrifuga de 15 mL.
- Tubos de teflón Kevlar.
- Vasos de precipitado de 50, 100, 250 y 500 mL.

2.4. Equipos de laboratorio

- Agitador magnético-térmico (Velp® Scientifica).
- Agitador orbital (Already Enterprise Inc, modelo DSR-2800^a).
- Balanza analítica (Shimadzu modelo AUX 220).
- Balanza granataria (Acculab® modelo V-600).
- Centrífuga (Boeco Germany, modelo U-320).
- Desionizador (Millipore Simplicity).
- Destilador (VELP® Scientifica, modelo UDK 127).
- Espectrómetro de Absorción Atómica (Shimadzu, modelo AA-6800, equipado con auto sampler ASC-6100 y software wizAArd).
- Electrodo de platino (HANNA, modelo HI 111).
- Estufa (Electro Termostathic Oven, modelo DHG-9147^a).
- Estufa (Electro Termostathic Oven, modelo DHG-9147^a).
- Microondas (CEM, Mars MarsXpress, modelo Mars 240/50 n°907511).
- pH-metro y conductivímetro (HANNA, modelo HI 9813 portable).
- Potenciómetro con electrodos de Platino “Hanna HI 3831 B”.

2.5. Preparación de material

2.5.1. Lavado material para caracterización fisicoquímica de suelos.

El material utilizado para realizar la caracterización fisicoquímica de los suelos, se sometió a un protocolo de limpieza, con el fin de evitar y descartar una posible contaminación y consistió en lavar material con Extran® Merck, luego enjuagar con abundante agua potable, cinco veces con agua destilada y, por último, cinco veces con agua desionizada de grado Milli-Q.

Al material utilizado para el análisis de las muestras con los metales a estudiar, se le aplicó un protocolo de limpieza especial, en el cual primero se lavó el material con Extran® Merck, se enjuagó con agua potable y luego 3 veces con agua destilada. Luego, se agregó una solución al 10% de ácido nítrico (HNO_3) 65% suprapur® p.a Merck), dejándolo reposar durante 48 horas, bajo campana (diluir 154 mL de (HNO_3) a 1 L con agua desionizada de grado Milli-Q). Finalmente, se enjuagó 10 veces con agua destilada y 10 veces con agua desionizada de grado Milli-Q.

2.5.1. Lavado material para análisis de metales.

Al material utilizado para el análisis de las muestras, se le aplicó un protocolo de limpieza especial, en el cual primero se lavó el material con Extran® Merck, se enjuagó con agua potable y luego 3 veces con agua destilada. Luego, se agregó una solución al 10% de ácido nítrico (HNO_3) 65% suprapur® p.a Merck), dejándolo reposar durante 48 horas, bajo campana (diluir 154 mL de (HNO_3) a 1 L con agua desionizada de grado

Milli-Q). Finalmente, se enjuagó 10 veces con agua destilada y 10 veces con agua desionizada de grado Milli-Q.

2.6. Caracterización Físicoquímica de Suelos de Arica.

Para el análisis de estas muestras de suelos se siguieron los protocolos experimentales detallados para ello, los cuales son descritos en orden a continuación.

Como paso previo, a las muestras recolectadas se le eliminaron los elementos más grandes a simple vista, como piedras pequeñas, ramas, residuos y/o materiales anexos a la matriz de estudio. Luego, estas fueron tamizadas a dos fracciones de diferente tamaño:

a) Fracción menor a 2 mm: Se procedió a tamizar la muestra a través de un tamiz de luz de malla de 2 mm donde se agitó durante al menos 3 minutos en un agitador de tamices, donde posteriormente se almacenaron en frascos plásticos previamente rotulados.

b) Fracción menor a 63 μm : Se tomó parte de la fracción menor a 2 mm y se procedió a tamizar a través de un tamiz de luz de malla de 63 μm donde se agitó durante al menos 5 minutos en un agitador de tamices, almacenándose posteriormente en tubos de centrífuga de 50 mL.

2.6.1. Textura

La textura del suelo se determinó mediante el método de la pipeta, aplicando la Ley de Stock. Se masaron 100 g de suelo correspondientes a la fracción < 2 mm y se traspasó a un frasco de polipropileno blanco de 100 mL en conjunto con agua destilada agitándola manualmente hasta obtener una suspensión. Se le adicionó 30 mL de solución

oxalato de sodio saturado (Merck, p.a.) y se trasvasijó a una probeta de 1 L. Se completó el volumen faltante con agua destilada. Se midió la temperatura de la solución con un termómetro digital y se estimó la constante de velocidad (K) y su velocidad de sedimentación (Anexo 4).

Luego, se invierte la probeta tres veces y se coloca sobre una superficie plana. Con ayuda de una micropipeta se tomó alícuotas de 10 mL con respecto a los tiempos obtenidos por la ecuación 1, de las cuales se depositó en vasos precipitados de 50 mL previamente masados y llevados a estufa a 105 °C por 24 horas. La primera alícuota tomada correspondió a una mezcla de limo y arcilla, en cambio la segunda alícuota correspondió solo a arcilla, donde la cantidad de arena se estimó por diferencia.

$$V = k * d^2$$

Ecuación 1

2.6.2. Color

Para determinar el color de cada muestra, se aplicó el sistema de ordenación del color de Munsell, en el cual se ocupa la llamada tabla de Munsell, clasificando el suelo mediante los parámetros de matiz, valor y croma.

2.6.3. pH y Conductividad Eléctrica.

Se masó $20,00 \pm 0,01$ g de cada muestra en frascos plásticos. Después a cada frasco se le agregó 50 mL de agua desionizada y posteriormente se dejó en un agitador orbital durante 2 horas a 150 rpm. Luego, se agitaron los frascos de forma manual, donde se

dejaron reposar por 5 minutos y se obtiene registro del pH mediante el equipo multiparamétrico previamente calibrado con soluciones buffer de pH 4 y 7. Después de 30 segundos de espera, se registra la conductividad eléctrica en la suspensión. Finalmente se lava el electrodo con agua desionizada luego de medir cada muestra.

2.6.4. Factor de humedad

Se agrega cierto volumen de suelo en un vaso precipitado de 50 mL de cada muestra, los cuales se colocaron en una estufa a $105,0 \pm 0,1$ °C durante 24 horas. Luego la muestra se dejó enfriar a temperatura ambiente en una desecadora para después ser masada.

2.6.5. Carbono Orgánico Fácilmente Oxidable (CO).

Para la preparación de la digestión con dicromato de potasio se siguió el procedimiento de Walkley y Black (Sadzawka A. y col 2006), el cual involucra una combustión húmeda de la materia orgánica con una mezcla de dicromato de potasio y ácido sulfúrico. Después de la reacción, se tituló la disolución del dicromato que no reaccionó con sulfato de hierro (II).

Para la preparación de la digestión con dicromato de potasio se siguió el procedimiento de Walkley y Black (Sadzawka A. & col 2006), el cual involucra una combustión húmeda de la materia orgánica con una mezcla de dicromato de potasio y ácido sulfúrico. Después de la reacción, se tituló la disolución del dicromato por retroceso con sulfato de hierro (II).

Reactivos y solventes:

- Dicromato de potasio 0,1667 mol·L⁻¹. Se disolvió 49,04 g de $K_2Cr_2O_7$ (Merck p.a.) en agua y se completó a 1 L.
- Sulfato de hierro (II) 0,5 mol·L⁻¹. Se disolvió 140 g de $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ (Merck p.a.) en agua, luego se agregó 80 mL de ácido sulfúrico concentrado (Merck p.a.), se enfrió y se completó a 1 L.
- Ácido fosfórico concentrado 85% (Merck p.a.).
- Ácido sulfúrico concentrado al 96% (Merck p.a.).

Procedimiento experimental:

Se transfirió $1,0 \pm 0,01$ g de cada muestra de suelo tamizado a 2 mm a un matraz Erlenmeyer de 250 mL junto con un blanco para estandarizar la disolución de sulfato de hierro (II). Se agregó 10 mL de dicromato de potasio 0,1667 mol·L⁻¹ bajo campana y posteriormente con precaución 20 mL de ácido sulfúrico concentrado. Enseguida se agitó manualmente por un minuto y se dejó reposar durante 30 minutos. Posteriormente se añadió 10 mL de ácido fosfórico concentrado y se añadieron 180 mL de agua desionizada. Finalmente, se tituló potenciométricamente con $FeSO_4$ 0,5 mol·L⁻¹ utilizando un electrodo de platino.

2.7. Análisis de Elementos Metálicos en suelos de Arica.**2.7.1. Digestión ácida de las muestras.****Procedimiento experimental:**

La digestión de las muestras para la determinación de metales en la fracción total se llevó a cabo por microondas en tubos recubiertos de teflón PFA de 55 mL. A cada tubo

se le agregó 250 mg de suelo con 4 mL (HNO_3) 65% (suprapur® Merck), 3 mL HCl 65% (suprapur® Merck) y 3 mL HF 40% (suprapur® Merck). Esto fue realizado para todos los sitios junto con dos blancos. Una vez sellados los tubos, y dispuestos en el plato giratorio, se inició el proceso de digestión de acuerdo con las condiciones presentadas en la Tabla 4.

Tabla 4: Condiciones del microondas para la digestión de muestras de suelo.

Parámetro	Etapa 1	Etapa 2
Máxima potencia	800 W	400 W
Potencia	80 %	80 %
Rampa	4 min	4 min
Temperatura	175 °C	175 °C
Enfriamiento	4 min	4 min

Terminada la digestión, las muestras se dejaron enfriar tapadas a temperatura ambiente durante 30 minutos. Luego se le agregó 12 mL de (H_3BO_3) al 5 %m/V para neutralizar la disolución, se filtró con filtros de jeringa de tamaño de poro 0,2 μm y se almacenaron las disoluciones refrigeradas en tubos de centrifuga hasta su posterior análisis por EAA.

2.7.2. Curva de calibración metales.

Se prepararon las curvas de calibración de Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Zn, previo a su respectiva determinación total mediante espectrofotometría de absorción atómica.

Para este procedimiento se tuvieron como reactivos, ácido nítrico (HNO_3 65% Suprapur®, Merck) 2%, agua desionizada de grado Milli-Q y una solución estándar de 1000 mgL⁻¹ del respectivo metal a estudiar (Titrisol®, Merck).

Se tomó una alícuota de 10 mL del estándar de 1000 mgL⁻¹ de cada metal y se aforó a 100 mL con HNO_3 2% quedando en 100 mgL⁻¹, la cual es nuestra solución madre para las posteriores diluciones dependiendo de la curva de calibración de cada metal a analizar en el momento. Se homogenizó la solución estándar y se almacenó en frascos de vidrio lavados con el protocolo descrito en el punto 2.5.2 de preparación de material. Esta solución vendría a ser la llamada “solución stock”. Luego se tomó una alícuota para cada concentración requerida y se aforó con HNO_3 2%.

Las concentraciones de cada curva fueron seleccionadas de acuerdo con lo que establecía el manual del equipo de absorción atómica en uso.

Tabla 5: Concentraciones y alícuotas necesarias para construcción de curvas de calibración de los metales.

Elemento	Concentración solución madre (mgL⁻¹)	Concentraciones curvas de calibración (mgL⁻¹)	Alícuotas para curvas de calibración (mL)
As	0,5	0,005-0,01-0,15-0,02-0,025	1-2-3-4-5
Al	100	5,0-10-15-20-25	5,0-10-15-20-25
Cd	10	0,1-0,2-0,3-0,4-0,5	1-2-3-4-5
Cr	10	0,1-0,2-0,3-0,4-0,5	1-2-3-4-5
Cu	10	1,0-2,0-3,0-4,0-5,0	10-20-30-40-50
Fe	10	0,5-1,0-1,5-2,0-2,5	5-10-15-20-25

Mn	10	1,0-2,0-3,0-4,0-5,0	10-20-30-40-50
Mo	100	10-20-30-40-50	10-20-30-40-50
Ni	10	0,5-1,0-1,5-2,0-2,5	5-10-15-20-25
Pb	10	1,0-2,0-3,0-4,0-5,0	10-20-30-40-50
Zn	10	0,1-0,2-0,3-0,4-0,5	1-2-3-4-5

2.7.3. Determinación de metales totales.

2.7.3.1 Determinación Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb y Zn.

Se traspasaron las muestras a tubos de centrífuga de 15 mL para su posterior análisis. Se analizaron los metales mencionados con sus respectivas curvas de calibración. Fue realizada la medición por un espectrómetro de absorción atómica (EAA), utilizando lámparas de cátodo hueco de tipo inversión con gas de neón en su interior, cada una con una longitud de onda e intensidad específica que se muestran en la tabla 6. Además, se muestra el tipo de llama usado para cada elemento con el flujo de gas usado correspondiente a cada una.

Tabla 6: Especificaciones de las lámparas y llamas para diferentes metales.

Elemento	Longitud de onda (nm)	Intensidad (mA)	Rendija (mm)	Tipo de llama	Flujo gas (L·min⁻¹)
Al	309.3	10-600	0.5	Aire-C ₂ H ₂ -N ₂ O	7.0
Cd	228.8	8-100	0.5	Aire-C ₂ H ₂	1.8
Cr	357.9	10-600	0.5	Aire-C ₂ H ₂	2.8
Cu	324.8	10-500	0.5	Aire-C ₂ H ₂	1.8
Fe	294.4	12-400	0.2	Aire-C ₂ H ₂	2.2
Mn	279.5	10-600	0.2	Aire-C ₂ H ₂	2.0

Mo	313.3	10-600	0.5	Aire-C ₂ H ₂ - N ₂ O	7.0
Ni	232.0	10-400	0.2	Aire-C ₂ H ₂	1.6
Pb	283.3	10-300	1.0	Aire-C ₂ H ₂	2.0
Zn	213.9	10-300	0.5	Aire-C ₂ H ₂	2.0

2.7.3.2 Determinación de As por EAA con generador de hidruro.

Reactivos y solventes:

- Ácido ascórbico 5,5 % m/V. Se masó 27,2 g del ácido y se aforó con agua desionizada hasta 500 mL.
- Yoduro de potasio 6,7 %m/V. Se masó 33,5 g de KI y se aforó con el ácido ascórbico previamente preparado.
- Hidróxido de sodio 0,125 mol·L⁻¹. Se masó 2,5 g de NaOH y se aforó con agua desionizada hasta 500 mL.
- Boro Hidruro de Sodio 0,125 mol·L⁻¹. Se masó 2,5 g de NaBH₄ y se aforó con el hidróxido de sodio previamente preparado hasta 500 mL.
- Ácido Clorhídrico 15 %V/V. Se tomó 250 mL de HCl 30% (suprapur® Merck) y se aforó con agua desionizada hasta 500 mL

A la muestra previamente digerida se le adicionaron 2 mL de HCl al 15% y 3 mL de al KI 10%. Luego, estas fueron traspasadas a tubos de centrifuga de 15 mL para su análisis.

Fue realizada por HG-AAS, en un espectrómetro de absorción atómica Shimadzu, modelo AA-6800, equipado con un generador de vapor de hidruros HVG-1, auto sampler ASC-6100 y software wizAArd. Se midió la concentración de As igualmente utilizando una lámpara de cátodo hueco de tipo inversión con gas de neón en su interior. La generación de hidruros es un proceso químico que produce hidruros volátiles (de aquellos elementos que puedan formar sus hidruros correspondientes) que ocurre por la adición de un agente reductor, dentro del cual, el $NaBH_4$ es el agente reductor más utilizado ya que proporciona una mayor rapidez de reacción, una alta eficacia de conversión y blancos bajos (Moreno & col., 2000)

Las especificaciones de la lámpara y de la llama se encuentran en la Tabla 7.

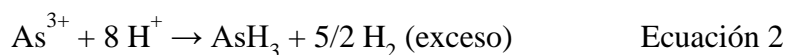
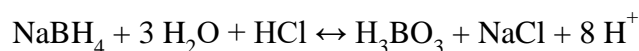


Tabla 7: Especificaciones de las lámparas y llamas para As.

Elemento	Longitud de onda (nm)	Intensidad (mA)	Rendija (mm)	Tipo de llama	Flujo gas ($L \cdot min^{-1}$)
As	193.70	12-500	1.0	Aire- C_2H_2 - N_2O	2.0

2.8. Análisis de calidad del suelo

2.8.1. Índice de Geoacumulación (I_{geo})

El I_{geo} fue propuesto por Müller (1979), y es utilizado generalmente para evaluar la contaminación de metales traza especialmente en suelos y sedimentos. Esto, a través de la relación de la concentración presente frente a los valores de referencia.

$$I_{geo} = \text{Log}_2 \left[\left[\left(\frac{Cs}{1,5 \times Bn} \right) \right] \right]$$

Ecuación 3

En donde, Cn es la concentración medida de metal “n” en el suelo, Bn es el valor de fondo geoquímico para el metal “n” en el suelo, mientras que el factor 1,5 explica la posible variación en los datos de fondo causada por los efectos de la litología.

Los valores de Bn que se utilizaron, fueron los valores medios de fondo para la Región de Antofagasta, cuyas muestras fueron recolectadas en zonas libres de contaminación por el Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA, 2014) y también por parte de los datos correspondiente a reportes de Turekian y Wedepohl (1961). Estos niveles basales de los metales utilizados se observan en el Anexo 6, los cuales fueron aplicados en un estudio similar realizado en la ciudad de Calama que contemplaba un relave minero (Zanetta – Colombo & col., 2022).

El Igeo se divide en siete clases que se observan en la siguiente tabla:

Tabla 8: Rangos y niveles de contaminación según I_{geo} (Fuente: Pérez-Mora, 2021)

Nivel de contaminación	Rango de I_{geo}
No contaminado	$0 \leq I_{geo}$
No contaminado a moderadamente contaminado	$0 \leq I_{geo} \leq 1$
Moderadamente contaminado	$1 \leq I_{geo} \leq 2$

Moderadamente a fuertemente contaminado	$2 \leq I_{geo} \leq 3$
Fuertemente contaminado	$3 \leq I_{geo} \leq 4$
Fuerte a extremadamente contaminado	$4 \leq I_{geo} \leq 5$
Extremadamente contaminado	$I_{geo} \geq 5$

2.8.2. Factor de enriquecimiento (FE)

El FE es un indicador utilizado para evaluar el posible impacto antropogénico de las concentraciones de metales en los sedimentos o en la superficie del suelo. Para el FE se aplica un elemento con baja variabilidad de ocurrencia (LV) como referencia para identificar la influencia antropogénica en las concentraciones obtenidas. Los elementos de referencia suelen ser Fe, Al, Ca, Ti, Sc o Mn (Trujillo y col, 2015). En este caso se utilizó Fe, ya que normalmente se selecciona como material de referencia debido a su abundancia en la corteza terrestre. La expresión del factor de enriquecimiento se muestra en la Ecuación 4 (Lawson & Winchester (1979):

$$EF = \frac{[Metal/Fe]_{Muestra}}{[Metal/Fe]_{UCC}}$$

Ecuación 4

El FE se divide en tres clases que se observan en la siguiente tabla:

Tabla 9: Rangos y origen del elemento según el FE (Fuente: Barbieri, 2016)

Rangos de FE	Origen del elemento X (metal)
$2 \leq FE$	Enriquecimiento mínimo
$2 \leq FE \leq 5$	Enriquecimiento moderado.
$5 \leq FE \leq 20$	Enriquecimiento significativo
$FE \geq 40$	Enriquecimiento extremadamente alto.

2.8.3. Índice de carga contaminante

El índice de carga contaminante (ICC) es uno de los parámetros que se puede utilizar para estimar el estado de contaminación por metales y las medidas necesarias que se deben tomar (Likuku & col., 2013), además de ser una herramienta rápida para comparar el estado de contaminación de diferentes lugares (Adebowale & col., 2009) y está representado por la siguiente ecuación:

$$ICC = \sqrt[n]{FC_1 * FC_2 * FC_3 \dots, x FC_n}$$

Ecuación 5

Donde “n” es el número de metales bajo investigación y “FC” es el factor de contaminación. Cuando el valor de $ICC > 1$, indica que la contaminación existe, mientras que los valores de $ICC < 1$ indican un estado de no contaminación del medio evaluado (Effendi & col., 2016).

El factor de contaminación se utiliza para determinar la contaminación general de oligoelementos en muestras de suelo y se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$FC = \frac{M_c}{B_c}$$

Ecuación 6

Donde M_c es la concentración medida y B_c es la concentración basal de los metales.

2.9. Análisis estadístico

2.9.1. Análisis de componentes principales (ACP)

El Análisis de Componentes Principales (ACP) es un método algebraico estadístico que trata de sintetizar y dar una estructura a la información contenida en una matriz de datos (Colina & López-Roldán, 1991).

Los principales objetivos del análisis de componentes principales, es extraer la información más importante de un conjunto de datos multivariantes, comprimir un conjunto de datos multivariantes manteniendo solo la información que se considere importante (reducir la dimensionalidad de los datos), simplificar la descripción de un conjunto de datos y analizar la estructura de las observaciones y de las variables (Abdi & Williams, 2010).

2.9.2. Coeficiente de correlación de Pearson

La covariación es el grado de concordancia de las posiciones relativas de los datos de dos variables. El coeficiente de correlación de Pearson opera con puntuaciones tipificadas (que miden posiciones relativas), el cual presenta un valor de correlación que es igual a 1 o -1 si la covariación es de intensidad máxima, y se va acercando hacia el 0 cuanto más pequeña sea la intensidad de esta. Además, el índice tiene signo positivo cuando la covariación es directa y negativo cuando es inversa.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización fisicoquímica de los suelos

a) **pH y CE:** En las figuras 10 y 11 se muestran los resultados de los suelos muestreados en la ciudad correspondientes a pH y conductividad eléctrica respectivamente, los cuales fueron obtenidos a partir de los métodos descritos en la parte experimental. Estos, se observan mediante gráficos de barras donde se informa el promedio de las muestras (los valores promediados con su desviación estándar se encuentran en el (Anexo 4).

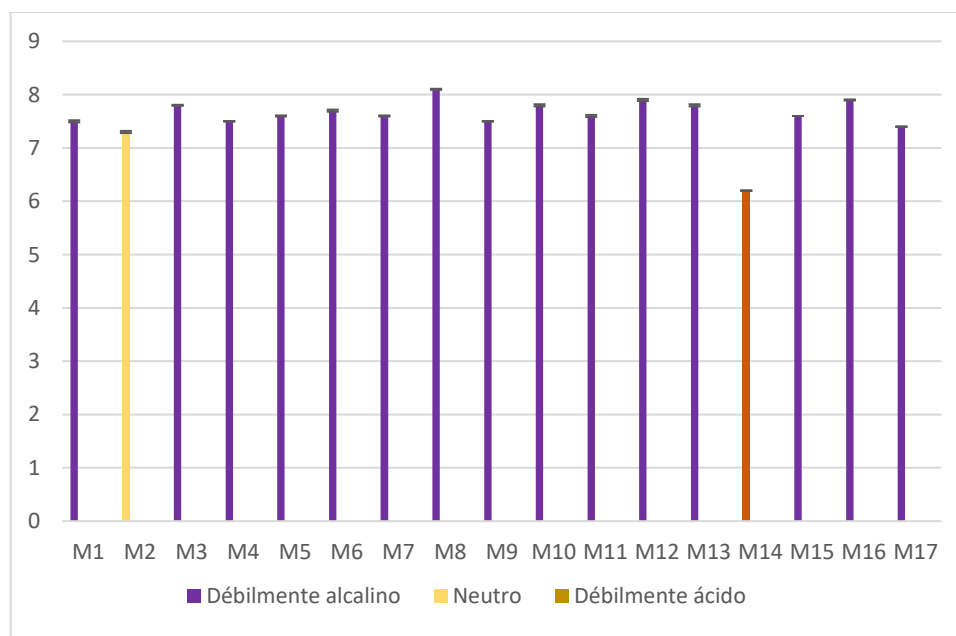


Figura 10: Valores de pH en suelos de Arica.

Casi la totalidad de las muestras tienen un pH correspondiente al rango débilmente alcalino que va entre los valores 7.4 a 7.8. Una sola muestra correspondiente a la M14, se encuentra dentro del rango débilmente ácido con un valor de 6.2 y la

muestra 2, indica un valor neutro de 7.3. El valor promedio para todas las muestras fue de 7.6 con una desviación estándar de 0.41, por lo que hay una distribución de datos uniforme que se acercan bastante a la media. Los resultados coinciden con la naturaleza de la ciudad, ya que la alcalinidad se presenta generalmente en suelos de regiones áridas, y especialmente en zonas de baja irrigación (González Soto, 1991).

Dado que la mayoría de los metales tienden a estar más disponibles a pH ácido porque son menos fuertemente adsorbidos, se esperaría que, por la alcalinidad de los suelos, esto no ocurra a excepción del As, Mo, y Cr, que son más móviles a pH alcalino.

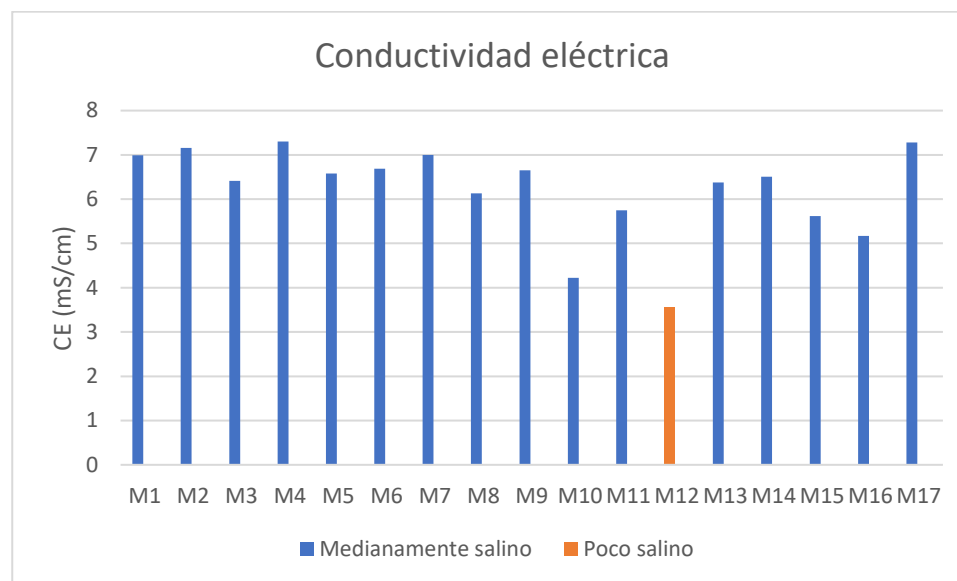


Figura 11: Valores de conductividad eléctrica en suelos de Arica

En cuanto a los resultados de conductividad eléctrica, mayoritariamente corresponden a suelos medianamente salinos a excepción de la muestra M12, ubicada al costado del morro de Arica, que indica poca salinidad dado que su resultado es de $3.56 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$. El valor promedio de las muestras es de $6.2 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ con una desviación estándar de 1.05.

Esto también coincide con la teoría de que, generalmente los problemas de alta salinidad y sodicidad son frecuentes en los suelos de regiones áridas, lo cual limita su fertilidad química y le confiere propiedades físicas desfavorables especialmente para la actividad agronómica (Arbelo y col, 2006). Si las rocas de las regiones áridas contienen carbonatos de calcio se forman suelos básicos con pH moderadamente básicos, pero si el sodio es predominante, se forman los suelos alcalinos con pH de valores extremadamente altos. Uno de los principales motivos de los suelos ácidos en las regiones de clima húmedo son las lluvias constantes, las cuales se infiltran en el suelo y arrastran a las bases disueltas fuera del perfil.

Por ello, debido a que Arica corresponde a un área con lluvias escasas e irregulares, se provoca una baja permeabilidad de sus suelos y consta de una elevada exposición a vientos oceánicos, teniendo una importante fuente (especialmente los más cercano al mar) de sodio debido a la contribución de las sales marinas, y en donde serían teóricamente entonces, suelos salino-sódicos (Arbelo & col, 2006).

Los pH débilmente alcalinos tienen cierta relación con las medianamente altas conductividades, ya que el valor de CE es influenciado por la concentración y composición de las sales disueltas que, debido a la alta saturación que se presentan por cationes básicos (saturación de bases) como K^+ , Ca^{+2} , Mg^{2+} , Na^+ aumentan los niveles de pH.

En las tablas 10 y 11 se pueden observar todos los rangos de pH y conductividad eléctrica con su respectiva calificación.

Tabla 10: Clasificación de suelos según su pH (Fuente: Soil Survey Division Staff , 1993)

pH	Clasificación	pH	Clasificación
< 4,5	Extremadamente ácido	6,6 – 7,3	Neutro
4,5 – 5,0	Muy fuertemente ácido	7,4 – 7,8	Débilmente alcalino

5,1 – 5,5	Fuertemente ácido	7,9 – 8,4	Moderadamente alcalino
5,6 – 6,0	Moderadamente ácido	8,5 – 9,0	Fuertemente alcalino
6,1 – 6,5	Débilmente ácido	> 9,1	Muy fuertemente alcalino

Tabla 11 :Clasificación de suelos según su CE (Fuente: Abrol & col, 1988).

CE (mS·cm ⁻¹)	Clasificación
0,0 – 2,0	No salino
2,1 – 4,0	Poco salino
4,1 – 8,0	Medianamente salino
8,1 – 16,0	Muy salino
> 16,0	Extremadamente salino

3.2. Determinación de MO

Los niveles de materia orgánica (MO) en la ciudad de Arica, dan en casi su totalidad bajos porcentajes, dónde sólo la muestra M2, (ubicada cercana a Chapiquiña 3066, ex sitio donde se encontraba antiguamente el relave), queda dentro del rango mediano y la muestra M3 (cercana al barrio industrial), del medianamente alto. Se tiene un promedio de 0,90% de MO y una desviación estándar de 0,630.

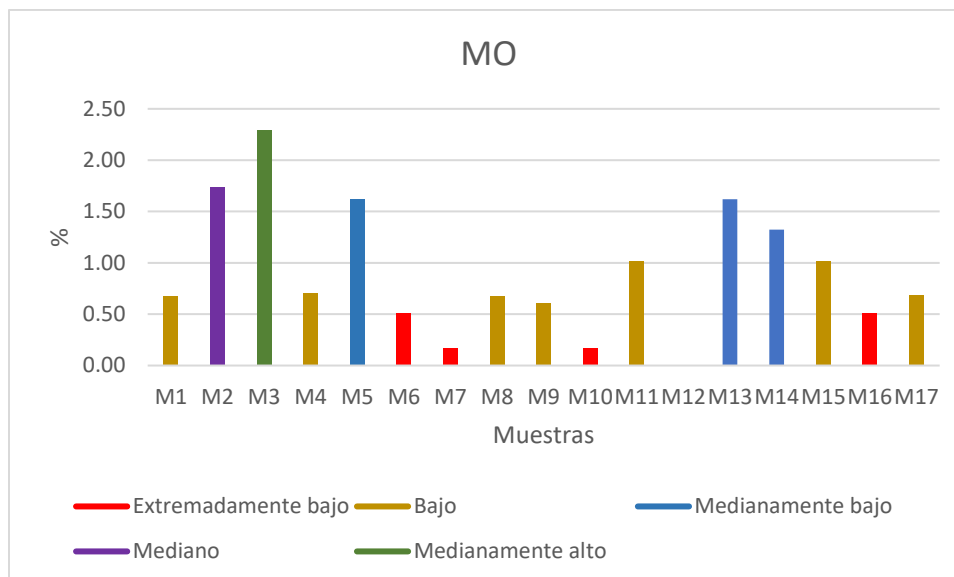


Figura 12: Valores de materia orgánica (M.O) en suelos de Arica.

En general, en el norte de Chile, especialmente en el norte grande al haber presencia mayoritaria de suelos de clasificación aridisoles y entisoles (Ibañez, 2008), se tiene muy poca presencia de materia orgánica, por lo que tienen baja fertilidad, y la aplicación de actividades agronómicas, como se dijo anteriormente, se hace casi imposible.

3.3. Determinación textura del suelo

En cuanto a la textura de los suelos de Arica, se observa en el Anexo 4 que la mayor parte de estos, corresponden a la clasificación de arenosos, a excepción de las muestras M4, M5 y M14 (ubicadas en las zonas “Los cisnes con Los ruisseños”, “Oscar Bonilla/Barros Arana” y “Luis Beretta Poncel” respectivamente), los que corresponden a suelos franco-arenosos. Estos resultados eran esperables dada la naturaleza de los suelos áridos de la zona del norte grande de Chile. Además, los % de MO menor al 5% tendrían directa relación con una textura arenosa del suelo (Herrera y col, 2017).

3.4.Determinación de metales en suelos de Arica

Se analizaron 11 metales correspondientes a los suelos de la ciudad de Arica. En las Figuras 13,14 y 15 se muestran las concentraciones de Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn obtenidas por EAA. Las concentraciones descritas en cada figura se encuentran en el Anexo 5 para cada metal.

En la Figura 13 se observa que tanto el Al como el Fe se mantienen relativamente uniformes en los diferentes suelos muestreados, debido a que ambos metales son conocidos por encontrarse de forma mayoritaria en un en 8,13% y 5% respectivamente en la corteza terrestre (Lutgens & Tarbuck, 2000).

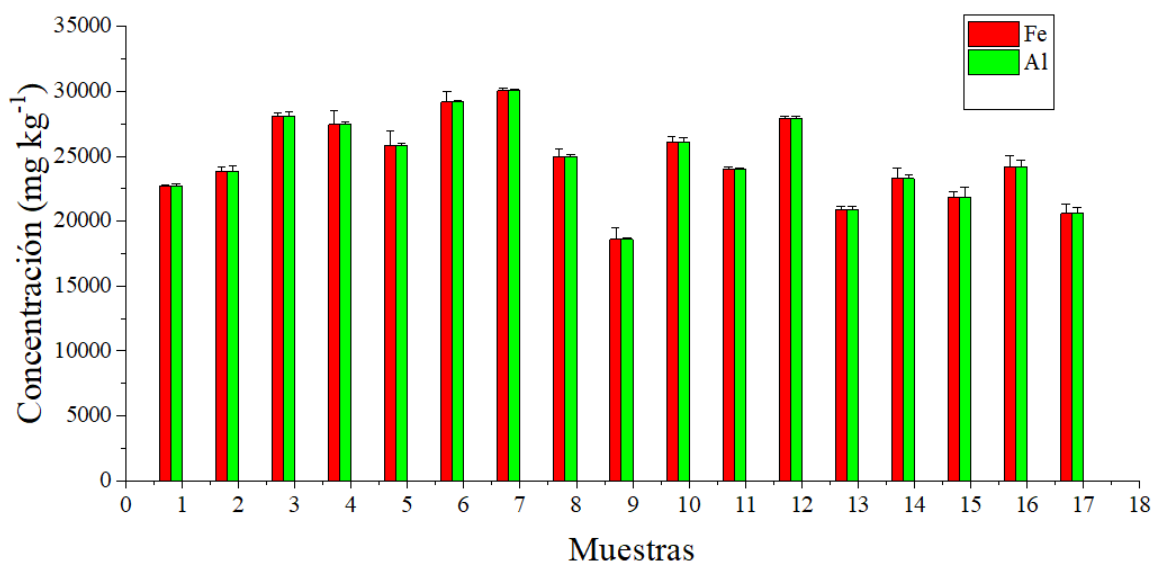


Figura 13: Concentraciones de Al y Fe para muestras de la ciudad de Arica

En la figura 14 se observa que las concentraciones de Cd, Cr y Ni se mantienen igualmente uniformes en casi todos los sitios, a excepción de las muestras M5 y M14 que, para el caso del Cd, sobresalen de la media por tener mayores concentraciones de 19,0 y 24,9 $mg\ kg^{-1}$ respectivamente.

Por el lado del As, se presenta un valor promedio de $22,7 \text{ mg kg}^{-1}$, en donde M2, M5, M13 y M14 se escapan de la media por tener concentraciones más elevadas. La muestra M9, es la que presenta la menor concentración con $2,62 \text{ mg kg}^{-1}$, lo que puede coincidir con la gran distancia que tiene sobre los 3 sitios que históricamente estuvieron más contaminados. A modo de comparación para este elemento, se interpuso una línea que representa los 12 mg kg^{-1} que Canadá tiene como límite normativo para As en suelos, observando que la mayor parte de las muestras lo superan.

En el caso del Mo, para todas las muestras se tienen resultados bajo el límite de detección, por lo que no fueron incluidas en el resto de los análisis.

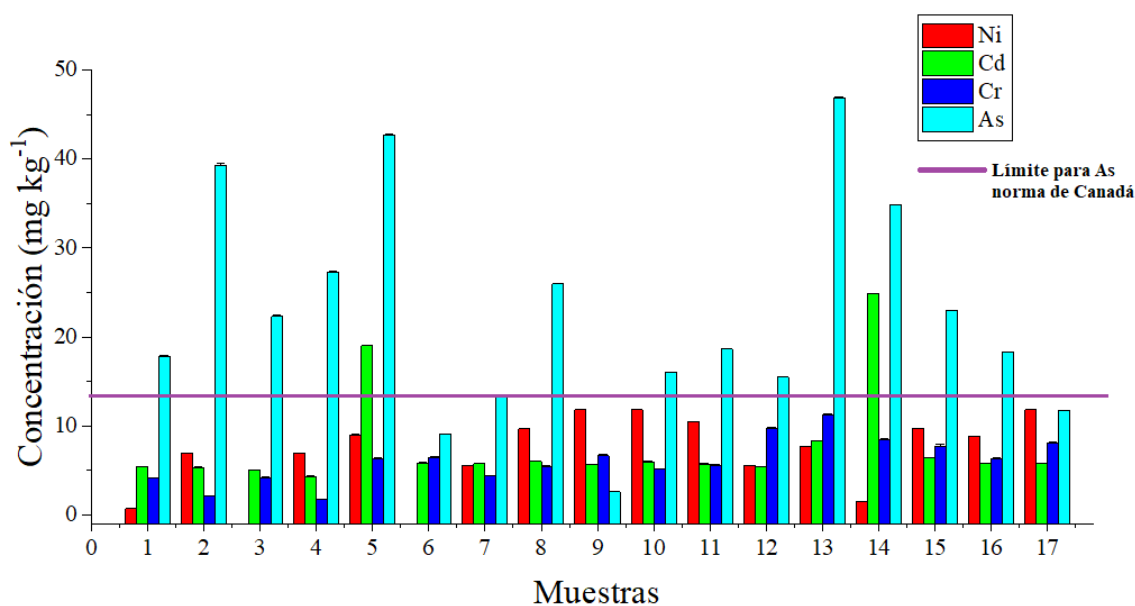


Figura 14: Concentraciones de As, Cd, Cr y Ni para muestras de la ciudad de Arica

Para los elementos Cu, Pb y Zn, se observa en la figura 15 que las muestras tienen una mayor desviación en sus concentraciones, donde M5 y M14, son las que resultaron tener los mayores valores para estos metales. La muestra M16 (ubicada en Chapiquiña con la Paz) se escapa en gran medida de la media para el Cu ($267 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), alcanzando una

concentración de 1056 mg·kg⁻¹. De igual manera ocurre con la muestra M5 y el Zn, presentando 7969 mg·kg⁻¹, cuando la media de este elemento corresponde a 1535 mg·kg⁻¹.

En cuanto al Mn, presenta un valor promedio de 743 mg/kg, donde las concentraciones en los sitios se mantienen uniformes respecto a este valor.

Respecto al caso particular del elemento Zn, comparando con la norma canadiense para suelos de 200 mg/kg, la totalidad de las muestras sobrepasa esta concentración en gran medida, por lo que todas las muestras representarían un riesgo al estar contaminadas según esta norma.

Dentro de la siguiente sección se compararán los valores presentados con diferentes normativas y guías.

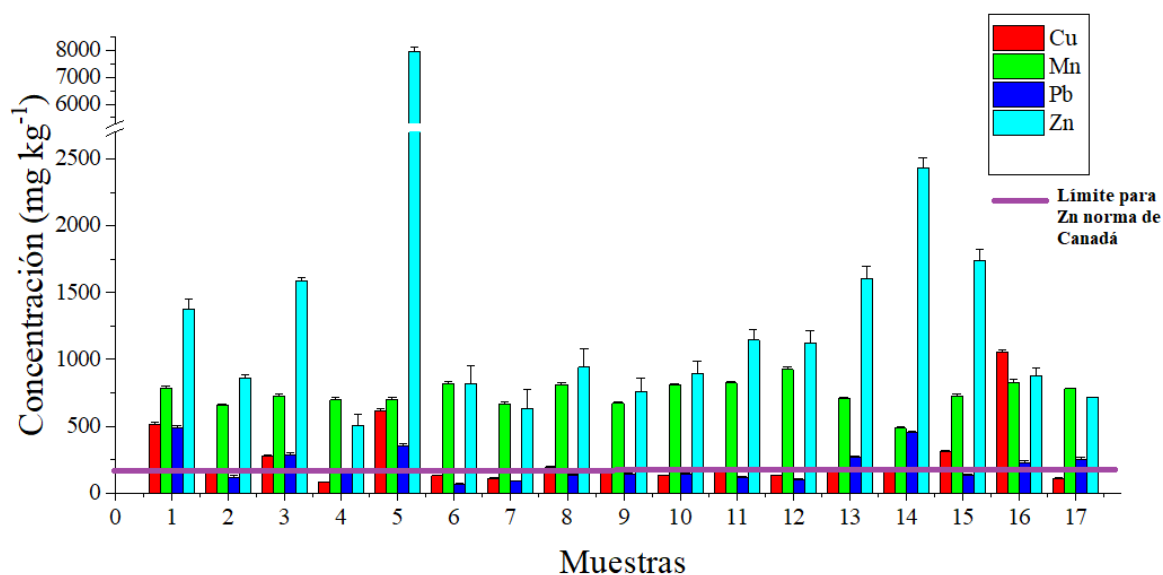


Figura 15: Concentraciones de Cu, Pb, Mn, y Zn para muestras de la ciudad de Arica

3.5. Análisis de riesgo

3.5.1. Criterios de comparación con valores de referencia

Dado que Chile no posee normas de calidad para suelos, no es posible establecer cuáles son los valores de concentración que permitan definirlo como un suelo contaminado o si este representa algún peligro para la población.

Ante esto, se pueden considerar diferentes criterios para evaluar en qué condiciones se encuentra este suelo. Algunos de estos para obtener una determinada conclusión respecto de la calidad de los suelos son (CENMA, 2014):

- Comparación con normativas internacionales
- Evaluación de la magnitud en que los valores de las sustancias químicas encontradas en los SPPC superan las concentraciones que se puedan encontrar en muestras obtenidas de sitios no intervenidos.
- Comparación con los niveles guía de evaluación de medios ambientales (EMEG).

3.5.2. Comparación con normativas referenciales extranjeras

Para esta sección se aplicaron las comparaciones con normativas internacionales disponibles de los países de Australia, Brasil, Canadá, y México.

Tabla 12: Numero de muestras que superan las referencias de los países de Australia, Canadá, México y Brasil.

País	As	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
Canadá	todas excepto M6,M9 y M17	M5, M14	-	Todas	-	-	M1,M3,M4,M5,M9,M10 ,M13,M14,M16,M17	Todas
Australia	-	M14	-	M16	-	-	M1,M5,M14	M5
México	M2,M3,M4,M5,M8, M13,M14,M15	-	-	-	-	-	M1,M14	-

Brasil (Sao Paulo)	M1,M2,M3,M4,M5, M8,M10,M11,M12, M13,M14,M15,M16	Todas	-	Todas	-	-	Todas excepto M6	Todas
-----------------------------------	---	-------	---	-------	---	---	------------------	-------

En el Anexo 6 , se observan los niveles de metales en suelo expresados en mg/kg de las normativas extranjeras utilizadas como comparación en este estudio, donde además se indica el uso que tiene cada una de ellas. Las muestras que sobrepasan las concentraciones limitantes de cada país, se indican en la Tabla 12 y se observa lo siguiente:

Para los casos de Cr, Mn y Ni, ninguna de las muestras sobrepasa las normas referenciales de alguno de los países seleccionados, donde de forma particular el Mn no tiene variadas comparaciones, ya que sólo presenta una referencia, la cual corresponde a Australia de 1500 mg/kg.

Respecto a la norma brasileña, todas las muestras superan el límite de Cd, Cu y Zn y la mayor parte supera el de As y Pb. Lo mismo ocurre para la norma canadiense, a excepción del Cd donde solo 2 muestras superan su límite. Por el contrario, casi ninguna muestra supera la norma australiana y mexicana de los elementos presentados, ya que presentan valores límites mucho más flexibles.

A modo general, las muestras que se presentan en la mayoría de estas superaciones corresponden a las M5 y M14, dado que son las que tienen una mayor concentración de algunos de los metales estudiados de interés. Como se dijo anteriormente, la muestra M5 se encuentra en la zona industrial y M14 en la calle Luis Beretta Poncel.

De acuerdo con los niveles de referencia de estos 4 países, se puede observar que tienen en la mayoría de los metales grandes diferencias entre ellos. Esto, debido a que probablemente, cada uno apunte a diferentes objetivos, pero puede que lo más importante,

sea la diferencia geográfica y el tipo de suelo que presentan, ya que cada uno se encuentra en una región o un continente diferente, pudiendo tener diferentes niveles basales como referencia.

En cuanto a la normativa extranjera aplicada al caso de estudio de Arica, según el “Programa maestro de intervención: zonas con presencia de polimetales en Arica”, fue tomada como referencia la norma de Estados Unidos para Pb (400 mg/kg) y de la Unión Europea para As (20 mg/kg). Según este informe con principal participación de CONAMA, decía que “de acuerdo con la experiencia internacional y consultas a expertos nacionales en el caso de no contar con guías locales, la elección del valor de referencia se define como el valor asociado al percentil 95”, en donde los valores de percentil 95 se establecen en 458 mg/kg para el Pb y 31 mg/kg para el As. Además, se presentan los promedios de los blancos elegidos, que son 163 mg/kg y 7 mg/kg para Pb y As respectivamente.

Estos sitios blancos supuestamente no tienen mayor intervención antropogénica ni tampoco por parte de los contaminantes de interés (As, Cd, Cu, Pb, Zn) que contenían los desechos abandonados, donde no se especifica el criterio de elección, pero se puede deducir viendo el mapa (ver Anexo 8) que el cuadrante elegido es el que se presenta a una mayor distancia (tomando en cuenta el sector urbano de la ciudad) de los sitios contaminados como lo son el puerto, sector maestranza y sitio F.

Dentro de los resultados del presente trabajo, la muestra M4, que es la que se encuentra dentro del cuadrante “blanco”, presenta concentraciones de 161 mg/kg y 27 mg/kg para plomo y arsénico respectivamente, siendo cercana a la concentración de Pb promedio señalada anteriormente, y 3 veces mayor que este aproximadamente en el caso del As. Sin embargo, en el informe de resultados del laboratorio de AQG Labs Chile hecho en 2009 para CONAMA, se tiene que gran parte de las muestras analizadas están bajo los valores

promedios blancos nombrados, por lo que tal vez la elección de estos sitios blancos no es la más representativa.

Esta dificultad de encontrar sitios que no tengan intervención, puede derivar en que el muestreo se realiza en una zona urbana donde hay constante movimiento por diferentes actividades comerciales, culturales, sociales, entre otras. También, se tiene la importancia de las condiciones climatológicas de la ciudad, ya que a pesar de tener vientos que predominan desde el SW al NE de esta, según datos de la DGAC Chile, han ocurrido fenómenos de tormentas de arena y pequeños remolinos que levantan parte del suelo y en su deposición puede que lleguen a otro sector cercano o lejano dependiendo de la intensidad de los vientos, donde en 2016, por ejemplo, alcanzaron 70 km/h y ráfagas de 94 km/h (DGAC, 2016).

3.5.3. Comparación con niveles guía para evaluación de medios ambientales

(EMEG)

Los EMEG han sido propuestos por la Agencia para Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades de los Estados Unidos de América (ASTDR). Su función es servir como referencia para definir los contaminantes críticos de un suelo con potencial presencia de contaminantes (SPPC). El EMEG se basa principalmente en la dosis con la cual el contaminante no causa daño alguno, el cual puede aplicarse respecto a 2 fuentes de información:” niveles mínimos de riesgo (MRL)” de ASTDR o “Dosis de referencia (RfD)” de la USEPA.

Para su cálculo, se consideran valores típicos de peso corporal y de tasa de ingesta del contaminante en el medio analizado. Es decir que, en este tipo de referencia, los principales factores que contribuyen a que un contaminante ambiental se convierta en una dosis interna

son, la tasa de ingesta y el peso corporal del receptor.

La fórmula para su cálculo es la siguiente:

$$\text{EMEG} = \frac{\text{MRL o RfD} \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right) * \text{PC} (\text{kg})}{\text{TI} \left(\frac{\text{kg}}{\text{día}} \right)}$$

Ecuación 7

Donde:

- MRL es la concentración de mínimo riesgo según ASTDR (mg/kg/día) RfD es la dosis de referencia según la USEPA (mg/kg/día).
- PC es el peso corporal (kg); para infantes se considera 10 kg, para niños 14 kg y para adultos 70 kg.
- TI es la tasa de ingesta (kg/día); para la ingesta accidental de suelo en infantes y niños es de 350 mg/día y para adultos es 50 mg/día

En el Anexo 6 se observan los EMEG recopilados desde los informes hechos por CENMA de “Diagnóstico regional de suelos abandonados con potencial presencia de contaminantes” de 2014 y “Evaluación y caracterización del polvo negro en la comuna de Huasco e implementación de medidas de mitigación” de 2017. Luego, en la Tabla 13, se tienen los resultados acerca de los elementos que superan el EMEG tanto para infantes como niños, dado que son los que más probabilidades tienen de ser afectados ante una contaminación de estos.

Los elementos involucrados en la superación de alguno de los EMEG estudiados son Al, As, Cd, Cu y Pb. Dentro de estos, los últimos 4 son los principales metales que se encontraban presentes en los desechos provenientes de Suecia.

De las muestras, todas superan los EMEG de infantes y niños para el Cd, lo que significa que todos estos sitios requieren evaluación de riesgo para estas 2 categorías de la población.

Las muestras M1, M5, M14, son las que tienen un mayor número de metales involucrados (As, Cd, Cu y Pb) para la categoría de infantes, por lo que esta población cercana a los mencionados puntos podría tener efectos en su salud. Para la categoría niños, la muestra M5 es la que contiene mayor número de metales que superan su EMEG. También se tienen superaciones de más de 2 metales en M1, M2 (ubicada en Chapiquiña 3066) y M16 (ubicada en las calles Chapiquiña con la Paz) entre As, Cu y Pb.

A modo general, todos los sitios pueden requerir una evaluación de riesgo para al menos 1 metal.

Tabla 13: Resumen de los metales cuyos valores máximos son mayores que las respectivas EMEG para infantes y niños.

Muestra	EMEG infante	EMEG niño
M1	Al, As, Cd, Cu, Pb	As, Cd, Cu, Pb
M2	Al, As, Cd	Al, As, Cd
M3	Al, As, Pb	As, Cd, Pb
M4	As, Cd	As, Cd
M5	As, Cd, Cu, Pb	As, Cd, Cu, Pb
M6	As, Cd	Cd
M7	As, Cd	As, Cd
M8	As, Cd	As, Cd
M9	Cd	Cd
M10	As, Cd	As, Cd
M11	As, Cd	As, Cd
M12	As, Cd	As, Cd
M13	As, Cd, Pb	As, Cd, Pb
M14	Al, As, Cd, Pb	As, Cd, Pb
M15	As, Cd, Cu	As, Cd, Cu

M16	As, Cd, Cu, Pb	As, Cd, Cu, Pb
M17	As, Cd, Pb	As, Cd, Pb

3.6. Análisis de la calidad de los suelos

3.6.1. Índice de geoacumulación (I_{geo})

En la Tabla 14 se muestran los resultados de I_{geo} que tuvieron valores que determinaban un cierto grado de contaminación importante. Se encuentran coloreados según la clasificación en la cual se encuentren. De color verde están los “Moderadamente contaminado”, de color azul los “Moderadamente a fuertemente contaminado”, de color morado los “Fuertemente contaminado”, de color mostaza los “Fuerte a extremadamente contaminado” y por último los de color rojo son los sitios “Extremadamente contaminados”. Los valores de todos los elementos se encuentran en el Anexo 10.

Tabla 14: Selección de valores de índice de geoacumulación para suelos de Arica

	Cd	Cu	Pb	Zn
M1		1,15	4,88	3,64
M2			1,18	2,27
M3			2,86	4,20
M4			1,62	1,64
M5	3,08	1,37	3,58	21,08
M6				2,17
M7				1,68
M8			1,34	2,50
M9			1,43	2,02
M10			1,46	2,37
M11			1,18	3,02
M12			1,00	2,97
M13	1,35		2,68	4,24
M14	4,02		4,54	6,43
M15	1,03		1,31	4,60
M16		2,35	2,30	2,31

M17			2,55	1,89
PROM	1,24	0,59	2,09	4,06

La mayor población de datos obtenidos en este trabajo en relación con Pb y Zn, muestran en promedio 2,09 y 4,06 mg/kg respectivamente. Además, destacan algunos valores también en Cd y Cu. Para el caso del Pb, la mayoría de las muestras clasifican como moderadamente a fuertemente contaminadas, destacando las muestras M1 y M14 que se encuentran en la categoría “fuerte a extremadamente contaminado”.

En cuanto al Zn, la mayor parte presentan valores $> 2,0$, destacando las muestras M5 y M14 que se presentan como “extremadamente contaminadas”.

Los elementos de Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn y Ni, no presentan mayores valores en promedio, ya que casi todas las muestras en cada uno de estos, toman la clasificación de no contaminado a moderadamente contaminado, según qué tan cerca estén sus valores a 1,0.

Los valores promedio de I_{geo} en los metales presentes de los sitios muestreados siguen el siguiente orden decreciente: Zn (4,06) $>$ Pb (2,09,) $>$ Cd (1,24) $>$ Cu (0,59) $>$ As (0,35) $>$ Mn (0,27) $>$ Fe (0,10) $>$ Al (0,053) $>$ Cr (0,013) $>$ Ni (0,003).

Se puede concluir de este tipo de análisis que, M5 y M14 son las muestras que presentan elevadas concentraciones en más de 2 metales. Se destaca que la muestra M5 se encuentra dentro del sector industrial de la ciudad y M14 se encuentra muy cercana a la zona donde se encuentra Maestranza Chinchorro, que es el sector por donde transitaba el ferrocarril Arica-La Paz.

3.6.2. Factor de enriquecimiento

En la Tabla 15 se muestran los resultados para factor de enriquecimiento de las 17 muestras recolectadas en Arica, donde se encuentran coloreadas según la clasificación que le corresponde a cada una. De color verde que tienen un enriquecimiento significativo y de color rojo aquellas que representan un enriquecimiento extremadamente alto.

Tabla 15: Valores de factor de enriquecimiento para suelos de Arica

	As	Cd	Cu	Pb	Zn
M1		9,17	42,9	50,6	40,4
M2	5,99	8,52	13,38	11,68	23,99
M3		6,78	18,73	23,95	37,53
M4		5,99	5,78	13,87	15,05
M5	6,00	28,0	45,1	32,57	205,0
M6		7,56	8,45	5,52	18,69
M7		7,28	6,98	6,82	14,04
M8		9,18	14,36	12,61	25,13
M9		11,57	17,17	18,11	27,25
M10		8,64	9,68	13,17	22,77
M11		9,03	13,56	11,58	31,66
M12		7,39	8,92	8,38	26,68
M13	8,16	15,2	16,82	30,15	51,1
M14	5,45	40,7	13,79	45,9	69,5
M15		11,1	26,5	14,09	53,0
M16		9,2	82,6	22,45	24,11
M17		10,7	9,99	29,16	23,12

Nuevamente se tienen al Cd, Cu, Pb y Zn como principales protagonistas en los valores más altos, y donde también se asoma en cierta medida el As.

Se tiene que los resultados siguen la misma tendencia del I_{geo} . La diferencia recae en Pb y Zn en donde ahora todas las muestras se muestran como “extremadamente enriquecidas” dado sus altos valores, destacando especialmente las muestras M1 y M14 para ambos.

En Cd y Cu, se presentan casi la totalidad de las muestras como “moderadamente contaminadas”. Para el Cd las excepciones a esta clasificación por los altos valores

presentados son M5 y M14 que vendrían siendo “extremadamente contaminadas” y las excepciones para el Cu, son M1, M5, M15 y M16 que toman la misma clasificación.

En cuanto al As, la mayoría de las muestras presenta “enriquecimiento moderado” con un promedio de 3,39. Sin embargo, destacan las muestras M2, M5, M13 y M14 que presentan “enriquecimiento significativo”.

Dicho esto, se puede decir que se tiene un gran aporte antropogénico para los metales de Cu, Pb y Zn, dado que son los elementos que presentan los mayores valores en promedio. También, dentro de los metales seleccionados de la tabla 15 podría influir el dicho caso del puerto de Arica donde, desde los puntos de almacenamiento hubo fugas de material que contenía algunos de estos metales hacia el exterior, según establece SMA, 2021. Sin embargo, no es posible verificar ello, dado que no se tienen muestras muy cercanas a este lugar, además de que el espacio alrededor de este se encuentra mayormente pavimentado, por su cercanía al centro de la ciudad. Una solución a esto, en un futuro sería tomar muestras de polvo depositado en la techumbre de las casas cercanas.

La muestra M5, ubicada en Oscar Bonilla/Barros Arana sobresale con un valor muy alto respecto a las otras muestras en el caso del Zn, lo que puede derivar de que, al estar en una zona industrial, el tráfico del sitio y los servicios mecánicos que existen en el lugar pueden llegar a lixiviar metales en el suelo (Radomirovic y col, 2020).

Los valores medios de FE de los metales presentes en los sitios muestreados siguen el siguiente orden decreciente: Zn (41,7) > Cu (20,9) > Pb (20,6) > Cd (12,1) > As (3,39) > Mn (2,37) > Al (0,51) > Ni (0,23) > Cr (0,15).

Finalmente, tomando en cuenta la variabilidad climática tanto para concentraciones totales, Igeo y FE, según Zafra - Megías (2015), en caso de tener un clima con lluvias debería disminuir las concentraciones depositadas sobre vías urbanas, ya que probablemente exista

una remoción de estos elementos. Sin embargo, se establece que las concentraciones metálicas asociadas con el sedimento vial están probablemente más determinadas por uso de suelo que la condición de precipitación. En el caso de Arica, su precipitación anual alcanza valores cercanos a 1 mm (INIA, 2016), lo que generalmente se da en verano debido al invierno boliviano, por lo que esta condición climática no debería tener influencia en una disminución de concentraciones, al contrario, deberían mantenerse iguales en el tiempo si es que no se intervienen, dado que es un clima extremadamente seco.

No obstante, hay un factor importante que ya se ha nombrado anteriormente en este trabajo, y es que la mayor influencia para llevar a diferencias en las concentraciones naturales del suelo aparte del uso y contaminación directa de este, podría ser el viento. El viento no sólo puede traer consigo problemas de transporte de contaminantes hacia otro lugar, si no, que además, estos acumulados en clima seco pueden afectar la salud de las personas por un deterioro tanto del aire, el suelo o la vegetación del entorno cuando estos son suspendidos por acción de este o por posible turbulencia inducida desde el tráfico vehicular (Amato, 2013), ya que nos encontramos en una ciudad donde los camiones de alto tonelaje tienen gran presencia, especialmente llegados desde Bolivia por la influencia del puerto y los Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos, que quedan prácticamente situados bajo la zona del sitio F. Especialmente, a nivel de salud, esto podría traer problemas a través de la inhalación de pequeñas partículas de 10 micras de diámetro o menos que pueden ser absorbidas en la región alveolar del pulmón (Bilos y col., 2001), lo que podría tener relación con el gran índice de cáncer pulmonar en la región.

3.6.3. Índice de carga contaminante

Tabla 16: Valores de ICC de sitios seleccionados con valores >1.

Sitios											
	M1	M5	M8	M10	M11	M12	M13	M14	M15	M16	M17
ICC	1,183	2,353	1,299	1,225	1,251	1,206	1,603	1,534	1,431	1,554	1,192

En la tabla 16 se observan los sitios seleccionados cuyos valores de ICC resultaron >1 , es decir, que presentan algún tipo de contaminación y por ende un deterioro progresivo. En general, los sitios que se destacan ya que presentan mayores valores según este índice en orden decreciente son: $M5 > M16 > M15 > M14$.

3.6.4. Comparación con estudios de similar problemática

3.6.4.1 Concentraciones de metales en diferentes estudios cercanos a relaves o explotaciones mineras.

En la Tabla 17, se observan los resultados de concentraciones de metales en los diferentes estudios nacionales e internacionales seleccionados, los cuales tienen como tema en común directa o indirectamente la actividad minera. Se escogen los elementos As, Cd, Cu, Pb y Zn dado que son estos los que, según lo investigado, mayormente se estudian cuando se trata de contaminación de suelos, agua o sedimentos por relaves mineros, además de ser algunos de los que generan una mayor problemática en la salud de las personas por su toxicidad como se explicó en secciones anteriores. También, estos vendrían siendo los que mayor presencia tienen por las altas concentraciones que presentan en los sitios contaminados presentados.

Tabla 17: Concentraciones de metales: As, Cd, Cu, Pb, Zn ($mg * L^{-1}$), de diversos estudios nacionales e internacionales respecto a estudio de suelos potencialmente contaminados (SPC) por actividad minera.

N° caso estudio	Estudio	As	Cd	Cu	Pb	Zn
1	Análisis de elementos traza metálicos en suelos de la ciudad de Arica y estudio caso polimetales correspondiente a contaminación por residuos mineros (Este trabajo).	22,7	7,68	266,5	207,9	1535
2	Análisis geoquímico y geoestadístico de la concentración elemental en los suelos de las comunas de Quintero y Puchuncaví (Zapata, 2020).	24,13	0,48	262,0	43,98	155,2
3	Impact of mining on the metal content of dust in indigenous villages of northern Chile (Zanetta – Colombo & col., 2022).	147	2,0	2000	88,0	547
4	Evaluación de riesgo preliminar por presencia de metales pesados y propuesta de gestiones ambiental para el sitio Trapiches Carlos Martínez y Caleta Hueso (Ocampo & Cortés, 2015).	455,5	2,83	1596	99,06	58,24
5	Afección de suelos agrícolas por metales pesados en áreas limítrofes a explotaciones mineras del Sureste de España (Balmonte & col., 2010).	556	-	320	5208	3274
6	Metales pesados en suelos bajo la influencia aurífera en los departamentos de Antioquia, Bolívar y Chocó (Llano, 2022).	-	1,09	-	64,56	-
7	Caracterización físico-química y mineralógica de suelos en zona carbonífera del Cesar, Colombia (Díaz & Arranz-González, 2013).	< LD	-	18,63	-	134,1
8	Evaluación de riesgos en la comuna de Arica por la presencia de polimetales en la matriz suelo (CICTUC, 2016).	19,91	7.76	-	53,35	-

9	Niveles de metales pesados en el ambiente y su exposición en la población luego de cinco años de exploración minera en Las Bambas, Perú 2010 (Astete & col., 2014).	3,58	< LD	49,1	33,1	88,6
---	---	------	------	------	------	------

Las concentraciones de As en promedio del presente análisis de suelos de Arica (22,7 mg/kg), son mayores a los estudios comparativos que presentan información de este elemento, a excepción de 3 y 4 correspondiente a la ciudad de Calama y el país de España respectivamente los cuales lo superan. Se destaca que el valor promedio de los 2 estudios de Arica (1 y 8) son bastantes cercanos uno de otro con valores de 22,7mg/kg y 21,7 mg/kg, lo que podría dar un indicio de que las concentraciones promedio en la ciudad de este metal se mantienen constantes.

El presente estudio de Arica, es superior en el Cd por más de 3 veces a las concentraciones de los otros estudios presentados. La misma tendencia se observa para el Zn (1535 mg/kg) y el Pb (207,9 mg/kg), en donde los promedios sólo son superados por el estudio hecho en España.

En el caso del Cu, los 266,6 mg/kg de Arica superan a los promedios de los estudios 2, 7 y 9. Sin embargo, es superada por el estudio 5, 4 y en mayor medida por el 3 correspondiente a Calama.

Las principales diferencias entre las concentraciones de los diversos estudios pueden deberse a diversos factores, pero dentro de los más importantes se encuentran el tipo de suelo con sus respectivas concentraciones naturales de metales, del tipo de minería correspondiente al relave minero estudiado, la distancia de los sitios seleccionados para su análisis y las condiciones climatológicas del lugar muestreado.

Finalmente, respecto al estudio 3 de Calama, dado que las características de este lugar son bastante similares a las de Arica, es importante destacar el análisis comparativo que se hace en cuanto al muestreo en suelo, techos, ventanas y atmósfera. Uno de estos resultados implica que, en suelos, las concentraciones fueron tres veces más bajas que los techos y dos veces más bajas que las ventanas muestreadas, por lo que sería prudente replicar este mismo método de muestreo en un futuro cercano para la ciudad de Arica. Esto, teniendo en cuenta que las similitudes climatológicas entre las ciudades de Arica y Calama, pueden derivar en que, según como establece Csavina & col. (2014), los factores climáticos como la baja cobertura de agua, las escasas precipitaciones, la alta evaporación y los fuertes vientos podrían mejorar la re - suspensión y el transporte de elementos potencialmente tóxicos (EPT) desde relaves a diferentes zonas que puedan verse afectadas.

3.7. Análisis estadístico

3.7.1. Análisis de componentes principales (ACP)

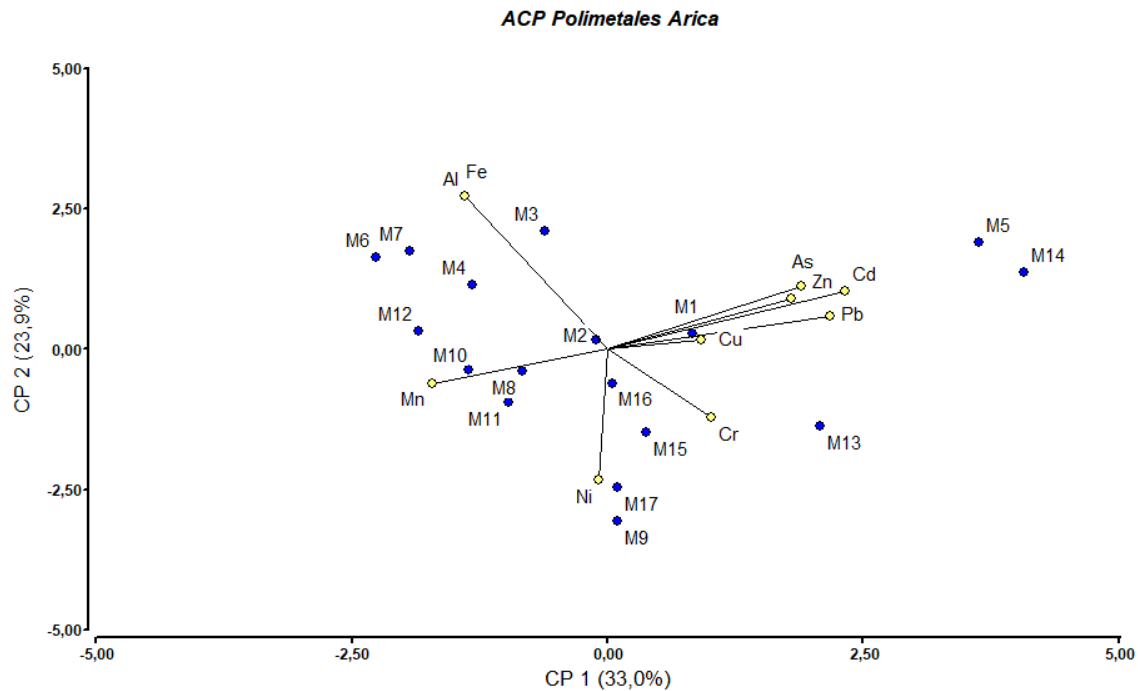


Figura 16: Gráfico ACP muestras de suelo Arica en relación con metales

El ACP permitió obtener un número reducido de combinaciones lineales de los 17 elementos analizados que explicasen la mayor variabilidad en los datos obtenidos. Para el caso de Arica, se extrajeron 2 componentes principales (CP), que fueron aquellos eigenvalores promedios mayores o iguales que 2.0. En conjunto, estos componentes explicaron un 56.9 % de la variabilidad en los datos originales (33% y 23,9%), por lo que los resultados obtenidos sólo sirven como una referencia aproximada.

De acuerdo con lo observado en la Figura 16, se tiene que las muestras M5 y M14 tienen una relación importante con los elementos As, Cd, Pb y Zn, lo que va de acuerdo con los índices anteriormente estudiados, ya que estas muestras vendrían siendo las que mayor

contaminación presentan respecto a estos metales. También M9 y M17 tienen importancia con el elemento Ni y M8, M10 y M11 con Mn.

3.7.2. Covariación de correlación de Pearson

Tabla 18: Correlación de Pearson sobre parámetros fisicoquímicos y metales. (CP = Correlación de Pearson; ** = la correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral). * = la correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral))

		pH	MO	Al	As	Cd	Fe	Mn	Zn
pH	CP	-						,795**	
MO			-		,666**				
Al				-			1,000**		
As			,666**		-				
Cd						-			,684**
Fe				1,000**			-		
Mn			,795**					-	
Zn							,684**		-

En la Tabla 18, se presentan los valores para las correlaciones de manera bi -variadas de Pearson, las cuales involucran los parámetros fisicoquímicos y los metales.

Se observa que, para el pH, se tiene una correlación positiva significativa con el elemento Mn. También, se destaca por parte de la correlación entre los metales, a los elementos Al y Fe que presentan una correlación de 1,0 con significancia 0,01, lo que significa que presentan una correlación positiva perfecta. Esto ocurre ya que los mencionados elementos son utilizados generalmente como una herramienta para establecer estándares de enriquecimiento/contaminación de los metales (Lizano & col., 2012), además de ser elementos con baja variabilidad de ocurrencia en suelos (Zanetta – Colombo & col., 2022).

En general no se observan mayores correlaciones entre los metales con los parámetros fisicoquímicos, ni tampoco entre ellos, lo que podría deberse a que no se mantienen mayormente fijos en los suelos, si no que tienen constante movilidad.

3.8. Discusión general

- Vistas todas las secciones tanto de comparación con normas e índices de calidad de suelos, se obtiene una perspectiva actual de ciertos sectores de la ciudad de Arica. Los altos niveles de As, Pb, Zn en gran parte de la ciudad, además de Cd y Cu en algunos puntos, pueden deberse a que las remediaciones llegaron tarde o incluso en su momento fueron ineficientes. Esto, dado que el estudio hecho por el ISP en 2006, detectó la presencia de altos niveles de metales en techo de viviendas cercanas a el primer relave que se asentó por parte de PROMEL, estableciendo que la remediación de este sitio no fue efectiva, lo cual luego en 2009 se corroboró por los altos niveles de Pb y As en suelo superficial medidos por la misma entidad (CONAMA, 2009). También, recién en Julio de 2021 (37 años después del acontecimiento) se informó “la remediación de espacios públicos en los sectores industriales 3 y 4” donde las muestras M1 y M5 son cercanas a estos y presentan concentraciones altas en Cu y Zn.
- Dentro de la remediación, como es conocimiento de la mayoría de la ciudadanía (y por lo reflejado en la encuesta), casi la totalidad de las obras de remediaciones de suelo, han sido pavimentado y reemplazo de este por suelo no contaminado. Sin embargo, en las ocasiones en que se ha hecho reemplazo, según conversaciones con vecinos donde actualmente se está haciendo este trabajo, han sido sin las condiciones necesarias para evitar que el levantamiento de suelo no llene de polvo sus casas, ni que este llegue a otras zonas cercanas, teniendo un posible efecto contrario de lo que se quiere lograr, que es descontaminar la ciudad en la medida de lo posible. Una vez

hecho las reclamaciones correspondientes por parte de los vecinos, recién se empezó a humedecer el suelo y a tomar más precauciones.

- En cuanto a las muestras, particularmente en la muestra M17 correspondiente al sector de “Quebrada Encantada” que es donde actualmente se están acopiando los suelos contaminados, se esperaban altas concentraciones de los metales de interés, pero dado que la muestra fue tomada por un tercero, lo más probable es que se haya tomado desde la superficie, la cual podría ser parte de la capa arcillosa, disminuyendo así las concentraciones originales. En caso contrario, para la muestra M4, se esperaban bajas concentraciones dado que correspondía al cuadrante que se utilizó como “blanco” en el estudio hecho en 2009, sin embargo, hubo otras muestras que promediaban valores menores en ciertos elementos, ante lo cual, es posible que sea necesario buscar nuevos sitios que cumplan con las características de línea base” o blanco.
- Respecto a la obtención de una muestra background, según la “Guía Metodológica para la Gestión de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes”, las muestras deben extraerse en zonas sin o con escasa intervención antrópica, que se emplazan en las cercanías del SPPC, dado que los procesos geológicos de formación del suelo deben ser similares (MMA, 2015). El sector de la muestra M4 cumple con estas condiciones dado que se encuentra dentro de la misma zona urbana de la ciudad, pero no es posible saber del todo si no presenta ningún tipo de intervención antrópicas por este mismo argumento. Además, se requiere un valor representativo, el cual, depende en cierta parte del área que se trate, pero según esta guía puede tomarse como referencia general, al menos 8. Generalmente en relaves mineros puede verse menos dificultosa la obtención de un sitio blanco porque estos se encuentran en su mayoría

muy alejados de las zonas urbanas según se observan en los “Mapas de localización Depósito de Relaves” proporcionados por SERNAGEOMIN, a excepción de algunos en la región de Antofagasta.

- El tener valores background del suelo pueden permitir tener una mejor visión y comparación entre diferentes sitios, obteniendo mejores resultados por ejemplo de Igeo y FE, los cuales permitirían saber con mayor fidelidad cuán contaminados se encuentran los suelos estudiados, ya que, en el presente caso de Arica y generalmente en otros estudios, se obtienen estos valores por parte de referencia extranjera, donde las diferencias geológicas entre los países con el sitio estudiado pueden ser significativas, afectando notoriamente los resultados y conclusiones.
- A pesar de que es importante obtener las concentraciones totales de los metales en los suelos de una ciudad o sector contaminado, esta, por sí sola no proporciona la mejor predicción de su solubilidad, movilidad, disponibilidad y, por tanto, de la cantidad que pueda ser transferida a los seres vivos a través de las diferentes barreras biológicas (Izquierdo, 2018). Como se observó, los EMEG y muchas de las normas de países de suelos, están basados en las concentraciones totales, asumiendo una absorción de los contaminantes del 100 %, de manera que el valor del riesgo calculado estaría sobreestimado (Ge et al. 2000). Por ello, una forma de estimar de mejor manera el posible riesgo en la población, es a través de la bioaccesibilidad de metales, que vendría siendo un tipo de biodisponibilidad, donde en la actualidad, las investigaciones emplean ensayos in vitro que simulan el proceso del sistema digestivo, ya que es aquí la fase final donde llegan los contaminantes y se solubilizan en el bajo pH del jugo gástrico del estómago.

- Es recomendable estudiar en detalle la climatología de la ciudad, ya que como se ha nombrado repetidamente en este trabajo investigativo, el viento podría llegar a ser uno de los factores más importantes en el traslado de los suelos contaminados y por ende también en la afectación de la salud de las personas, ya que, Molloy y col. (2020) en un estudio hecho en la región de Antofagasta sugieren que debido a la sequedad y los fuertes vientos que recibe el área, las partículas de polvo podrían viajar hasta 50 km, donde a veces estas masas de aire alcanzarían a pasar sobre un determinado sitio y depositar todo el polvo, pero otras veces puede que este permanezca suspendido y depositarse a muchos kilómetros de distancia de la fuente. Es por ello, que sería muy importante estudiar la techumbre de las casas de Arica abarcando la mayor área posible para observar si las concentraciones van disminuyendo o aumentando, dependiendo de la distancia de los hogares respecto a los sitios que históricamente estuvieron mayormente contaminados.
- También, es importante la comunicación con las organizaciones que se ven afectadas en el día a día por los contaminantes. La ley 20590 a pesar de que fue un gran avance para abordar la problemática, deja inconformes a gran parte de los afectados. Según se conversó con el grupo “mamitas del plomo”, tienen gran preocupación de que, los niños que nacieron después de que fue publicada esta Ley, no tienen derecho a los beneficios que esta otorga, en donde la preocupación va principalmente en que no pueden tener un diagnóstico de su estado de salud respecto a los polimetales, ya que no pueden optar a la toma de exámenes de sangre y orina que es parte de lo que cubre la Ley.

IV. CONCLUSIONES

- As, Cu, Pb y Zn son los metales que mayoritariamente sobrepasan los límites de normas extranjeras en la mayor parte de las muestras, especialmente tanto para la norma canadiense como brasileña de prevención, debido a que, son estos elementos los que tienen las más altas concentraciones en los suelos de Arica. Además, M1, M5 y M14, son las muestras que según el EMEG para la categoría infantes requieren evaluación de riesgo, ya que tienen 4 o más metales involucrados en la superación de este, por lo que presentarían un problema de salud para esta parte de la población.
- Según los índices de calidad de suelos, los metales que conllevan una mayor contaminación hacia casi la totalidad de las muestras son Pb y Zn. Para el caso de Cd y Cu, sólo un par de muestras tendrían un cierto nivel de contaminación, destacando siempre en este ámbito mayormente las muestras M5 y M14.
- Las correlaciones entre los metales y las características fisicoquímicas del suelo de Arica no resultaron ser significativas. Entre los mismos metales, tampoco se obtiene una mayor correlación, posiblemente debido a que son transportados constantemente por el viento a diferentes lugares de la ciudad, no quedando fijos. Sin embargo, Al y Fe resultaron tener una correlación muy significativa debido a su gran porcentaje en la corteza terrestre.
- En general los sitios más contaminados debido a las altas concentraciones que presentan serían Oscar Bonilla/Barros Arana (M5) y Luis Beretta Poncel (M14).

- Además, según el ICC, se sumarían a estos sitios contaminados los ubicados en Capitán Avalos con Azolas (M15) y Chapiquiña con la Paz (M16).
- La población de Arica muestra en su mayoría tener algún tipo de conocimiento sobre la problemática de polimetales y las afectaciones negativas que traen consigo la exposición a metales, sin embargo, sienten que no han sido afectados por esta ni tampoco tienen conocimiento general acerca de la Ley N° 20590. Además, en general, la población piensa que las medidas de remediación y la información respecto al tema han sido insuficientes.

V. RECOMENDACIONES

- Analizar polvo suspendido en los techos de las viviendas de la ciudad abarcando la mayor cantidad de sectores, además de obtener nuevamente concentraciones de metales del suelo, pero esta vez en su fracción bio accesible.
- Aplicar un seguimiento de la evolución de la concentración de los contaminantes a través de los años en los suelos de la ciudad.
- Estudiar en detalle la climatología de la ciudad, ya que el viento podría llegar a ser uno de los factores más importantes en el traslado de los suelos contaminados y por ende también en la afectación de la salud de las personas.
- Considerar estudiar y aplicar diferentes tipos de remediación de suelos que puedan ser de ayuda para la ciudad respecto a la problemática que presenta.

VI. REFERENCIAS

- **Abdi, H. & Williams, L. J.** (2010). 'Principal Component Analysis', Wiley Interdisc. Rev.: Comp. Stat.2(4), 433–459.
- **Abrol, I.P., Yadav, J.S.P., Massoud. I.** 1988. Salt affected soils and their management. FAO Soils Buletin 39
- **Adebowale, K.O., Agunbide, F.O. and OluOwolabi, B.** (2009). Trace Metal Concentration, Site Variations and Partitioning Pattern in Water and Bottom Sediments from Coastal Area: A Case Study of Ondo Coast, Nigeria. Environmental Research Journal, 3, 46.
- **Agriquem América S.A. (AGQ)** (2009). Análisis químico de suelos de la ciudad de Arica. Informe Final. (Diagnóstico actualizado de la calidad química del suelo y subsuelo urbano ciudad de Arica, para aplicar en caso necesario medidas de gestión y de regulación).
- **Analab (2012)**. Contaminación de suelos: principales puntos en el país. Artículo web. Recuperado en 15 de octubre de 2020 de [Enlace](#)
- **Andalucía Ambiental (2007)**. Remediación de suelos proyecto preparación y rehabilitación vía férrea Arica – Visviri. Recuperado en 3 de Julio de 2021 de [Enlace](#)
- **Amato F, Schaap M, Denier-van der Gon HAC, Pandolfi M, Alas-tuey A, Keuken M, et al.** Short-term variability of mineral dust, metals and carbon emission from road dust resuspension. Atmos Environ. 2013;74:134-40. Disponible en [Enlace](#)
- **Arbelo C., Mora J. L., Rodríguez A., Guerra J.A, Armas C.,** 2006. Salinidad y alcalinidad en suelos de las zonas aridas de Tenerife (Islas Canarias). Edafología, ISSN 1135-6863, Vol. 13, Nº. 3, 2006, págs. 171-179.
- **Astete, Jonh, Gastañaga, María del Carmen, & Pérez, Doris.** (2014). Niveles de metales pesados en el ambiente y su exposición en la población luego de cinco años de exploración minera en Las Bambas, Perú 2010. Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica, 31(4), 695-701.
- **Barbieri, M.** (2016). «The Importance of Enrichment Factor (EF) and Geoaccumulation Index (Igeo) to Evaluate the Soil Contamination». Geology & Geophysics, 5(1), 1-4. doi:10.4172/2381-8719.1000237.
- **Belmonte Serrato, F., Romero Díaz, A., Alonso Sarría, F., Moreno Brotóns, J., & Rojo López, S.** (2010). Afección de suelos agrícolas por metales pesados en áreas limítrofes a explotaciones mineras del Sureste de España. Papeles de Geografía, (51-52), 45–54.
- **Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.** (2020). Universidades, gremios y ONG trabajan con senadoras y senadores para redactar futura Ley Marco de Suelos. Observatorio Parlamentario. Asia Pacífico. Recuperado en 16 de octubre de 2022 de [Enlace](#)
- **Bilos, C., Colombo, J.C., Skorupka, C.N. y Rodriguez, M.J..** (2001). Sources, distribution and variability of airborne trace metals in La Plata City area, Argentina.Environmental Pollution 111, 149-158.

- **Burriel Marti, F., Arribas Jimeno, S., & Lucena Conde, F.** (1967). *Química analítica cualitativa: (teoría y semimicrométodos)* (6a ed.). Madrid, España: Paraninfo
- **CITUC. Centro UC – Toxicología.** (2016). Evaluación de riesgos en la comuna de Arica por la presencia de polimetales en la matriz suelo. Disponible en [Enlace](#)
- **Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA).** (2014). Diagnóstico regional de suelos abandonados con potencial presencia de 701 contaminantes. (pp. 1–110) [Informe final].
- **Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA).** (2017). Evaluación y caracterización del polvo negro en la comuna de Huasco e implementación de medidas de mitigación.
- **Colina, Carlos & López-Roldán, Pedro.** (1991). El análisis de componentes principales: aplicación al análisis de datos secundarios. *Papers. Revista de sociologia*; Núm.: 37 L'anàlisi multivariable de dades. 37. 10.5565/rev/papers/v37n0.1595.
- **Colombo L.D., Mangione S.B. & Figlioglia A.** 1998. Soil profile distribution of heavy metals in soil attended with sewage sludge for eight years. *Agr. Med. Inter. J. of Agric. Sci.* 128: 273-283.
- **Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA)** (2009). Programa maestro de intervención zonas con presencia de polimetales en Arica. Informe Público, Arica - Chile.
- **Cornejo P.** (2021). Proteger nuestros suelos: otra tarea pendiente. CIPER. Recuperado en 15 de marzo de 2021 de [Enlace](#)
- **Covarrubias, S. A., García Berumen, J. A., & Peña Cabriales, J. J.** (2015). El papel de los microorganismos en la biorremediación de suelos contaminados con metales pesados. *Acta Universitaria*, 25, 40–45.
- **Cuizano, Norma A., Reyes, Ursula F., Dominguez, Susana, Llanos, Bertha P., & Navarro, Abel E.** (2010). Relevancia del PH en la adsorción de iones metálicos mediante algas pardas. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 76(2), 123-130. Recuperado en 19 de junio de 2022, de [Enlace](#).
- **Diaz, Luis Carlos & Arranz-González, Julio.** (2013). Caracterización físico-química y mineralógica de suelos en zona carbonífera del Cesar. *Interciencia*.
- **Effendi H., Kawaroe M., Lestari D.F, Mursalin, Tri Permadi.** 2016. Distribution of Phytoplankton Diversity and Abundance in Mahakam Delta, East Kalimantan, *Procedia Environmental Sciences*, Volume 33, Pages 496-504, ISSN 1878-0296, <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.03.102>.
- **Ferrer, A.** (2003). Intoxicación por metales. *Anales del Sistema Sanitario de Navarra*, 26 (Supl. 1), 141-153. Recuperado en 19 de marzo de 2022, de [Enlace](#)
- **Fredes, Natalia & Martínez, Pablo & Bernava, Verónica & Osterrieth, Margarita.** (2009). Microartrópodos como indicadores de disturbio antrópico en entosoles del área recreativa de Miramar, Argentina. *Ciencia del Suelo*. 27. 89-101.

- **García, I., and C. Dorronsor.** 2005. Contaminación por Metales Pesados. En Tecnología de Suelos. Departamento de Edafología y Química Agrícola. Universidad de Granada, Granada. Disponible en [Enlace](#)
- **Ge Y, Murray P, Hendershot WH, (2000).** Trace metal speciation and bioavailability in urban soils. Environ Pollut 107:137–144.
- **González Soto, M.C., Hernández, L.A., Jiménez Mendoza, C.C., Ortega González, M.J., Padrón Padrón, P.A., Rodríguez Rodríguez, A. Torres Cabrera, J.M. and Vargas, G.E.** (1991): Primeros resultados sobre salinidad de suelos en Canarias. XVIII Reunión Nacional de Suelos. Comunicaciones. Dpto. de Edafología y Geología, Universidad de La Laguna, Tenerife, Spain. pp.425-440
- **Guerra, Jonathan & Arbelo, Carmen & Armas-Herrera, Cecilia & Rodríguez Rodríguez, Antonio & Mora, Juan.** (2003). Erosión diferencial de Andisoles y Aridisoles en dos zonas climáticas de la isla de Tenerife. EDAFOLOGIA. 10. 229-237.
- **Gutiérrez, R.** (2005). Análisis Cluster, nota de Universidad de Granada.
- **Heredia, D. R.** (2017). Intoxicación ocupacional por metales pesados. Medisan, 21(12), . Disponible en [Enlace](#)
- **Herrera Apablaza, Venecia, Carrasco Farías, Cristian, Sandoval Cárcamo, Patricia, & Cortés Carvajal, Claudia.** (2017). Transferencia de arsénico en el sistema aguasuelo-maíz de Zea Mays L. cultivados en la quebrada de Camiña, norte de Chile. Revista de la Sociedad Química del Perú, 83(1), 52-64. Disponible en [Enlace](#)
- **Hu H** (2019). Intoxicación por metales pesados. Kasper D, & Fauci A, & Hauser S, & Longo D, & Jameson J, & Loscalzo J(Eds.), Harrison. Principios de Medicina Interna, 19e. McGraw Hill. [Enlace](#)
- **Ibáñez J.** (2008). Los suelos de Chile y su geografía. Madrimadblogs, Geografía de Suelos y Megaedafología. Disponible en: [Enlace](#)
- **Instituto Nacional de Estadísticas (INE).** (2018). Síntesis de resultados Censo 2017. Informe público, INE, Santiago de Chile.
- **Instituto Nacional de Estadísticas (INE).** (2019). Anuario de estadísticas vitales, 2017. Informe público, INE, Santiago de Chile. Recuperado en 16 de octubre de 2022 de [Enlace](#)
- **Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA).** (2016). ATLAS. Zonificación agroclimática, Región de Arica y Parinacota. INIA. Ministerio de Agricultura, Chile. Disponible en [Enlace](#)
- **Izquierdo Díaz, Miguel (2018).** Bioaccesibilidad, biodisponibilidad y evaluación del riesgo para la salud humana por exposición a elementos traza en huertos urbanos. Tesis (Doctoral), E.T.S.I. de Minas y Energía (UPM). Disponible en [Enlace](#)
- **Mandal, Badal & Suzuki, K.T.** (2002). Arsenic Round the World: A Review. Talanta. 58. 10.1016/S0039-9140(02)00268-0.
- **mendoza-Escalona, Betty, Torres-Rodríguez, Duilio, Marcó, Lué Merú, Gómez, Carlos, Estanga-Barrios, Marisela, & García-Orellana, Yelitza.** (2021). Concentración de metales pesados en suelos agrícolas bajo diferentes

sistemas de labranza. *TecnoLógicas*, 24(51), 4-15. Epub August 27, 2021. Disponible en: [Enlace](#)

- **Ministerio del Medioambiente de Perú (MINAM)** (2014). Guía para muestreo de suelos en el marco del Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM, Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo. Disponible en: [Enlace](#)
- **Ministerio del Medioambiente (MMA)**. (2018). Cuarto reporte del Ministerio del Medioambiente. Informe público, MMA, Santiago de Chile. Recuperado en 22 de abril de 2022 de [Enlace](#)
- **Ministerio del Medioambiente de Chile (MMA)** (2013). Guía de muestreo y de análisis químicos, para la investigación confirmatoria y evaluación de riesgo en suelos/sitios con presencia de contaminantes. Disponible en: [Enlace](#)
- **Ministerio del Medioambiente de Chile (MMA)** (2013). Guía Metodológica para la Gestión de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes. Disponible en: [Enlace](#)
- **Moolenaar, S.W., T.M. Lexmond, and S.E.A.T.M. van der Zee**. 1997. Calculating heavy metal accumulation in soil: a comparison of methods illustrated by a case-study on compost application Agriculture, Ecosystems and Environment 66:71-82.
- **Moreno, E., C. Cámara, W.T. Corns, D.W. Bryce, P.B. Stockwell**. 2000. Arsenic speciation in beverages by direct injection-ion chromatography hydride generation atomic fluorescence spectrometry. *Journal of Automated Methods and Management in Chemistry* 22 33.
- **Müller, G.** (1979). Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins - Veränderungen seit. *Umschau* 79, 778–783.
- **Lawson, D. R. & J.W. Winchester**. (1979). A standard crustal aerosol as a reference for elemental enrichment factors. *Atmospheric Environment* 13: 925-930.
- **Likuku, A. S., Mmolawa, K. B., Gaboutloeloe, G. K.** 2013. Assessment of heavy metal enrichment and degree of contamination around the coppernickel mine in the Selebi Phikwe region, Eastern Botswana. *Environment and Ecology Research*, 1, 2, 32-40.
- **Lizano, Omar G., Alfaro, Eric J., & Salazar Matarrita, Alfonso**. (2012). Un método para evaluar el enriquecimiento de metales en sedimentos marinos en Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 60(Suppl. 2), 197-211.
- **Llano Vásquez, J.** (2022). Metales pesados en suelos bajo la influencia de la minería aurífera en los departamentos de Antioquia, Bolívar y Chocó. *Facultad de Ciencias Básicas*.
- **Londoño Franco, L. F., Londoño Muñoz, P. T., & Muñoz Garcia, F. G.** (2016). Los riesgos de los metales pesados en la salud humana y animal. *Biotecnología En El Sector Agropecuario Y Agroindustrial*, 14(2), 145–153. [https://doi.org/10.18684/BSAA\(14\)145-153](https://doi.org/10.18684/BSAA(14)145-153)

- **Longo D.L., & Kasper D.L., & Jameson J., & Fauci A.S., & Hauser S.L., & Loscalzo J(Eds.),** (2012). Harrison. Principios de Medicina Interna, 18e. McGraw Hill.
- **Lozano-Rivas, William Antonio.** (2018). Suelos: Guía de prácticas simplificadas en campo y laboratorio. 10.2307/j.ctv8j5r0.
- **Lutgens, Frederick K. and Tarbuck, Edward J.,** 2000. Essentials of Geology, 7th Ed., Prentice Hall.
- **Navarro-Aviñó, J. P., Aguilar- Alonso, L, López-Moya, J. R.** 2007. Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas. Ecosistemas. 16: 10-25
- **Ocampo Torrejón, & Cortés, I.** (2015). Evaluación de riesgo preliminar por presencia de metales pesados y propuesta de gestiones ambiental para el sitio Trapiches Carlos Martínez y Caleta Hueso [recurso electrónico] : Tesis (biólogo con mención en medio ambiente)--Universidad de Chile, 2015
- **Paúl F.** (2021). "Llevamos 36 años muriendo": las dramáticas consecuencias de los residuos tóxicos abandonados por Suecia en Chile hace tres décadas. BBC News Mundo. Disponible en [Enlace](#)
- **Pérez-Mora, Walter.** (2021). Evaluación del índice de geoacumulación de algunos metales pesados en suelos de cultivo de hortalizas en la ribera del río Bogotá. Revista ION, 34(1), 37-45. Epub January 01, 2021. Disponible en [Enlace](#)
- **Pineda, H.R.** (2004). Presencia de hongos micorrizicos arbusculares y contribución de Glomus Intraradices en la absorción y translocación de cinc y cobre en girasol (Helianthus Annuus L.) Tesis para obtener el grado de Doctor en Ciencias Universidad de Colima. Tecoman, Colima.
- **Radomirovic, Milena & Ćirović, Željko & Maksin, Danijela & Bakić, Tamara & Lukić, Jelena & Stankovic, Slavka & Onjia, Antonije.** (2020). Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Soil at a Former Painting Industry Facility. Frontiers in Environmental Science. 8. 1-15. 10.3389/fenvs.2020.560415.
- **Razmilic, B.** (1994). Espectroscopia de absorción atómica. En Control de calidad de insumos y dietas acuícolas. México Merck Química Chilena. Disponible en [Enlace](#)
- **Riquelme (2015).** Análisis estadístico de concentraciones y distribuciones de metales pesados para el municipio de Sentmenat, España. [Tesis de Pregrado]. Universidad católica de la santísima concepción. Disponible en: [Enlace](#)
- **Roco, Angela & Quiñones, Luis & Acevedo, Cristian & O., Zagmutt.** (2013). Situación del cáncer en Chile 2000 – 2010. Cuadernos médicos-sociales. 53. 83-94. Disponible en [Enlace](#)
- **Rodríguez Heredia, Dunia.** (2017). Intoxicación ocupacional por metales pesados. MEDISAN, 21(12), 3372-3385. Recuperado en 25 de abril de 2022, de [Enlace](#)
- **Romero Pavez, M.** (2017). Estudio de la contaminación por plomo en suelos de una planta de reciclaje de baterías cerrada en Freire, IX Región. Disponible en [Enlace](#).

- **Sadzawka, A., Carrasco, M.A., Grez, R., Mora, M.L., Flores, H. y Neaman, A.,** 2006a. Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile. Revisión 2006. Ministerio de Agricultura, Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Serie Actas INIA – N° 34. Centro Regional de Investigación La Platina. 164p. Disponible en [Enlace](#)
- **Servicio Agrícola y Ganadero (SAG).** (2005). Criterio de calidad en suelos agrícolas; Informe Público, SAG, Santiago de Chile. Disponible en [Enlace](#)
- **Shuman, L.M.** (1991). Chemical forms of micronutrients in soils. *Micronutrients in agriculture*, 113-144.
- **Silviera M.L.A., L.R.F. Alleoni, and L.R.G. Guillerme.** 2003. Biosolids and heavy metals in soils amended with co-composted sewage sludge. *J. Environ. Qual.* 20:387-395.
- **Soil Survey Division Staff.** Soil survey manual. 1993. Chapter 3, selected chemical properties. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 18.
- **Superintendencia del Medioambiente (SMA).** (2021). Formula cargos que indica a Terminal Puerto Arica S.A. Resolución exenta N°1/ROL F-046-2021. Disponible en [Enlace](#).
- **Tchernitchin, A.N., Lapin, N., Molina, L., Molina, G., Tchernitchin, N.A., Acevedo, C., Alonso, P.,** (2006). Human Exposure to Lead in Chile, in: Ware, G.W., Nigg, H.N., Doerge, D.R. (Eds.), *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. Springer, New York, NY, pp. 93–139. Recuperado en 25 de abril de 2022 [Enlace](#).
- **Trujillo-Gonzalez, Juan & Torres-Mora, Marco.** (2015). Niveles de contaminación en tres sectores de Villavicencio, a través del índice de geoacumulación(I-geo). *Revista Orinoquia.* 19. 109. 10.22579/20112629.344. Disponible en [Enlace](#).
- **Turekian, K., Wedepohl, K.** (1961). Distribución de los elementos en algunas unidades importantes de la corteza terrestre. *Boletín GSA;* 72 (2): 175-192. Disponible en: [Enlace](#)
- **Violante, A. and M. Pigna.** 2002. Competitive sorption of arsenate and phosphate on different clay minerals and soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66: 1788-1796.
- **Zafra-Mejía, Carlos, Santamaría-Galindo, Diana M, & Torres-Galindo, Cristian D.** (2015). Análisis climático de la concentración de metales pesados asociados al sedimento depositado sobre vías urbanas. *Revista de Salud Pública,* 17(3), 351-364. Disponible en [Enlace](#)
- **Zanetta-Colombo, Nicolás C., Fleming, Zoë L., Gayo, Eugenia M., Manzano, Carlos A., Panagi Marios, Valdés Jorge, Siegmund Alexander.** 2022. Impact of mining on the metal content of dust in indigenous villages of northern Chile, *Environment International,* Volume 169, 2022, 107490, ISSN 0160-4120, <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107490>.
- **Zapata Aguiló, V.** (2020). Análisis geoquímico y geoestadístico de la concentración elemental en los suelos de las comunas de Quintero y Puchuncaví.

VII. ANEXOS

ANEXO 1: Espectrometría de absorción atómica

La espectrometría de absorción atómica es una técnica utilizada para mediciones de más de 60 elementos de la tabla periódica principalmente en el rango de $\mu\text{g/ml}$ - ng/ml en una gran variedad de muestras. Tiene diversas aplicaciones, como en nuestro caso, el análisis de suelos. También tiene aplicaciones en aguas, muestras geológicas, muestras orgánicas, metales, aleaciones de petróleo y sus subproductos; y una amplia gama de muestras tanto en industrias químicas como farmacéuticas (Razmilic, 1994).

Esta técnica analítica se basa en utilizar la absorción de luz de las longitudes de onda intrínsecas de los átomos. Para que un átomo, pueda pasar desde el estado fundamental a un estado excitado, este necesita absorber energía, ya que experimenta una transición hacia un estado particular mayor, y dado que se encuentra en un estado inestable, regresa inmediatamente a su estado fundamental, donde es que se produce la emisión de radiación en un rango con su determinada frecuencia.

Cada átomo puede alcanzar diferentes estados con sus respectivas longitudes de onda características, donde se obtiene un espectro atómico, el cual presenta gran número de líneas discretas. Por ello, el análisis de absorción atómica se basa en la capacidad de los átomos para absorber radiación en bandas estrechas de longitud de onda específicas (λ_{esp}) para cada elemento.

El funcionamiento del equipo de absorción atómica, primeramente, debido a que la muestra en un principio está en forma líquida, se convierte a estado gaseoso mediante el nebulizador para así crear una niebla de la muestra.

Sin embargo, los elementos de una muestra a analizar no se encuentran en un “estado libre”, si no, que se combinan con otros elementos invariablemente formando

moléculas. Es por ello, que se necesita dividir esta molécula hasta poder liberar los átomos. Este proceso se llama atomización, donde el método más popular es la disociación por calor, y es aquí, donde las muestras se calientan a una temperatura muy alta para que las moléculas se conviertan en átomos libres, mediante el método de llama, en el que se utiliza una llama química como fuente de calor; y un método sin llama, en el que se utiliza un horno eléctrico muy pequeño. Para el método de llama, teniendo en cuenta la sensibilidad del análisis, la seguridad, la facilidad de uso, el costo y otros puntos; hay cuatro llamas estándar utilizadas: aire-acetileno, óxido nitroso-acetileno, aire-hidrógeno y argón-hidrógeno.

Finalmente, la excitación es realizada por una lámpara de cátodo hueco que contiene el mismo elemento a analizar, la cual que emite una radiación específica a una determinada longitud de onda característica del elemento y que sea capaz de atomizar estos analitos. La radiación absorbida por la muestra es registrada por el monocromador y el detector, los que luego envían la señal al computador para su respectivo registro.

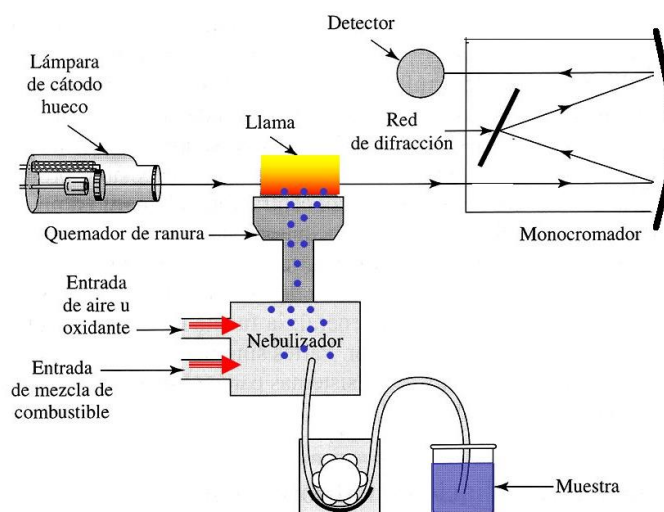
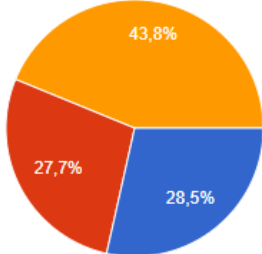
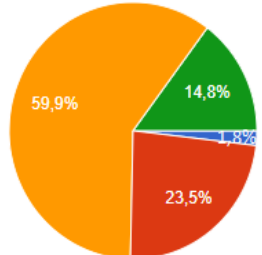
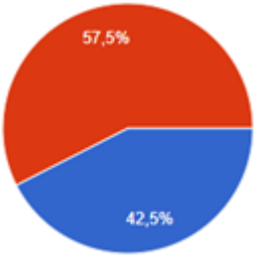
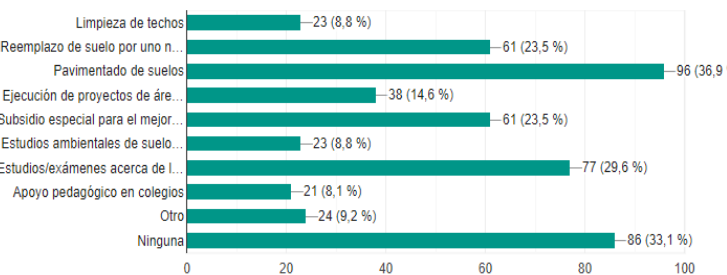


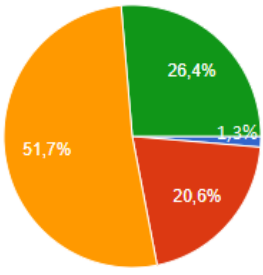
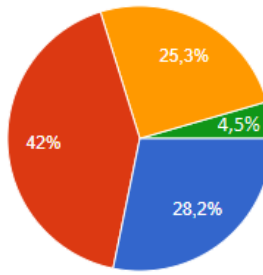
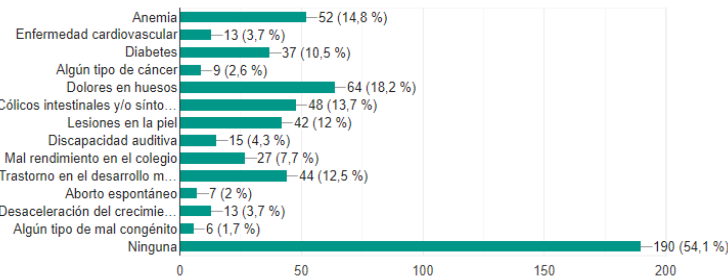
Figura 17: Esquema del funcionamiento del equipo de EAA (Ferrer, 2017).

ANEXO 2: Encuesta realizada a la población de Arica

Tabla 19: Primera sección “ Encuesta para seminario de título: Análisis de concentración de metales en suelos de la ciudad de Arica (caso “Polimetales”)”

PREGUNTAS	GRÁFICO	ALTERNATIVAS
1.- ¿Cuál es el nivel de conocimiento acerca de la problemática de polimetales en Arica?		<ul style="list-style-type: none"> ● Alto ● Medio ● Bajo ● No sé acerca del tema
2.- ¿Cuál es el nivel de conocimiento que tiene ud acerca de la Ley N° 20590?		<ul style="list-style-type: none"> ● Alto ● Medio ● Bajo ● Ningún tipo de conocimiento

<p>3.- ¿Encuentra que ud ha sido afectado por esta problemática?</p>		<ul style="list-style-type: none"> ● Si ● No ● Tal vez (No estoy seguro/a)
<p>4.- ¿Cree ud que se ha informado correctamente a la población de Arica acerca del tema?</p>		<ul style="list-style-type: none"> ● Sí, completamente ● Si, pero aún falta que se de más información ● No, ha sido insuficiente ● No se ha informado nada a la población
<p>5.- ¿Tiene conocimiento de algún tipo de reparo/remediación que han hecho en su población o en las zonas afectadas? (por ejemplo, limpieza de techos, reemplazo del suelo, pavimentado, etc).</p>		<ul style="list-style-type: none"> ● Si ● No
<p>6.- Si su respuesta anterior fue Si, ¿de cuál/es de las siguientes reparaciones/remediaciones/medidas tiene conocimiento ud que se han hecho en su población o en las zonas afectadas? (Puede escoger más de una).</p>		

<p>7.- ¿Cree que las soluciones han sido eficientes para reparar el daño?</p>		<ul style="list-style-type: none"> ● Sí, completamente ● Sí, pero no en su totalidad ● No, han sido insuficientes ● No se ha solucionado nada
<p>8.- ¿Qué nivel de conocimiento tiene acerca de las afectaciones en la salud que puede tener una exposición prolongada a metales como el plomo, arsénico, cadmio, mercurio, entre otros?</p>		<ul style="list-style-type: none"> ● Alto (Dominio en enfermedades, tipo de síntomas, tiempo de exposición, toxicidad, etc) ● Medio ● Bajo ● Ningún tipo de conocimiento
<p>9.- ¿Ha sufrido ud o algunos de sus hijos (si es que tiene) alguno de estos síntomas y/o enfermedades ¿ (Puede escoger más de una).</p>		

ANEXO 3: Datos geográficos muestreo

Tabla 20: Medidas de terreno de muestreo

Características	Dimensiones
Longitud	5784 m
Perímetro	15,55 km
Área	12,83 km ²

Tabla 21: Coordenadas de los puntos muestreados de suelo.

Muestra	Coordenadas WGS-84	
M1	18° 27' 27'' S	70° 17' 04'' O
M2	18° 27' 50'' S	70° 17' 01'' O
M3	18° 28' 01'' S	70° 17' 44'' O
M4	18° 29' 14'' S	70° 17' 08'' O
M5	18° 27' 44'' S	70° 17' 29'' O
M6	18° 26' 46'' S	70° 16' 54'' O
M7	18° 27' 39'' S	70° 17' 10'' O
M8	18° 28' 41'' S	70° 18' 03'' O
M9	18° 28' 43'' S	70° 18' 18'' O
M10	18° 28' 45'' S	70° 17' 05'' O
M11	18° 28' 26'' S	70° 18' 03'' O
M12	18° 28' 46'' S	70° 19' 18'' O
M13	18° 28' 02'' S	70° 16' 52'' O
M14	18° 27' 39'' S	70° 17' 54'' O
M15	18° 27' 21'' S	70° 16' 50'' O
M16	18° 27' 51'' S	70° 17' 09'' O
M17	18° 27' 50'' S	70° 16' 19'' O



Figura 18: Mapa con zonas de mayor contaminación demarcados en rojo de forma aproximada, según estudio de CONAMA, 2009.

ANEXO 4: Resultados parámetros fisicoquímicos

a. pH, CE, color y textura.

Tabla 22: Datos experimentales de pH, conductividad eléctrica (CE) y color en los suelos de Arica.

N° indicador	pH	CE (mS)	Clasificación de color
M1	7,5 ± 0,02	7,0, ± 0,03	7,5YR 5/3
M2	7,3 ± 0,02	7,2 ± 0,02	7,5 YR 4/2
M3	7,8 ± 0,01	6,4 ± 0,02	7,5 YR 4/1
M4	7,5 ± 0,00	7,3 ± 0,01	7,5YR 6/3
M5	7,6 ± 0,01	6,6 ± 0,04	7,5YR 5/5
M6	7,7 ± 0,02	6,7 ± 0,02	7,5YR 6/1
M7	7,6 ± 0,01	7,0 ± 0,01	7,5YR 5/2
M8	8,1 ± 0,01	6,1 ± 0,03	7,5YR 6/1
M9	7,5 ± 0,00	6,7 ± 0,03	7,5YR 5/2
M10	7,8 ± 0,02	4,2 ± 0,04	7,5YR 6/2
M11	7,6 ± 0,02	5,8 ± 0,03	7,5YR 5/2
M12	7,9 ± 0,02	3,6 ± 0,02	7,5YR 5/4
M13	7,8 ± 0,02	6,4 ± 0,03	7,5YR 6/2
M14	6,2 ± 0,00	6,5 ± 0,03	7,5YR 4/4
M15	7,6 ± 0,00	5,6 ± 0,01	7,5YR 5/2
M16	7,9 ± 0,01	5,2 ± 0,04	7,5YR 5/2
M17	7,4 ± 0,00	7,3 ± 0,02	7,5YR 5/3
Agua desio	7,2 ± 0,02	0,00 ± 0,00	
Mínimo	6,2	3,56	
Máximo	8,1	7,30	
Promedio	7,58	6,20	
Desviación estándar	0,408	1,05	

b. Humedad – factor de humedad (%)

Humedad,

$$\text{HUMEDAD \%} = \frac{a-b}{b-c} \times 100$$

Ecuación 8

Donde:

a: masa en g del suelo seco al aire + recipiente,

b: masa en g del suelo seco a 105°C + recipiente,

b: masa en g del recipiente,

Factor de humedad,

$$\text{fh} = \frac{100+\text{humedad}(\%)}{100}$$

Ecuación 9

Tabla 23: Datos experimentales necesarios para el cálculo de humedad y fh en los suelos de Arica,

Muestra	Masa muestra + recipiente (g)	Masa luego de estufa (g)	Humedad (%)	fh (%)
M1	81,6	81,0	1,19	1,01
M2	71,4	70,2	3,23	1,03
M3	78,3	77,7	1,23	1,01
M4	70,7	69,0	4,78	1,05
M5	79,0	78,2	1,76	1,02
M6	78,2	77,6	1,34	1,01
M7	68,7	67,9	2,24	1,02
M8	80,8	80,2	1,38	1,01
M9	75,6	74,3	3,47	1,03
M10	86,4	86,1	0,68	1,01

M11	81,2	80,7	1,02	1,01
M12	78,8	78,4	0,80	1,01
M13	72,2	71,6	1,52	1,02
M14	77,5	75,6	5,02	1,05
M15	81,6	81,0	1,32	1,01
M16	79,6	78,8	1,63	1,02
M17	70,2	69,6	1,67	1,02

c. % de CO y MO

Para calcular el %CO y posteriormente el %MO se utilizó las ecuaciones 10 y 11 respectivamente,

$$\text{CO}(\%) = \frac{v_1 - v_2}{s} \times M \times 0,39 \times fh$$

Ecuación 10

Donde:

v_1 : mL FeSO_4 gastados en el blanco,

v_2 : mL FeSO_4 gastados en la muestra,

M: Molaridad del FeSO_4 ,

S: peso en g de la muestra seca al aire,

Fh: Factor humedad,

$0,39 = \frac{3 \times 100 \times 1,3}{1000}$ (3 es el peso equivalente del carbono; 1,3 es el factor de compensación por la combustión incompleta de la materia orgánica),

$$\text{MO}(\%) = 1,724 \times \%C$$

Ecuación 11

Dónde: 1,724 es un factor empírico,

Tabla 24: Datos experimentales de CO y MO en los suelos de Arica,

Muestras	Volumen de titulación (mL)	CO (%)	MO (%)
Blanco	12,3	-	-
M1	10,3	0,39	0,68
M2	7,50	1,01	1,74
M3	5,50	1,33	2,30
M4	10,3	0,41	0,70
M5	7,50	0,94	1,62
M6	10,8	0,30	0,51
M7	11,8	0,10	0,17
M8	10,3	0,40	0,68
M9	10,5	0,35	0,61
M10	11,8	0,10	0,17
M11	9,30	0,59	1,02
M12	12,3	0,00	0,00
M13	7,50	0,94	1,62
M14	8,50	0,77	1,32
M15	9,30	0,59	1,02
M16	10,8	0,30	0,51
M17	10,3	0,40	0,68
Mínimo	-	-	0,00
Máximo	-	-	2,30
Promedio	-	-	0,90
Desviación estándar	-	-	0,63

d. Textura

Tabla 25: Resultados de % de limo, arcilla y arena, con la respectiva clasificación de cada suelo

Muestra	% Limo	Arcilla (%)	Arena (%)	Clasificación	Cte vel. (K)	Vel. Sedim. (3 cm/s)	Vel. Sedim. (10 cm/s)
M1	4,80	2,20	93,0	Arenoso	5000	2,5	48
M2	11,2	6,60	82,2	Arenoso	5000	2,5	48
M3	6,00	1,40	92,6	Arenoso	5000	2,5	48
M4	27,2	7,00	65,8	Franco arenoso	5200	2,4	46
M5	40,4	5,80	53,8	Franco arenoso	5200	2,4	46
M6	5,60	1,40	93,0	Arenoso	5200	2,4	46
M7	11,2	1,80	87,0	Arenoso	5200	2,4	46
M8	12,4	0,20	87,4	Arenoso	5000	2,5	48
M9	10,8	3,40	85,8	Arenoso	5000	2,5	48
M10	1,20	0,60	98,2	Arenoso	5000	2,5	48
M11	2,40	0,60	97,0	Arenoso	5000	2,5	48
M12	1,20	0,60	98,2	Arenoso	5000	2,5	48
M13	10,2	3,60	86,2	Arenoso	5200	2,4	46
M14	22,8	4,60	72,6	Franco arenoso	5200	2,4	46
M15	8,80	2,20	89,0	Arenoso	5200	2,4	46
M16	12,0	0,60	87,4	Arenoso	5000	2,5	48
M17	7,60	6,60	85,8	Arenoso	5000	2,5	48

ANEXO 5: Metales pesados totales,

5.1 Curvas de calibración de metales pesados,

5.1.1 Curva de calibración para Cr, Cd y Zn,

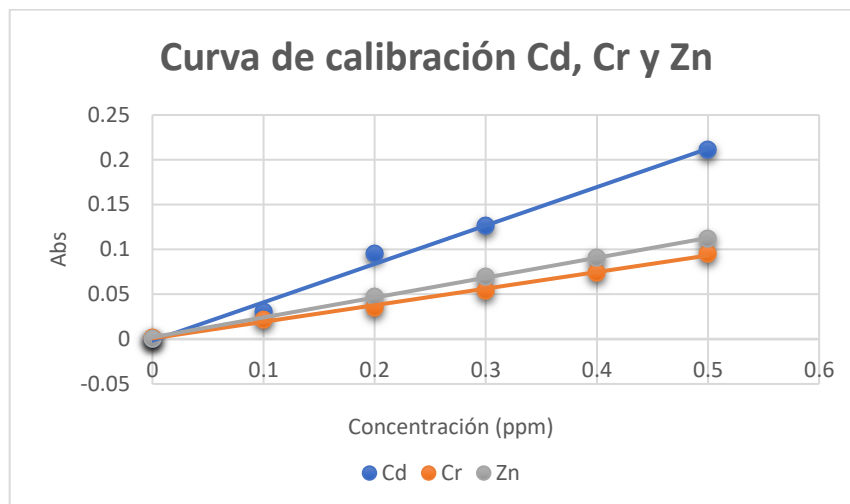


Figura 19: Curva de calibración de Cd, Cr y Zn,

5.1.2 Curva de calibración para Cu, Mn y Pb,

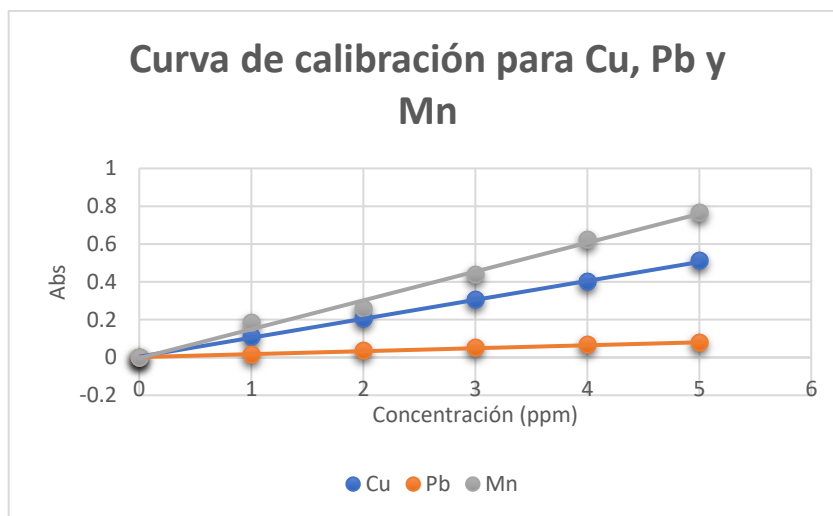


Figura 20: Curva de calibración de Cu, Pb y Mn,

5.1.3 Curva de calibración para Fe y Ni

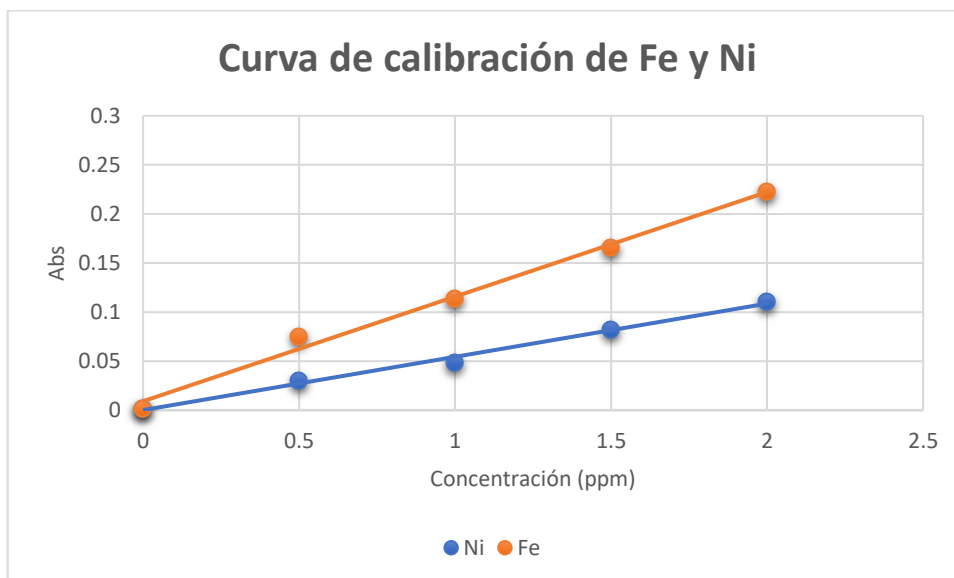


Figura 21: Curva de calibración de Fe y Ni,

5.1.4 Curva de calibración para Al y Mo,

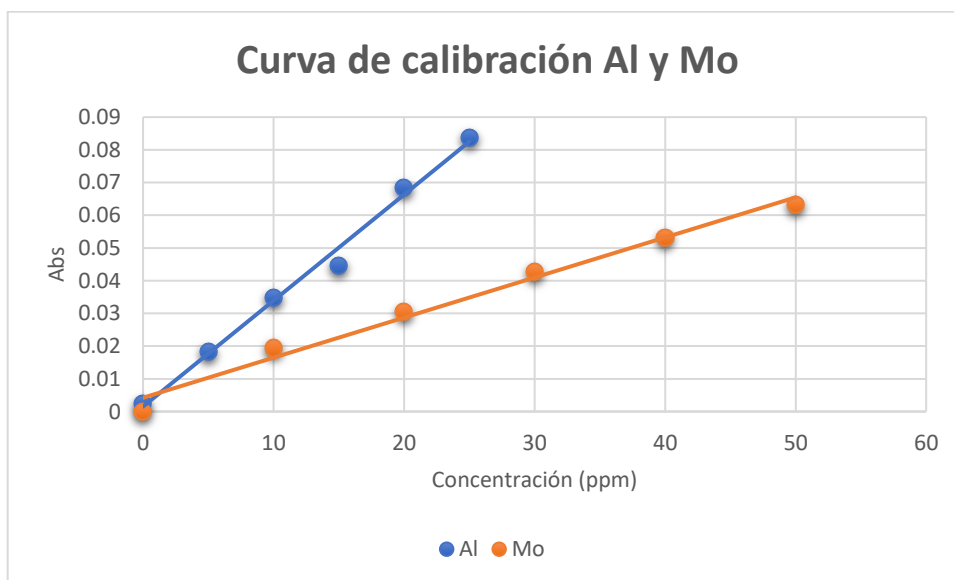


Figura 22: Curva de calibración de Al y Mo

5.1.5 Curva de calibración para As

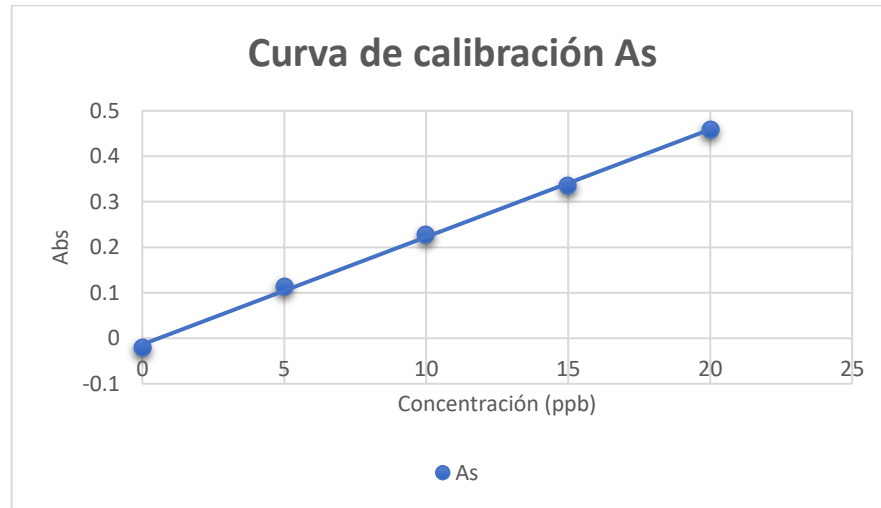


Figura 23: Curva de calibración de As

5.2 Concentración de metales pesados totales,

Para poder tener las concentraciones finales de cada metal, se aplicó la ecuación 12:

$$M \left(\frac{mg}{kg} \right) = \frac{a * d * v}{m}$$

Ecuación 12

M = concentración de elemento en la muestra, en base seca a $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$,

a = concentración, en mg/L, leída en la muestra digerida,

D = factor de dilución,

V = volumen, en L, de digerido,

M = masa, en kg, de muestra usada en la digestión,

A continuación, se muestra un ejemplo de cálculo para la muestra M16 de Cu:

$$Cu (mg * kg^{-1}) = \frac{2,65 (mg * L^{-1}) * 10 * 0,01 (L)}{0,2516^{-3} (kg)}$$

$$Cu (mg * kg^{-1}) = 1055,9 mg * kg^{-1}$$

Tabla 26: Datos experimentales de la concentración de As en la fracción total obtenidos del equipo de EAA,

Muestra	Masa muestra (mg)	Conc, Prom, c/dil, ($mg * L^{-1}$)	Factor de dilución	Conc, Prom, s/dil, ($mg * L^{-1}$)	Desviación Estándar
M1	0,2526	0,71	1:25	17,80	0,31
M2	0,2499	1,57	1:25	39,30	0,51
M3	0,2538	0,89	1:25	22,30	0,93
M4	0,2515	1,09	1:25	27,30	0,91
M5	0,2521	1,71	1:25	42,70	1,80
M6	0,2509	0,36	1:25	9,09	0,43
M7	0,2519	0,54	1:25	13,48	0,58
M8	0,2505	1,04	1:25	25,95	0,61
M9	0,2514	0,10	1:25	2,62	0,13
M10	0,2501	0,64	1:25	16,07	0,82
M11	0,2508	0,75	1:25	18,63	0,59
M12	0,2505	0,62	1:25	15,46	0,72
M13	0,2500	1,88	1:25	46,90	2,10
M14	0,2525	1,40	1:25	34,90	1,10
M15	0,2502	0,92	1:25	22,95	0,24
M16	0,2516	0,73	1:25	18,25	0,82
M17	0,2511	0,47	1:25	11,70	0,79

Tabla 27: Datos experimentales de la concentración de Al en la fracción total obtenidos del equipo de EAA,

Muestra	Masa muestra (mg)	Conc, Prom, c/dil, ($mg * L^{-1}$)	Factor de dilución	Conc, Prom, s/dil, ($mg * L^{-1}$)	Desviación Estándar
M1	0,2526	8,00	1:100	31277	182
M2	0,2499	10,4	1:100	40915	433
M3	0,2538	8,39	1:100	33495	341
M4	0,2515	5,54	1:100	21897	211
M5	0,2521	5,25	1:100	20580	172
M6	0,2509	5,03	1:100	19764	148
M7	0,2519	5,49	1:100	21576	156
M8	0,2505	4,55	1:100	18034	194
M9	0,2514	0,930	1:100	3702	136
M10	0,2501	3,48	1:100	13864	345
M11	0,2508	4,43	1:100	17605	51,6

M12	0,2505	5,46	1:100	21785	112
M13	0,2500	4,17	1:100	16664	252
M14	0,2525	7,71	1:100	30645	336
M15	0,2502	4,07	1:100	16252	771
M16	0,2516	4,43	1:100	17646	552
M17	0,2511	3,18	1:100	12550	482

Tabla 28: Datos experimentales de la concentración de Cd en la fracción total obtenidos del equipo de EAA,

Muestra	Masa muestra (mg)	Conc, Prom, c/dil, ($mg * L^{-1}$)	Factor de dilución	Conc, Prom, s/dil, ($mg * L^{-1}$)	Desviación Estándar
M1	0,2526	0,0129	1:10	5,15	0,0104
M2	0,2499	0,0131	1:10	5,24	0,0268
M3	0,2538	0,0138	1:10	5,51	0,0392
M4	0,2515	0,0127	1:10	5,1	0,0582
M5	0,2521	0,0318	1:10	6,73	0,0243
M6	0,2509	0,0150	1:10	6,02	0,0842
M7	0,2519	0,0111	1:10	4,46	0,0710
M8	0,2505	0,0144	1:10	5,74	0,0612
M9	0,2514	0,0132	1:10	5,28	0,0451
M10	0,2501	0,0129	1:10	5,15	0,0917
M11	0,2508	0,0141	1:10	5,65	0,0589
M12	0,2505	0,0142	1:10	5,7	0,0166
M13	0,2500	0,0116	1:10	4,64	0,0117
M14	0,2525	0,0140	1:10	5,61	0,0433
M15	0,2502	0,0109	1:10	4,36	0,0612
M16	0,2516	0,0131	1:10	5,24	0,0032
M17	0,2511	0,0109	1:10	4,36	0,0457

Tabla 29: Datos experimentales de la concentración de Cr en la fracción total obtenidos del equipo de EAA,

Muestra	Masa muestra (mg)	Conc, Prom, c/dil, ($mg * L^{-1}$)	Factor de dilución	Conc, Prom, s/dil, ($mg * L^{-1}$)	Desviación Estándar
M1	0,2526	0,0105	1:10	4,19	0,00106

M2	0,2499	0,0054	1:10	2,15	0,00122
M3	0,2538	0,0105	1:10	4,19	0,106
M4	0,2515		1:10	1,73	0,0156
M5	0,2521	0,0159	1:10	6,34	0,046
M6	0,2509	0,0081	1:10	6,45	0,052
M7	0,2519	0,0110	1:10	4,41	0,0089
M8	0,2505	0,0137	1:10	5,48	0,076
M9	0,2514	0,0167	1:10	6,67	0,0873
M10	0,2501	0,0129	1:10	5,16	0,0701
M11	0,2508	0,0140	1:10	5,59	0,134
M12	0,2505	0,0242	1:10	9,68	0,182
M13	0,2500	0,0280	1:10	11,2	0,126
M14	0,2525	0,0212	1:10	8,49	0,125
M15	0,2502	0,0194	1:10	7,74	0,21
M16	0,2516	0,0159	1:10	6,34	0,106
M17	0,2511	0,0202	1:10	8,06	0,106

Tabla 30: Datos experimentales de la concentración de Cu en la fracción total obtenidos del equipo de EAA,

Muestra	Masa muestra (mg)	Conc, Prom, c/ dil, ($mg * L^{-1}$)	Factor de dilución utilizado	Conc, Prom, s/ dil, ($mg * L^{-1}$)	Desviación Estándar
M1	0,2526	1,32	1:10	515,7	17,3
M2	0,2499	0,427	1:10	168,7	2,23
M3	0,2538	0,703	1:10	279	4,84
M4	0,2515	0,212	1:10	84	1,45
M5	0,2521	1,57	1:10	617,7	15
M6	0,2509	0,331	1:10	130,5	5,1
M7	0,2519	0,282	1:10	111,1	1,42
M8	0,2505	0,476	1:10	189,8	8,1
M9	0,2514	0,426	1:10	169	5,6
M10	0,2501	0,336	1:10	133,9	2,88
M11	0,2508	0,434	1:10	172,5	3,91
M12	0,2505	0,331	1:10	131,9	4,32
M13	0,2500	0,465	1:10	185,9	9,93
M14	0,2525	0,429	1:10	170	5,06
M15	0,2502	0,767	1:10	306,4	11,1

M16	0,2516	2,65	1:10	1055	18,5
M17	0,2511	0,273	1:10	108,9	3,78

Tabla 31: Datos experimentales de la concentración de Fe en la fracción total obtenidos del equipo de EAA,

Muestra	Masa muestra (mg)	Conc, Prom, c/dil, ($mg * L^{-1}$)	Factor de dilución	Conc, Prom, s/dil, ($mg * L^{-1}$)	Desviación Estándar
M1	0,2526	5,67	1:100	22698	44,6
M2	0,2499	5,95	1:100	23807	343
M3	0,2538	7,03	1:100	28113	177
M4	0,2515	6,86	1:100	27438	1040
M5	0,2521	6,46	1:100	25842	1105
M6	0,2509	7,29	1:100	29162	856
M7	0,2519	7,51	1:100	30030	187
M8	0,2505	6,24	1:100	24961	611
M9	0,2514	4,65	1:100	18590	894
M10	0,2501	6,53	1:100	26109	411
M11	0,2508	6,00	1:100	24010	148
M12	0,2505	6,98	1:100	27932	183
M13	0,2500	5,22	1:100	20870	237
M14	0,2525	5,82	1:100	23265	791
M15	0,2502	5,45	1:100	21817	471
M16	0,2516	6,03	1:100	24126	920
M17	0,2511	5,14	1:100	20578	734

Tabla 32: Datos experimentales de la concentración de Mn en la fracción total obtenidos del equipo de EAA,

Muestra	Masa muestra (mg)	Conc, Prom, c/dil, ($mg * L^{-1}$)	Factor de dilución	Conc, Prom, s/dil, ($mg * L^{-1}$)	Desviación estándar
M1	0,2526	2,00	1:10	786,3	17,0
M2	0,2499	1,66	1:10	657	8,94
M3	0,2538	1,83	1:10	726,9	15,6
M4	0,2515	1,75	1:10	696,6	15,7
M5	0,2521	1,77	1:10	700,7	18,8
M6	0,2509	2,09	1:10	821,8	14,5

M7	0,2519	1,69	1:10	667,5	13,6
M8	0,2505	2,03	1:10	811,5	12,3
M9	0,2514	1,69	1:10	672,1	8,25
M10	0,2501	2,02	1:10	809,3	9,91
M11	0,2508	2,07	1:10	824,3	13,0
M12	0,2505	2,32	1:10	925,8	15,3
M13	0,2500	1,78	1:10	712	2,91
M14	0,2525	1,22	1:10	484,3	9,72
M15	0,2502	1,81	1:10	724,9	17,1
M16	0,2516	2,07	1:10	822,1	25,8
M17	0,2511	1,95	1:10	780,7	1,62

Tabla 33: Datos experimentales de la concentración de Mo en la fracción total obtenidos del equipo de EAA,

Muestra	Masa muestra (mg)	Conc, Prom, c/ dil, ($mg * L^{-1}$)	Factor de dilución	Conc, Prom, s/ dil, ($mg * L^{-1}$)	Desviación estándar
M1	0,2526	< 0,5	1:10	< 0,5	< 0,5
M2	0,2499	< 0,5	1:10	< 0,5	< 0,5
M3	0,2538	< 0,5	1:10	< 0,5	< 0,5
M4	0,2515	< 0,5	1:10	< 0,5	< 0,5
M5	0,2521	< 0,5	1:10	< 0,5	< 0,5
M6	0,2509	< 0,5	1:10	< 0,5	< 0,5
M7	0,2519	< 0,5	1:10	< 0,5	< 0,5
M8	0,2505	< 0,5	1:10	< 0,5	< 0,5
M9	0,2514	< 0,5	1:10	< 0,5	< 0,5
M10	0,2501	< 0,5	1:10	< 0,5	< 0,5
M11	0,2508	< 0,5	1:10	< 0,5	< 0,5
M12	0,2505	< 0,5	1:10	< 0,5	< 0,5
M13	0,2500	< 0,5	1:10	< 0,5	< 0,5
M14	0,2525	< 0,5	1:10	< 0,5	< 0,5
M15	0,2502	< 0,5	1:10	< 0,5	< 0,5
M16	0,2516	< 0,5	1:10	< 0,5	< 0,5
M17	0,2511	< 0,5	1:10	< 0,5	< 0,5

Tabla 34: Datos experimentales de la concentración de Ni en la fracción total obtenidos del equipo de EAA,

Muestra	Masa muestra (mg)	Conc, Prom, c/	Factor de dilución	Conc, Prom, s/	Desviación estándar
----------------	--------------------------	-----------------------	---------------------------	-----------------------	----------------------------

		dil, (mg * L⁻¹)		dil, (mg * L⁻¹)	
M1	0,2526	0,0017	1:10	0,69	0,003
M2	0,2499	0,0173	1:10	6,93	0,012
M3	0,2538	< 0,3	1:10	< 0,3	< 0,3
M4	0,2515	0,0173	1:10	6,93	0,009
M5	0,2521	0,0225	1:10	9,01	0,022
M6	0,2509	< 0,3	1:10	< 0,3	< 0,3
M7	0,2519	0,0139	1:10	5,55	0,012
M8	0,2505	0,0243	1:10	9,71	0,012
M9	0,2514	0,0294	1:10	11,8	0,0080
M10	0,2501	0,0294	1:10	11,8	0,011
M11	0,2508	0,0261	1:10	10,5	0,021
M12	0,2505	0,0139	1:10	5,55	0,013
M13	0,2500	0,0191	1:10	7,63	0,033
M14	0,2525	0,0036	1:10	1,46	0,0006
M15	0,2502	0,0243	1:10	9,7	0,012
M16	0,2516	0,0220	1:10	8,81	0,013
M17	0,2511	0,0295	1:10	11,8	0,034

Tabla 35: Datos experimentales de la concentración de Pb en la fracción total obtenidos del equipo de EAA,

Muestra	Masa muestra (mg)	Conc, Prom, c/ dil, (mg * L⁻¹)	Factor de dilución	Conc, Prom, s/ dil, (mg * L⁻¹)	Desviación estándar
M1	0,2526	1,217	1:10	486,6	17,8
M2	0,2499	0,295	1:10	117,8	19,5
M3	0,2538	0,713	1:10	285,3	14,3
M4	0,2515	0,403	1:10	161,2	10,8
M5	0,2521	0,891	1:10	356,6	13,4
M6	0,2509	0,171	1:10	68,2	5,94
M7	0,2519	0,217	1:10	86,8	3,93
M8	0,2505	0,333	1:10	133,3	5,32
M9	0,2514	0,357	1:10	142,6	7,20
M10	0,2501	0,364	1:10	145,7	8,33
M11	0,2508	0,295	1:10	117,8	8,61
M12	0,2505	0,248	1:10	99,2	5,90
M13	0,2500	0,667	1:10	266,7	9,46
M14	0,2525	1,132	1:10	452,7	7,88
M15	0,2502	0,326	1:10	130,2	10,1

M16	0,2516	0,574	1:10	229,5	12,9
M17	0,2511	0,636	1:10	254,3	14,8

Tabla 36: Datos experimentales de la concentración de Zn en la fracción total obtenidos del equipo de EAA,

Muestra	Masa muestra (mg)	Conc, Prom, c/dil, ($mg * L^{-1}$)	Factor de dilución	Conc, Prom, s/dil, (mg/L-1)	Desviación estándar
M1	0,2526	0,344	1:100	1378	72,0
M2	0,2499	0,215	1:100	859	29,3
M3	0,2538	0,397	1:100	1587	28,2
M4	0,2515	0,127	1:100	508	81,8
M5	0,2521	1,992	1:100	7969	146
M6	0,2509	0,205	1:100	820	133
M7	0,2519	0,159	1:100	634	143
M8	0,2505	0,236	1:100	944	134
M9	0,2514	0,190	1:100	762	94,9
M10	0,2501	0,224	1:100	894	89,5
M11	0,2508	0,286	1:100	1144	80,5
M12	0,2505	0,280	1:100	1121	93,2
M13	0,2500	0,401	1:100	1604	90,7
M14	0,2525	0,623	1:100	2431	76,7
M15	0,2502	0,435	1:100	1740	81,8
M16	0,2516	0,219	1:100	875	59,4
M17	0,2511	0,806	1:100	716	27,3

a.- Concentración de fracción total de metales pesados con mayores concentraciones

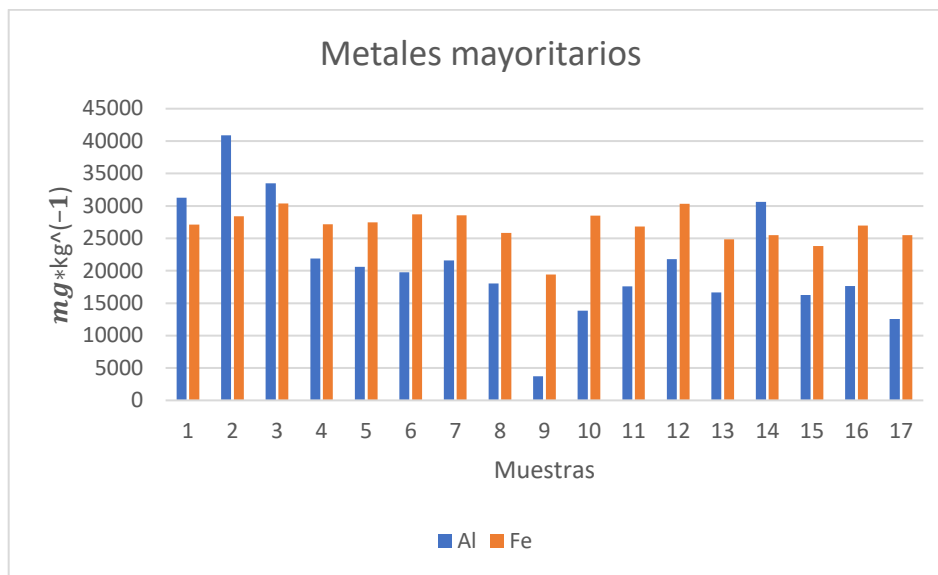


Figura 24 :Gráfico correspondiente a metales mayoritarios en los suelos de Arica

b.- Concentración de fracción total de metales con menores concentraciones

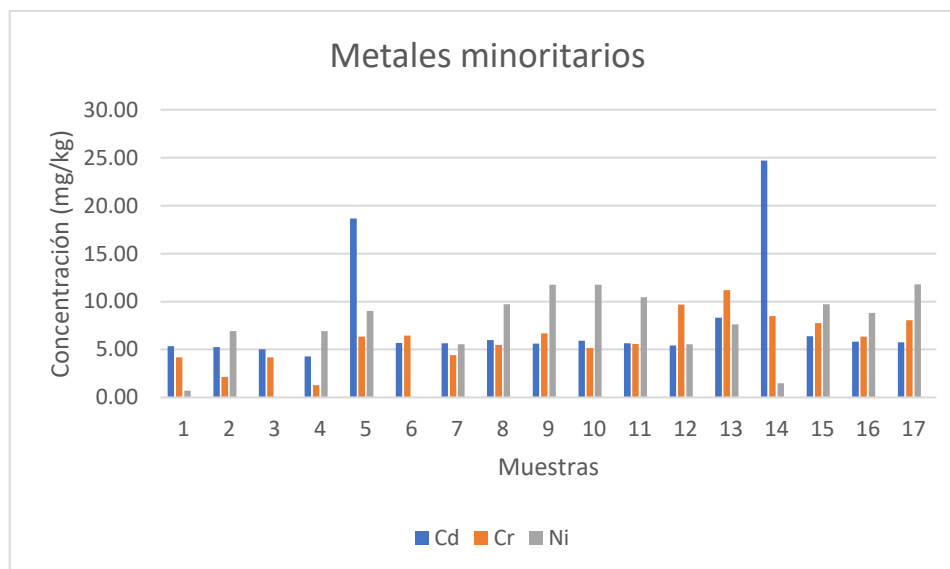


Figura 25: Gráfico correspondiente a metales mayoritarios en los suelos de Arica

ANEXO 6: Niveles referenciales de metales en normas extranjeras

Tabla 37: Niveles referenciales de normas internacionales expresados en mg/kg,

Metal	Canadá (uso residencial y de parques)	Australia (uso residencial con jardín)	México (uso residencial)	Sao Paulo (valor de prevención)
As	12	100	22	15
Cd	10	20	37	1,3
Cr	64	100	280	75
Cu	63	1000	--	60
Mn	--	1500	--	--
Mo	10	390	--	30
Ni	50	600	1600	30
Pb	140	300	400	72
Zn	200	7000	--	300

Fuente: Recopilado desde CENMA, 2014,

Tabla 38: EMEG para infantes y niños,

Elemento	EMEG infante	EMEG niño
Al	28571,4	39999,96
As	8,57	11,998
Cd	2,86	4,004
Cr	28,57	39,998
Cu	285,71	399,994
Fe	-	-
Ni	4571,4	6399,96
Mn	1142,8	1599,92
Mo	571,43	800,002
Pb	174,29	244,006
Zn	8571	11999,4

Fuente: CENMA, 2014 & CENMA, 2017

ANEXO 7: Fuentes de información de niveles basales utilizados para cálculo de FE e Igeo

Tabla 39: Niveles basales utilizados de cada elemento con su respectiva fuente de información,

Elemento	Nivel Basal (Bn)	Fuente de información
Al	80000	Turekian y Wedepohl (1961)
As	13	Turekian y Wedepohl (1961)
Cd	1,24	CENMA, 2014
Cr	83	CENMA, 2014
Cu	25	CENMA, 2014
Fe	42700	Turekian y Wedepohl (1961)
Ni	600	CENMA, 2014
Mn	68	Turekian y Wedepohl (1961)
Pb	20	Turekian y Wedepohl (1961)
Zn	71	CENMA, 2014

ANEXO 8: Mapa con indicación de cuadrante blanco

Figura 26: Mapa de Arica con el cuadrante “blanco” elegido (en azul) y zonas que históricamente tuvieron mayores concentraciones de elementos traza metálicos (en rojo).

ANEXO 9: Mapas con distribución de concentraciones ilustradas por color

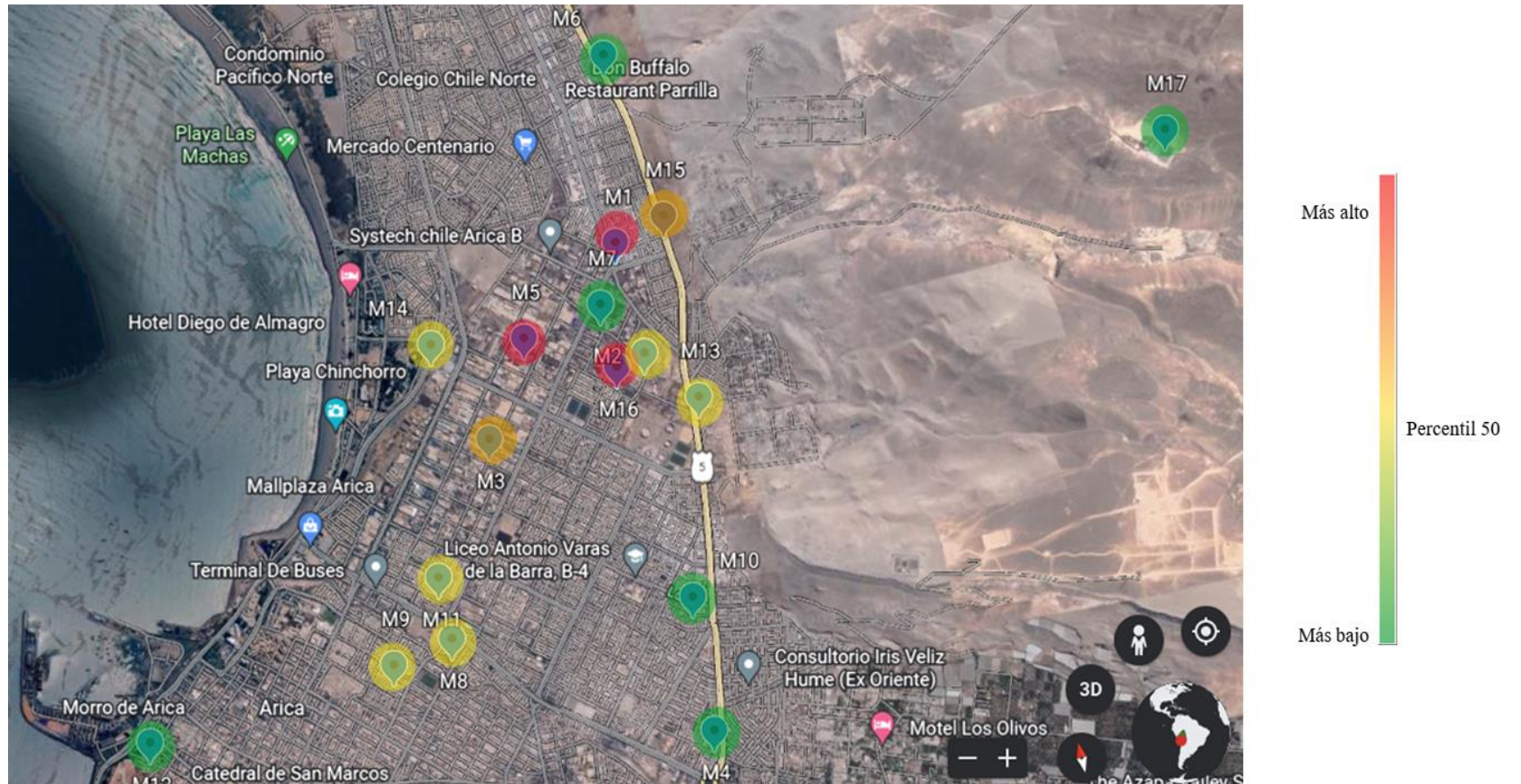


Figura 27 :Mapa con distribución de concentraciones de Cu aproximada

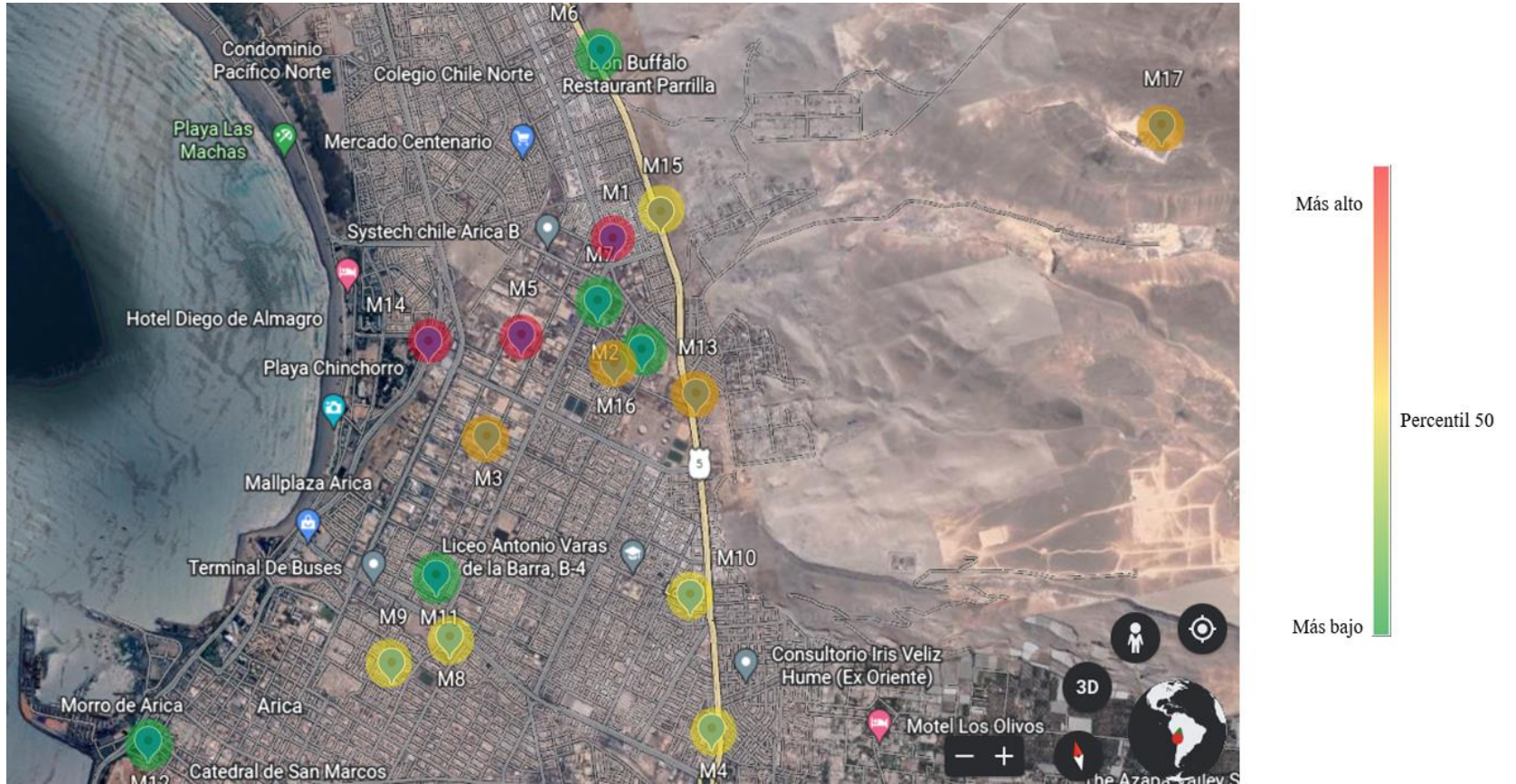


Figura 28: Mapa con distribución de concentraciones de Pb aproximada

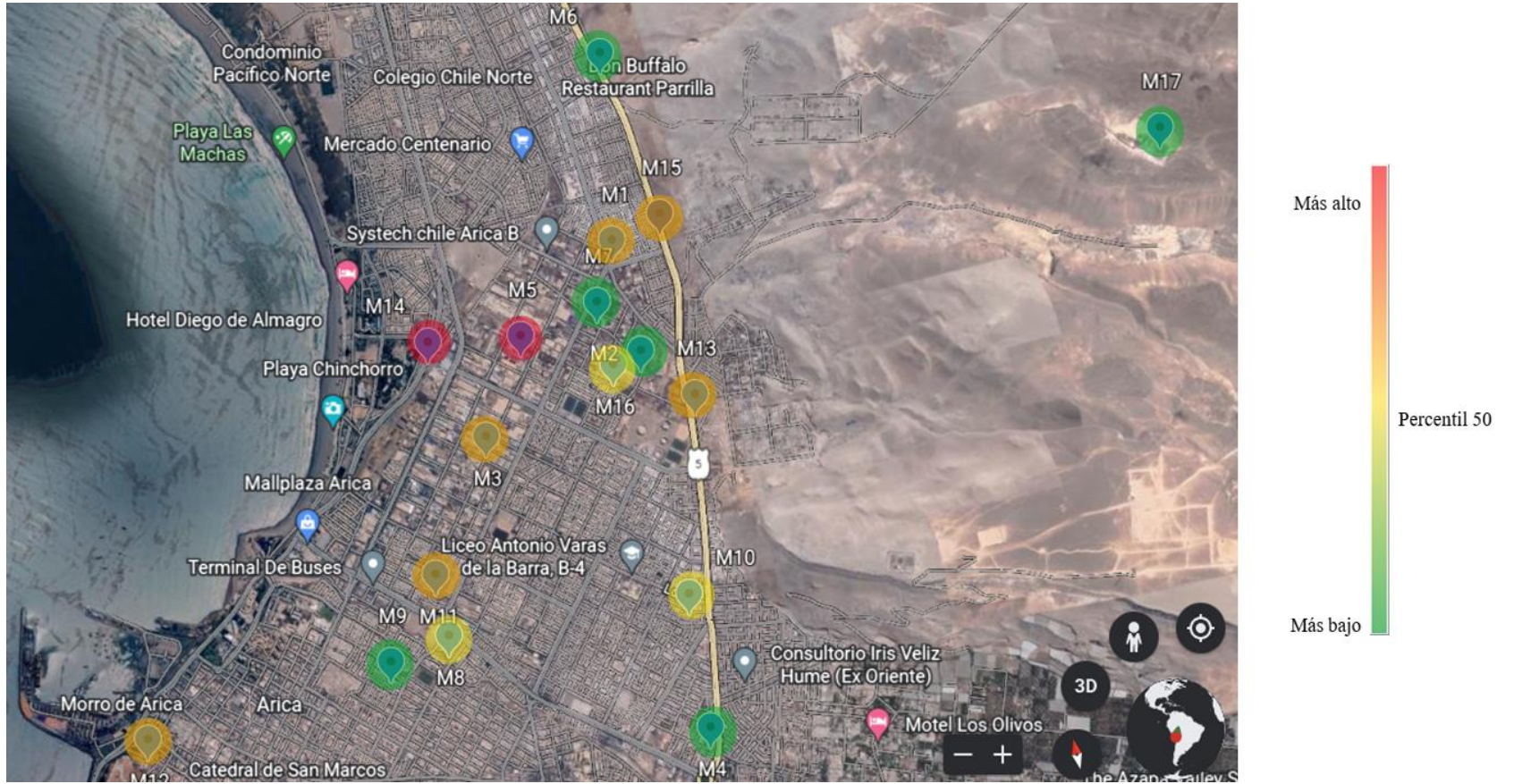


Figura 29: Mapa con distribución de concentraciones de Zn aproximada



Figura 30: Mapa con distribución de concentraciones de As aproximada

ANEXO 10: Valores Igeo y FE

Tabla 40: Valores de Igeo de elementos traza metálicos en suelos de la ciudad de Arica

	As	Al	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
M1	0,158	0,08	0,89	0,00918	1,15	0,0965	0,281	0	7,51	3,95
M2	0,16	0,105	0,86	0,00471	0,376	0,101	0,235	0,002	2,37	3,02
M3	0,14	0,084	0,81	0,00918	0,622	0,119	0,26	-	4,7	4,59
M4	0,044	0,056	0,70	0,00283	0,187	0,116	0,249	0,002	2,98	1,66
M5	0,17	0,053	3,08	0,0138	1,37	0,109	0,25	0,003	5,7	8,08
M6	0,15	0,051	0,94	0,0141	0,291	0,124	0,294	-	1,68	2,26
M7	0,068	0,055	0,93	0,00966	0,248	0,127	0,239	0,002	1,94	1,97
M8	0,136	0,046	0,97	0,012	0,423	0,106	0,29	0,003	2,59	2,05
M9	0,009	0,009	0,92	0,0146	0,377	0,079	0,24	0,004	2,72	3,09
M10	0,082	0,035	0,96	0,01131	0,298	0,111	0,289	0,004	2,76	3,47
M11	0,096	0,044	0,92	0,01225	0,385	0,102	0,295	0,004	2,37	4,18
M12	0,079	0,055	0,88	0,0212	0,294	0,118	0,331	0,002	2,11	4,18
M13	0,138	0,042	1,35	0,0244	0,415	0,0887	0,255	0,003	4,45	5,44
M14	0,156	0,077	4,02	0,0186	0,379	0,0989	0,173	0,001	7,03	8,08
M15	0,119	0,041	1,03	0,0169	0,683	0,0928	0,259	0,003	2,55	6,06
M16	0,094	0,044	0,94	0,0138	2,35	0,102	0,294	0,003	3,93	3,40
M17	0,058	0,032	0,94	0,0176	0,243	0,0875	0,279	0,004	4,27	2,71
PROM	0,11	0,053	1,24	0,013	0,59	0,10	0,27	0,003	3,63	4,01

Tabla 41: Valores de FE de elementos traza metálicos en suelos de la ciudad de Arica

	As	Al	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
M1	2,85	0,83	9,17	0,10	42,9	1,00	2,17	0,02	50,6	40,4
M2	5,99	1,03	8,52	0,05	13,4	1,00	2,17	0,20	11,7	24,0
M3	2,88	0,70	6,78	0,09	18,7	1,00	2,03	-	23,9	37,5
M4	3,61	0,48	5,99	0,03	5,78	1,00	2,00	0,18	13,9	15,0
M5	6,00	0,48	28,0	0,14	45,1	1,00	2,13	0,24	32,6	205
M6	1,13	0,41	7,56	0,13	8,45	1,00	2,22	-	5,52	18,7
M7	1,63	0,43	7,28	0,08	6,98	1,00	1,75	0,13	6,82	14,0
M8	3,77	0,43	9,18	0,13	14,4	1,00	2,56	0,27	12,6	25,1
M9	0,51	0,12	11,6	0,20	17,2	1,00	2,84	0,44	18,1	27,2
M10	2,23	0,31	8,64	0,11	9,68	1,00	2,44	0,31	13,2	22,8
M11	2,82	0,44	9,03	0,13	13,6	1,00	2,70	0,30	11,6	31,7
M12	2,01	0,46	7,39	0,20	8,92	1,00	2,61	0,14	8,38	26,7
M13	8,16	0,47	15,2	0,31	16,8	1,00	2,68	0,25	30,2	51,1
M14	5,45	0,78	40,7	0,21	13,8	1,00	1,64	0,04	45,9	69,5
M15	3,82	0,44	11,1	0,20	26,5	1,00	2,61	0,31	14,1	53,0
M16	2,75	0,43	9,21	0,15	82,6	1,00	2,68	0,25	22,4	24,1
M17	2,06	0,36	10,7	0,22	10,0	1,00	2,98	0,40	29,2	23,1
PRO M	3,39	0,51	12,1	0,15	20,9	1,00	2,37	0,23	20,6	41,7

ANEXO 11: Ubicaciones de las muestras de suelo en Arica

Tabla 42: Ubicación de muestras de suelos de la ciudad de Arica

Muestras	Ubicación (calles o sector)
M1	Linderos con Azolas
M2	Chapiquiña 3066
M3	Jaraquemada/Barros Arana
M4	Los cisnes con Los ruiseñores
M5	Oscar Bonilla/Barros Arana
M6	Capitan Avalos/Juan de Dios
M7	Andacollo con Río Blanco
M8	Carlos Pezoa Véliz con Pedro Aguirre Cerda
M9	Michimalongo con Cirujano Videla
M10	Las ñañucas con Azabache
M11	Raúl del canto con Dr alejandro fleming
M12	Costado morro de Arica
M13	Capitán ávalos (cercano a cementerio)
M14	Luis Beretta Poncel
M15	Capitán Avalos/Azola
M16	Chapiquiña con la Paz
M17	Quebrada encantada