



Universidad  
Continental

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental

Tesis

**Características físico-químicas  
de 5 suelos contaminados con Cromo  
en el Valle del Mantaro**

para optar el Título Profesional de  
Ingeniera Ambiental

**Colonio Chuquillanqui Geraldine Fiorela**

Huancayo, 2018



Repositorio Institucional Continental  
Tesis digital



Obra protegida bajo la licencia de [Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/peru/)

## **AGRADECIMIENTOS**

El presente trabajo de investigación me gustaría agradecer primeramente a Dios por velar mi camino, así también a la Universidad Continental por ser parte de mi formación profesional, a la Universidad Nacional Agraria La Molina, la Facultad de Agronomía - Departamento de suelos, Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes por haberme brindado el resultado de los Análisis de la Caracterización de suelos de las localidades de Molinos, Hualahoyo, Santa Rosa de Ocopa, Sincos y Huayucachi del Valle del Mantaro.

A mi asesor de tesis, Dr. Andrés Azabache Leyton porque con su conocimiento, experiencia y paciencia, me pudo guiar durante el desarrollo y elaboración de esta investigación. A mis jurados revisores; Ing. Elizabeth Guisella Machuca Manrique, Ing. Anival Peña Rojas y a la Ing. Carmencita Lavado Meza quienes me apoyaron y guiaron.

A mis padres y mis hermanos por ser quienes me acompañan día a día, por ser mis guías y mis ejemplos a seguir y por apoyarme a cumplir mis metas y objetivos. Y por ser el pilar más importante en mi vida.

Muchas gracias.

## **DEDICATORIA**

A mis Padres Celestiales; Padre Ahnsahnghong y a mi Madre Jerusalén, por ser todo en mi vida.

A mi madre Teófila, por ser mi guía en todo momento, por apoyarme día a día con sus consejos y ejemplos; para así poder cumplir cada una de mis metas trazadas, a mi padre Graciano, por ser mi ejemplo de perseverancia y lucha, a mis hermanos Alex y Moisés, porque son mi motivación para superarme día a día, por ser quienes siempre están conmigo y me apoyan.

## INDICE GENERAL

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>II</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>III</b>
<b>INDICE DE TABLAS</b> .....	<b>VIII</b>
<b>INDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>IX</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>X</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XI</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>XII</b>
<b>CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Planteamiento y formulación del problema</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1.1 Planteamiento del problema</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1.2 Formulación del problema</b> .....	<b>6</b>
<b>1.1.2.1 General</b> .....	<b>6</b>
<b>1.1.2.2 Específicos</b> .....	<b>6</b>
<b>1.2 Objetivos</b> .....	<b>6</b>
<b>1.2.1 General</b> .....	<b>6</b>
<b>1.2.2 Específicos</b> .....	<b>6</b>
<b>1.3 Justificación e Importancia</b> .....	<b>6</b>
<b>1.3.1 Justificación</b> .....	<b>6</b>
<b>a. Justificación ambiental</b> .....	<b>6</b>
<b>b. Justificación social</b> .....	<b>7</b>
<b>c. Justificación en lo académico</b> .....	<b>7</b>

1.3.2	Importancia de la Investigación .....	7
1.4	Hipótesis y descripción de variables .....	8
1.4.1	Hipótesis.....	8
1.4.1.1	General .....	8
1.4.1.2	Específicas.....	8
1.4.2	Descripción de variables .....	8
1.4.2.1	Variables independiente (X): .....	8
1.4.2.2	Variable dependiente (Y): .....	8
1.4.3	Indicadores de las variables en estudio .....	8
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....</b>		<b>10</b>
2.1	Antecedentes del problema .....	10
2.2	Base teórica .....	18
2.2.1	El cromo en el suelo .....	18
2.2.2	Fuentes del cromo.....	19
A.	Material parental del suelo: .....	19
B.	Deposición atmosférica:.....	19
C.	Industria .....	20
2.2.3	Transporte del cromo.....	20
2.2.4	Especiación de cromo .....	22
2.2.5	Efectos del Cromo .....	23
A.	En el ambiente .....	23
B.	Salud.....	24
2.2.6	Propiedades físicas del suelo .....	24
2.2.6.1	Textura.....	24
2.2.7	Propiedades químicas del suelo.....	26
2.2.7.1	pH.....	26
2.2.7.2	Materia orgánica .....	27
2.2.7.3	Carbonato de Calcio.....	29

2.2.7.4	Conductividad eléctrica .....	30
2.2.7.5	Fósforo disponible .....	30
2.2.7.6	Potasio disponible.....	31
2.2.7.7	Capacidad de intercambio catiónico .....	32
2.2.7.8	Cationes cambiables.....	32
2.2.7.9	Saturación de bases.....	33
2.2.7.10	Acidez intercambiable.....	33
2.2.8	La fertilidad del suelo.....	34
2.2.9	Relación del cromo con el pH, MO y CIC .....	35
a.	Relación del cromo con el pH:.....	35
b.	Relación del cromo con la MO:.....	36
c.	Relación del cromo con la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC): .....	36
2.2.10	Marco Legal.....	38
2.2.9.1.	Estándar de Calidad Ambiental – Canadá .....	38
2.2.9.2.	ECA para Suelo.....	38
2.2.11	Fundamentos metodológicos y técnicos.....	40
2.2.11.1.	Guía para el Muestreo de Suelos.....	40
A.	Tipo de muestreo.....	40
B.	Determinación de puntos de muestreo .....	42
C.	Técnicas de muestreo:.....	43
2.3	Definición de términos básicos: .....	44
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....		49
3.1.	Método y alcance de la investigación .....	49
3.1.1	Método de Investigación .....	49
3.1.1.1.	Método general de la Investigación .....	49
3.1.1.2.	Método específico de la investigación.....	49
3.1.2	Alcance de la investigación.....	52
3.2.1.1	Tipo de investigación.....	53

3.1.1.2 Nivel de investigación.....	53
3.2 Diseño de la investigación .....	54
3.3 Población y muestra .....	54
3.3.1 Población.....	54
3.3.2 Muestra .....	54
3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	58
<b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>66</b>
4.1 Resultados del tratamiento y análisis de la información.....	66
4.1.1. Análisis físico químico de los suelos en estudio .....	66
4.1.1.1 El pH .....	67
4.1.1.2 La conductividad eléctrica (CE).....	67
4.1.1.3 El contenido de Carbonato de calcio (CaCO <sub>3</sub> ) .....	68
4.1.1.4 Contenido de materia orgánica (MO) del suelo.....	69
4.1.1.5 Fósforo disponible .....	70
4.1.1.6 Potasio disponible .....	71
4.1.1.7 La capacidad de intercambio catiónico (CIC) .....	72
4.1.1.8 La textura del suelo.....	73
4.1.1.9 Los cationes intercambiables .....	74
4.1.1.10 La saturación de bases.....	75
4.1.1.11 La acidez intercambiable.....	76
4.1.2 Contenido de cromo total en los suelos seleccionados del Valle del Mantaro.....	77
4.1.3 Nivel de fertilidad de los suelos .....	78
4.1.4 Correlación del contenido total de cromo y propiedades físico-químicas .....	79
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>83</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>85</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>86</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>92</b>
<b>RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE SUELO .....</b>	<b>98</b>

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla N° 1:</b> <i>Compuestos de cromo y sus usos en diferentes procesos de la industria.....</i>	20
<b>Tabla N° 2:</b> <i>Movilidad relativa de los metales pesados según el pH. ....</i>	27
<b>Tabla N° 3:</b> <i>Parámetros que definen la fertilidad del suelo.....</i>	35
<b>Tabla N° 4:</b> <i>Parámetros edafológicos determinantes de la capacidad del suelo para acumular metales pesados y compuestos orgánicos tóxicos.....</i>	37
<b>Tabla N° 5:</b> <i>Estándares de Calidad de Suelo.....</i>	38
<b>Tabla N° 6:</b> <i>Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo (Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM) .....</i>	39
<b>Tabla N° 7:</b> <i>Recomendaciones acerca de la aplicabilidad de los patrones de muestreo.....</i>	42
<b>Tabla N° 8:</b> <i>Número mínimo de puntos de muestreo para el Muestreo de Identificación .....</i>	43
<b>Tabla N° 9:</b> <i>Profundidad del muestreo según el uso del suelo .....</i>	51
<b>Tabla N° 10:</b> <i>Datos de georreferenciación del muestreo de suelos.....</i>	55
<b>Tabla N° 11:</b> <i>Métodos de análisis físico-químico del suelo.....</i>	59
<b>Tabla N° 12:</b> <i>Resultados del análisis físico-químico de los suelos en estudio. ....</i>	66
<b>Tabla N° 13:</b> <i>Resultados de la Clase textural de las 05 localidades del Valle del Mantaro. ...</i>	74
<b>Tabla N° 14:</b> <i>Resultados del análisis de cromo total en el suelo. ....</i>	77
<b>Tabla N° 15:</b> <i>Calificación del nivel de fertilidad de los suelos contaminados con cromo, del Valle del Mantaro.....</i>	79
<b>Tabla N° 16:</b> <i>Coeficientes de regresión múltiple y estadísticos entre contenido total de cromo y pH, contenido de materia orgánica y Capacidad de Intercambio Catiónico.....</i>	80
<b>Tabla N° 17:</b> <i>Cuadro de Análisis de variancia de la regresión múltiple entre contenido total de cromo y pH, contenido de materia orgánica y Capacidad de Intercambio Catiónico.....</i>	81
<b>Tabla N° 18:</b> <i>Análisis de variancia de la regresión múltiple entre contenido total de cromo y pH, contenido de materia orgánica y Capacidad de Intercambio Catiónico. ....</i>	81
<b>Tabla N° 19:</b> <i>Análisis de correlación entre el contenido de cromo total, pH, contenido de materia orgánica y Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC).....</i>	82

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura N° 1:</b> Concentración del cromo en la zona alta y media de la cuenca del Mantaro. ....	5
<b>Figura N° 2:</b> Partición de muestras .....	51
<b>Figura N° 3:</b> Área de muestreo .....	52
<b>Figura N° 4:</b> Punto de muestreo de Molinos, Jauja .....	55
<b>Figura N° 5:</b> Punto de muestreo de Sincos, Jauja.....	56
<b>Figura N° 6:</b> Punto de muestreo de Santa Rosa de Ocopa, Concepción .....	56
<b>Figura N° 7:</b> Punto de muestreo de Hualahoyo .....	57
<b>Figura N° 8:</b> Punto de muestreo de Huayucachi, Huancayo .....	57
<b>Figura N° 9:</b> Muestra Aleatoria .....	58
<b>Figura N° 10:</b> Resultados del pH de las 05 localidades del Valle del Mantaro. ....	67
<b>Figura N° 11:</b> Resultados de la Conductividad eléctrica (dS/m) de las 05 localidades del Valle del Mantaro.....	68
<b>Figura N° 12:</b> Resultados del Carbonato de Calcio (%) de las 05 localidades del Valle del Mantaro.....	69
<b>Figura N° 13:</b> Resultados de la Materia orgánica de las 05 localidades del Valle del Mantaro. ....	69
<b>Figura N° 14:</b> Resultados del Fosforo disponible (ppm) de las 05 localidades del Valle del Mantaro.....	71
<b>Figura N° 15:</b> Resultados del Potasio disponible (ppm) de las 05 localidades del Valle del Mantaro.....	72
<b>Figura N° 16:</b> Resultados de la Capacidad de Intercambio Catiónico (meq/100 g) de las 05 localidades del Valle del Mantaro. ....	72
<b>Figura N° 17:</b> Resultados de la Capacidad de Intercambio Catiónico de las 05 localidades del Valle del Mantaro.....	75
<b>Figura N° 18:</b> Resultados de la Saturación de bases (%) de las 05 localidades del Valle del Mantaro.....	76
<b>Figura N° 19:</b> Resultados de la acidez intercambiable (%) de las 05 localidades del Valle del Mantaro.....	77
<b>Figura N° 20:</b> Resultados del análisis de cromo total en el suelo. ....	78

## RESUMEN

La investigación fue realizada durante el año 2016, en los meses de setiembre a octubre, se reconoció y muestreó los suelos contaminados con cromo de cinco distritos del Valle del Mantaro: Hualahoyo, Sincos, Santa Rosa de Ocopa, Molinos, y Huayucachi, con información de georeferenciación basada en los avances presentados por el proyecto Mantaro Revive (2007), con los objetivos de caracterizar las características físico-químicas de los suelos contaminados con cromo y relacionar el contenido de cromo con las propiedades físico-químicas de los suelos. Métodos: para el análisis del cromo total en el suelo fue EPA 3060; para textura, el método de Bouyoucos; para el análisis del pH, método electrométrico; para el carbonato de calcio, el método gasovolumétrico; para la conductividad eléctrica, el método conductimétrico; para la materia orgánica, el método de Walkley-Black; para el fósforo disponible, el método de Olsen; para el potasio disponible, el método del cobaltinitrito; la Capacidad de intercambio catiónico y cationes cambiables, el método del acetato de amonio descrito en la norma ASTM D2973-10e1. El tratamiento de datos fueron sistematizados, calificados e interpretados para caracterizar los suelos contaminados con cromo de cada uno de los distritos seleccionados y la fertilidad de los suelos contaminados se evaluó de acuerdo a la Guía de Clasificación para Interpretación de Análisis de Suelo. **Diseño:** Se seleccionó 05 localidades del Valle del Mantaro; donde se obtuvo 25 muestras simples y de ellas se obtuvo un total de cinco muestras compuestas, de cada uno de los distritos seleccionados. **Resultados** mostraron pH ácidos (Molinos y Hualahoyo), neutro (Santa Rosa de Ocopa) y alcalino (Sincos y Huayucachi); contenido medio de carbonato de calcio en Huayucachi y Sincos; contenido medio de materia orgánica en Huayucachi y Molinos y bajo en los demás suelos; contenido alto de P en Hualahoyo y Santa Rosa de Ocopa, medio en el suelo de Sincos y Molinos y bajo en Huayucachi; el potasio fue alto en Huayucachi, Molinos y Sincos, y medio en Hualahoyo y Santa Rosa de Ocopa; la CIC fue baja en Hualahoyo, moderadamente alta en Molinos, Santa Rosa de Ocopa y Sincos, y alta en Huayucachi; la textura fue franca en Molinos, Sincos, Santa Rosa de Ocopa y Hualahoyo, y franco arcillosa en Huayucachi; el calcio y magnesio cambiables predominan todos los suelos; la saturación de bases es alta en todos los suelos, excepto en Molinos; el contenido de cromo total superó el ECA de suelos de Canadá; la fertilidad de los suelos de Hualahoyo, Sincos, Santa Rosa de Ocopa y Huayucachi fue baja, y en Molinos la fertilidad del suelo fue media; existe regresión y correlación lineal múltiple entre el pH, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico y el contenido total de cromo en los suelos estudiados.

**Palabras clave:** *Cromo, propiedades del suelo, Contaminación de suelos.*

## ABSTRACT

This research was carried out during the year 2016, in the months from September to October, the soil contaminated with chromium from five districts of the Mantaro Valley was recognized and sampled: Hualahoyo, Sincos, Santa Rosa de Ocopa, Molinos, and Huayucachi, with georeferencing information based on progress presented by the project Mantaro Revive (2007), with the objectives of characterizing the physicochemical properties of the soils contaminated with chromium and relate the chromium content with the physical-chemical properties of the soils. Methods: for the analysis of total chromium in the soil was EPA 3060; for texture, the Bouyoucos method; for pH analysis, electrometric method; for calcium carbonate, the gas-volumetric method; for electrical conductivity, the conductimetric method; for organic matter, the Walkley-Black method; for the available phosphorus, the Olsen method; for available potassium, the cobaltinitrite method; Cation exchange capacity and changeable cations, the ammonium acetate method described in ASTM D2973-10e1. The data processing was systematized, qualified and interpreted to characterize the soils contaminated with chromium from each of the selected districts and the fertility of the contaminated soils was evaluated according to the Classification Guide for Interpretation of Soil Analysis. Design: 05 localities of the Mantaro Valley were selected; where 25 simple samples were obtained and from them a total of five composite samples was obtained, from each of the selected districts. Results showed acidic pH (Molinos and Hualahoyo), neutral (Santa Rosa de Ocopa) and alkaline (Sincos and Huayucachi); average content of calcium carbonate in Huayucachi and Sincos; average content of organic matter in Huayucachi and Molinos and low in other soils; high content of P in Hualahoyo and Santa Rosa de Ocopa, half in the soil of Sincos and Molinos and low in Huayucachi; potassium was high in Huayucachi, Molinos and Sincos, and medium in Hualahoyo and Santa Rosa de Ocopa; CIC was low in Hualahoyo, moderately high in Molinos, Santa Rosa de Ocopa and Sincos, and high in Huayucachi; the texture was straightforward in Molinos, Sincos, Santa Rosa de Ocopa and Hualahoyo, and clay loam in Huayucachi; exchangeable calcium and magnesium predominate all soils; base saturation is high in all soils, except in Mills; the total chromium content exceeded the ECA of Canadian soils; the fertility of the soils of Hualahoyo, Sincos, Santa Rosa de Ocopa and Huayucachi was low, and in Mills the soil fertility was average; there is a multiple regression and linear correlation between pH, organic matter, cation exchange capacity and total chromium content in the studied soils.

**Keywords:** *Chromium, soil properties, soil contamination.*

## INTRODUCCIÓN

La contaminación de los suelos del Valle del Mantaro es un problema que tiene gran magnitud, debido a su relación con el agua, el aire, las plantas, los seres humanos y los animales, que directamente o indirectamente se relacionan con el suelo o dependen de él y pueden ser afectados. El año 2007 el proyecto Mantaro revive reporta un primer estudio de los niveles de contaminación por metales pesados en el Valle del Mantaro.

La capacidad depuradora del suelo depende fundamentalmente de determinadas características de los horizontes superficiales: la actividad microbiológica, que facilita la descomposición e inmovilización de los contaminantes; la arcilla y la materia orgánica que mediante reacciones físico-químicas adsorben a los contaminantes y permiten su inmovilización o liberación y la capacidad filtrante, que va a regular la capacidad de penetración de los contaminantes. Estas acciones dependerán de determinadas propiedades del suelo tales como el contenido de arcilla, materia orgánica y óxidos que influyen en los mecanismos de autodepuración. De cualquier forma, por muy favorables que sean las características del suelo, es evidente que la capacidad depuradora no es ilimitada. El suelo no puede asimilar, inmovilizar, inactivar y degradar todos los contaminantes que recibe y por ello, en un determinado momento, cuando se superan los umbrales críticos, puede transferir los contaminantes a otros medios e incorporarlos en las cadenas tróficas (Heredia y Fernández, 2008).

La combinación de la capacidad de retención del suelo, por un lado, y la entrada de productos químicos al mismo, por otro, determina el tipo de la respuesta medio ambiental. Una buena planificación ambiental debe considerar la capacidad de almacenaje del suelo

y la entrada de productos químicos a éste, ya que estos dos factores determinan el tipo de respuesta (García, 2005).

En este contexto, se propone evaluar las características físico-químicas de 5 suelos contaminados con cromo en el Valle del Mantaro: Sincos, Huayucachi, Molinos, Santa Rosa de Ocopa, y Hualahoyo, relacionando sus propiedades, que presentan en la capa superficial de cada lugar muestreado, y de esa manera calificar e interpretar su fertilidad, para tener una información base para una posterior remediación de suelos.

Esta investigación consta de 4 capítulos, los cuales se dividen en el: Capítulo I se presentó el planteamiento del problema y formulación del problema, los objetivos, la justificación e importancia y la hipótesis.

En el capítulo II se describe el marco teórico el cual contiene los antecedentes del problema, la base teórica y la definición de términos básicos.

En el capítulo III se detalló la metodología donde se encuentra el método de investigación, tipo de investigación, nivel de investigación, el alcance de la investigación, diseño de la investigación, la población y muestra y las técnicas e instrumentos de recolección de datos.

En el capítulo IV se describen los resultados del tratamiento y el análisis de la información, pruebas de hipótesis y discusión de resultados.

En base a esta información, uno de los primeros pasos del proceso de tratamiento y remediación de suelos es el diagnóstico o caracterización físico-química de los suelos, con el fin de tener una base para elegir la técnica adecuada de remediación de suelos, pues no es igual trabajar con suelos ácidos o con suelos alcalinos, con suelos bajos o altos en materia orgánica, con alta o baja capacidad de intercambio catiónico, con suelos que tienen caliza o no lo tiene, con suelos de baja o alta fertilidad, considerando además que todas las propiedades del suelo interactúan entre sí para darle al suelo de cada lugar determinadas propiedades, que al final van a determinar su uso potencial.

# **CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO**

## **1.1 Planteamiento y formulación del problema**

### **1.1.1 Planteamiento del problema**

El proceso de contaminación ha avanzado considerablemente a nivel mundial, en las últimas décadas debido al crecimiento exponencial de poblaciones urbanas y rurales, junto con este aumento de forma exponencial la generación de residuos sólidos y líquidos, mismos llegan a ser vertidos en cuerpos de agua y en el suelo (Moreira, 2015).

El suelo, organismo vivo en una mezcla (climáxica), de elementos no vivos y vivos (biota), se considera contaminado o en proceso de serlo, cuando sus componentes químicos y/o la biota circundante están agredidos por sustancias incompatibles con aquel estado de equilibrio. En muchísimas ocasiones, el resultado de la contaminación es un peligro para los organismos que existen en ese lugar (Bustamante, 2007)

Entre los contaminantes del suelo se encuentran compuestos y elementos de naturaleza orgánica e inorgánica; dentro de los contaminantes inorgánicos se encuentra el cromo, un metal pesado presente en la pedosfera, en concentraciones variables, desde cantidades traza hasta concentraciones relativamente altas. En años recientes, la liberación de Cromo, especialmente por actividades industriales, principalmente de la fabricación de acero inoxidable, así como el uso de lodos y otras enmiendas agregadas a suelos agrícolas ha causado un incremento en las concentraciones de este metal en el suelo (Gonnelli and Renella, 2013). Esto ha incrementado el interés y preocupación

ambiental, debido a que en bajas concentraciones, estos elementos son esenciales para los animales, pero en altas concentraciones se convierten en tóxicos.

El cromo en el suelo, tiene como principal característica que es poco móvil y poco soluble, reaccionando principalmente con la fase sólida, y su movilidad en el suelo depende del pH, así como de la presencia de compuestos orgánicos, arcilla y óxidos. Además, su contenido en el suelo va a depender de las características físico-químicas del suelo, y de las formas iónicas en que se encuentre predominantemente [Cromo (III) o Cromo (VI)].

El cromo (VI) ejerce efectos tóxicos sobre sistemas biológicos. Se halló que la exposición a compuestos de cromo hexavalente conduce a una variedad de problemas clínicos. La inhalación y retención de cromo (VI) contiene materiales que causan perforación del tabique nasal, asma, bronquitis, neumonía, inflamación de la laringe e hígado e incidencia creciente de carcinoma broncogénico. El contacto con la piel de los compuestos de cromo (VI) puede inducir alergias a la piel, dermatitis, necrosis y corrosión dermal (Gad, 1989; Lee et al., 1989). Las propiedades tóxicas de los cromatos emergen de la posibilidad de la difusión libre a través de las membranas celulares y fuerte potencial oxidativo. El impacto toxicológico del Cromo (VI) se origina en la acción de esta forma como un agente oxidante, así como de la formación de radicales libres durante la reducción de Cromo (VI) a Cromo (III) ocurriendo dentro de la célula. El Cromo (III) formado allí en una concentración significativa puede acusar posteriores efectos adversos debido a su alta capacidad e coordinar varios compuestos orgánicos resultando en una inhibición de sistemas metalo-enzimas (Kotas and Stasicka, 2000).

No solo la toxicidad, sino también la movilidad y disponibilidad de Cromo, depende fundamentalmente de su forma química. Los compuestos de Cromo (VI) son usualmente bastante solubles, móviles y biodisponibles comparados con especies de Cromo trivalentes poco solubles. De tal manera, que un conocimiento detallado de cada especie antes que los niveles de Cromo total se requieren para evaluar apropiadamente los efectos fisiológicos y toxicológicos del Cromo, sus transformaciones en el agua, suelo, y atmosfera, así como su distribución y transporte en el ambiente (Kotas and Stasicka, 2000).

El cromo hexavalente ( $\text{Cr}^{+6}$ ), se concluye que las aguas de los pozos tubulares y efluente de drenaje colindantes a las lagunas de oxidación, ubicado en el sector América, centro poblado Torres de San Borja en el Distrito de Moche, están contaminadas y su consumo indirecto o directo; tendrá un efecto cancerígeno en la salud, así lo advierte el Organismo Mundial de la Salud y la investigación de Otiniano G, et al 2007, p.4. Por otro lado Quer-Brossa, 1983, pp.117-183, nos hace saber que al ingerir cromo hexavalente

(Cr<sup>+6</sup>), el organismo humano se expone a una acción cancerígena sobre los pulmones y el aparato digestivo, por ser el cromo hexavalente un desnaturalizador de proteínas, precipitador de ácidos nucleicos y es difícil de oxidar o eliminar del organismo. Para García, 1993, pp. 3-16, El cromo hexavalente es uno de los contaminantes, que produce mayor impacto negativo en el crecimiento del país, ya que compromete la salud humana, dañando los procesos ecológicos que sostienen la producción de alimentos. (Mozo, 2012)

Varios factores contribuyen a la disminución de movilidad del Cromo en el suelo, especialmente del Cr (II): (i) fuerte adsorción sobre las superficies de suelo cargadas negativamente, (ii) la habilidad para formar moléculas complejas con compuestos orgánicos hallados en el suelo, y (iii) la formación de óxidos e hidróxidos y otros minerales insolubles en el suelo (Fendorf and Zasoski, 1992; Losi et al., 1994; Dragun, 1998). Esto hace mucho más importante conocer no solo la composición del suelo sino el contenido de materiales orgánicos a través de su caracterización físico-química.

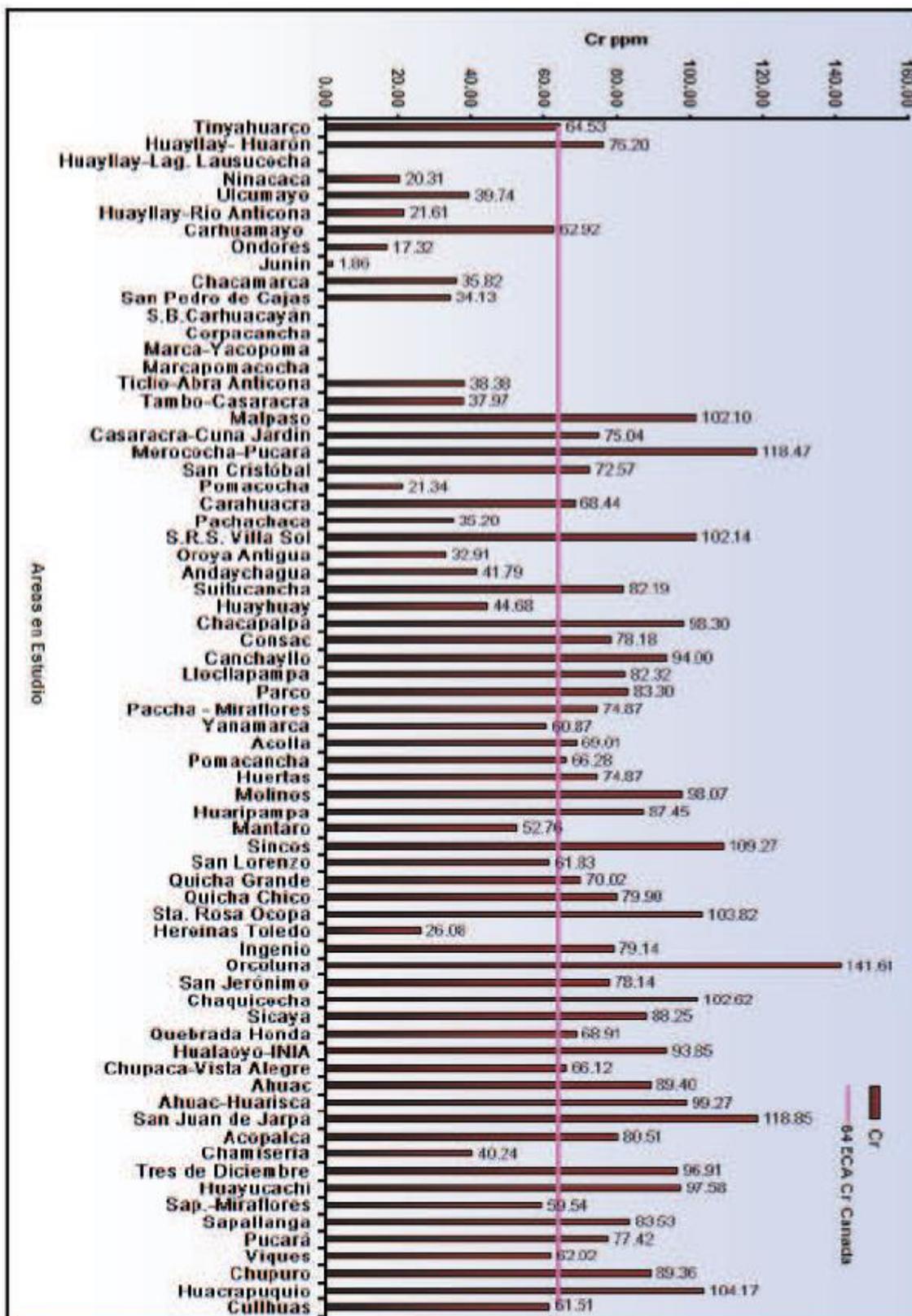
Como importantes fuentes de minerales dietéticos para humanos y animales, las plantas forman un puente entre la composición elemental del suelo y los canales alimenticios. Consecuentemente, la absorción de nutrientes de las plantas es esencial por su rol central en el ciclo de los elementos, pero también para el crecimiento y desarrollo de las plantas. Las características físicoquímicas del suelo frecuentemente imponen factores limitantes sobre la biodisponibilidad de elementos y las deficiencias minerales son frecuentemente experimentadas en la producción de cultivos. Además, muchas regiones en el mundo son inadecuadas para el crecimiento de cultivos debido a la contaminación con elementos potencialmente tóxicos tales como metales y metaloides. Los mecanismos de absorción y transporte cruciales para los elementos esenciales también forman una entrada para elementos no esenciales que poseen una amenaza para la aptitud de la planta y el canal alimenticio (Peralta-Videa et al., 2009).

En la Zona Alta y Media de la Cuenca del Mantaro está ubicada en el centro del Perú, abarcando las regiones de Pasco, Lima y Junín. En la Región Junín se encuentran importantes capitales de provincia como Junín, La Oroya, Jauja, Concepción, Chupaca y Huancayo. La importancia económica de la zona es reconocida a nivel nacional por ser generadora de energía eléctrica y una de las principales fuentes productoras de alimentos para Lima, la capital de nuestro país. Además, en producción agropecuaria la cuenca es la primera productora nacional de maíz, maca, mashua, quinua, papas, olluco, cebollas y primera productora nacional de trucha (Plan de Desarrollo Regional Concertado Junín, 2004-2007).

La realidad ambiental de la cuenca del río Mantaro, surge de la creciente preocupación sobre los efectos de un ambiente deteriorado, en la salud pública, en la calidad ambiental y en la economía regional proveniente de actividades minero-metalúrgicas, el parque automotor, residuos urbanos y el uso de agroquímicos. Producto de esta preocupación son varios los estudios realizados de distintas organizaciones no gubernamentales, universidades e instituciones del Estado sobre los impactos ocasionados por actividades antropogénicas, los cuales proporcionan importante información sobre la situación de la salud de los pobladores relacionada a la calidad del ambiente (Proyecto Mantaro Revive, 2007).

El proyecto “El Mantaro Revive” (2007), reportó la evaluación de resultados de la calidad del suelo, que comprendió la zona alta y media de la Cuenca del río Mantaro, totalizando 70 áreas de monitoreo de suelo, donde cada área consta de 1 hectárea. Para el procedimiento de muestreo, se elaboró una guía de muestreo, se ubicaron las áreas representativas, de las cuales se obtuvo nueve sub muestras de la capa superficial de los suelos, para luego homogenizarlas y tener una sola muestra representativa para el análisis. Los resultados indicaron en general, que las concentraciones de cromo sobrepasan el ECA de suelos de Canadá (64 mg Cr total/kg) en aproximadamente el 63% del área de estudio. Las elevadas concentraciones de este metal, se observaron con más frecuencia en las áreas cercanas a La Oroya y en las áreas del Valle del Mantaro (Huertas, Molinos, Huaripampa, Mantaro, Sincos, San Lorenzo, Ingenio, Orcotuna, San Jerónimo, Sicaya, entre otros lugares), excepto en las zonas de Heroínas Toledo, Sapallanga-Miraflores y Palián donde se encuentra por debajo del ECA de suelos de Canadá. En la subcuenca de Yauli, las áreas de mayor preocupación corresponden a la unidad de producción de la SAIS Tupac Amaru de Pucará-Morococha en 1.9 veces, S.R.S.-Villa Sol en 1.6 veces y Cuna Jardín-Casaracra en 1.2 veces y en el Valle del Mantaro en Orcotuna en 2.2 veces la norma canadiense, siendo este último el mayor valor registrado en toda la zona de estudio. Como se puede observar en la Figura N°1.

Figura N° 1: Concentración del cromo en la zona alta y media de la cuenca del Mantaro.



Fuente: El Mantaro Revive

Por los datos obtenidos, es importante estudiar las propiedades físico-químicas y fertilidad de los suelos contaminados con cromo de las siguientes localidades como: Molinos, Hualahoyo, Santa Rosa de Ocopa, Sincos y Huayucachi del Valle del Mantaro.

## **1.1.2 Formulación del problema**

### **1.1.2.1 General**

¿Cuál es la influencia de las características físico-químicas en el cromo total de los cinco suelos contaminados de las localidades de Molinos, Hualahoyo, Santa Rosa de Ocopa, Sincos y Huayucachi del Valle del Mantaro?

### **1.1.2.2 Específicos**

¿Existen diferencias en las características físico-químicas de los cinco suelos contaminados con cromo de las localidades de Molinos, Hualahoyo, Santa Rosa de Ocopa, Sincos y Huayucachi del Valle del Mantaro?

¿Existe relación entre las características físico-químicas de los cinco suelos del Valle del Mantaro, contaminados con cromo de las localidades de Molinos, Hualahoyo, Santa Rosa de Ocopa, Sincos y Huayucachi del Valle del Mantaro?

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 General**

Determinar la influencia de las características físico-químicas en el cromo total de los cinco suelos contaminados de las localidades de Molinos, Hualahoyo, Santa Rosa de Ocopa, Sincos y Huayucachi del Valle del Mantaro.

### **1.2.2 Específicos**

Determinar las diferencias en las características físico-químicas de los cinco suelos contaminados con cromo de las localidades de Molinos, Hualahoyo, Santa Rosa de Ocopa, Sincos y Huayucachi del Valle del Mantaro.

Determinar la relación que existe entre las características físico-químicas de los cinco suelos del Valle del Mantaro, contaminados con cromo de las localidades de Molinos, Hualahoyo, Santa Rosa de Ocopa, Sincos y Huayucachi del Valle del Mantaro

## **1.3 Justificación e Importancia**

### **1.3.1 Justificación**

#### **a. Justificación ambiental**

La problemática de los suelos contaminados requieren ser caracterizados en sus propiedades físicas, químicas y biológicas para conocer sus relaciones e interacciones suelo-contaminante y de esa manera proponer medidas de remediación en función de sus propiedades, y plantear medidas de remediación que tengan los resultados esperados, sea en condiciones ex - situ o in – situ. Esta diferenciación de las propiedades del suelo ocasiona que los contaminantes tengan diferente comportamiento en el suelo, aumentando o disminuyendo sus concentraciones, y de esa manera su disponibilidad. Es la fase líquida (agua del suelo, pH, sales solubles) la que va a interactuar con los contaminantes, solubilizándolos, precipitándolos o transformándolos; pero también son los componentes sólidos (contenido de arcilla, materia orgánica, calcáreo), además de los elementos nutrientes (nitrógeno, fósforo, potasio y micronutrientes), los que van a configurar la complejidad y heterogeneidad del suelo, como medio o sistema, para el crecimiento de las plantas y comportamiento de contaminantes.

#### **b. Justificación social**

Este trabajo de investigación permite conocer las características físico-químicas de 5 suelos contaminados con cromo en las localidades de Molinos, Hualahoyo, Santa Rosa de Ocopa, Sincos y Huayucachi del Valle del Mantaro con cromo del Valle del Mantaro y así conocer la situación actual de estos suelos.

#### **c. Justificación en lo académico**

El trabajo de investigación se realizó con la finalidad de estudiar las características físico-químicas y fertilidad de los suelos contaminados con cromo y a partir de esto se puede realizar nuevas investigaciones o estudios por parte de interesados, investigadores, estudiantes.

### **1.3.2 Importancia de la Investigación**

La importancia de esta investigación reside en tener los datos particulares de suelos contaminados con cromo, en el Valle del Mantaro, para optimizar los planes de remediación a corto y mediano plazo. Esto obedece a rol del suelo como medio para el crecimiento de las plantas y en general como sostén de nuestra vida, pues es un recurso no renovable.

## **1.4 Hipótesis y descripción de variables**

### **1.4.1 Hipótesis**

#### **1.4.1.1 General**

Las características físico-químicas influyen directamente en el contenido de cromo total en los suelos contaminados de las localidades de Molinos, Hualahoyo, Santa Rosa de Ocopa, Sincos y Huayucachi del Valle del Mantaro.

#### **1.4.1.2 Específicas**

Las características físico-químicas de los cinco suelos contaminados con cromo de las localidades de Molinos, Hualahoyo, Santa Rosa de Ocopa, Sincos y Huayucachi del Valle del Mantaro, difieren entre sí.

Existe relación significativa entre las características físico-químicas de los cinco suelos del Valle del Mantaro, contaminados con cromo de las localidades de Molinos, Hualahoyo, Santa Rosa de Ocopa, Sincos y Huayucachi del Valle del Mantaro

### **1.4.2 Descripción de variables**

#### **1.4.2.1 Variables independiente (X):**

X1 = Características físico-químicas del suelo

#### **1.4.2.2 Variable dependiente (Y):**

Y1 = Contenido de Cromo total en el suelo

### **1.4.3 Indicadores de las variables en estudio**

#### **X1: Características físico-químicas:**

- Textura
- pH
- Fósforo disponible
- Potasio disponible
- Materia orgánica
- Capacidad de intercambio catiónico
- Calcio intercambiable
- Magnesio intercambiable
- Potasio intercambiable
- Sodio intercambiable

- Hidrógeno + aluminio intercambiable
- Calcáreo
- Conductividad eléctrica
- Saturación de Bases
- Acidez Intercambiable
- Carbonato de calcio

**Y1: Cromo total en el suelo**

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1 Antecedentes del problema

#### 2.1.1 Internacionales

Anderson et al., (2008), reportan que las propiedades del suelo mitigan los efectos peligrosos de los contaminantes a través de la secuestación química en el suelo y deberían ser considerados cuando se evalúa el riesgo ecológico de la contaminación terrestre. Son necesarios modelos empíricos que cuantifiquen las relaciones entre las propiedades del suelo y la toxicidad a receptores ecológicos para ajustes de sitio específico a las evaluaciones de riesgo ecológico. Sin embargo, la sensibilidad diferencial de los organismos en estudios de respuesta a diferentes dosis puede limitar la utilidad de tales modelos. Estos autores presentaron un enfoque novedoso para la estimación de la toxicidad que divide el efecto de la sensibilidad diferencial de los organismos ensayados, de las propiedades físico-químicas del suelo. Cinco suelos con diferentes propiedades seleccionadas recibieron cinco concentraciones de arseniato de sodio. Los bioensayos fueron conducidos y se evaluó la materia seca y la correspondiente concentración de arsénico en los tejidos para tres especies de plantas (Alfalfa, *Medicago sativa* L.; Ryegrass perenne, *Lolium perenne* L., y mijo japonés, *Echinochloa crusgalli* L.). Los estimados fueron combinados en un índice de sensibilidad de contaminación de plantas (ISCP) y usados para normalizar los parámetros de toxicidad para las especies más sensitivas. La regresión lineal simple y ANCOVA indicó un incremento de 36.5% en el poder de explicación de los efectos modificantes de las propiedades del suelo sobre la fitotoxicidad cuando las sensibilidades diferenciales de arseniato fueron representadas por ISCP. La

normalización de los parámetros de ecotoxicidad por ISCP aparentemente es un enfoque efectivo para cuantificar los efectos modificatorios de las propiedades del suelo sobre la fitotoxicidad cuando es de interés considerar múltiples especies de plantas (o variedades dentro de una especie) con sensibilidad diferencial a contaminantes experimentales.

(Murcia Navarro, 2014) Realizo el artículo "*Caracterización del contenido de cromo, su disponibilidad y sus interacciones con las propiedades del suelo para evaluar el potencial uso de la fitoextracción*", cuyo objetivo era evaluar el grado de contaminación por cromo, su movilidad y su interacción con las propiedades del suelo para definir una estrategia de fitoextracción. Para esto se realizó un muestreo detallado con el objetivo de hacer una caracterización biogeoquímica del sedimento e identificar diferentes parches o áreas en el lecho con diferente grado de contaminación, de modo que se adopten diferentes estrategias de rehabilitación ajustadas al riesgo ambiental real y las condiciones edáficas del lecho. En base a estos resultados de caracterización, se evaluó la viabilidad del uso de la fitoextracción para la descontaminación del lecho. El trabajo concluyó que la concentración total de cromo supera los niveles genéricos de referencia de la Región de Murcia en gran parte del tramo del cauce del río en las tres profundidades muestreadas indicando contaminación del sedimento hasta un metro de profundidad. Por tanto, el vertido directo de lodos y aguas procedentes de la industria de curtidos ha provocado la contaminación del cauce con una afección hasta un metro de profundidad. Las fracciones extraíble, intercambiable y soluble del cromo son relativamente bajas en todo el lecho. La baja movilidad del cromo se debe a que en los sedimentos predomina en su forma reducida Cr (III). No obstante, debido al pH alcalino y al bajo contenido en materia orgánica de los sedimentos, en épocas de lluvia y altas temperaturas se puede producir la oxidación a Cr (VI), favoreciendo su movilidad y por tanto su lavado con las aguas de escorrentía y lixiviación.

(Mahecha Pulido, y otros, 2015) Escribieron el artículo científico titulado "*Contenido de metales pesados en suelos agrícolas de la región del Ariari, Departamento del Meta*", cuyo objetivo de esta investigación fue determinar las concentraciones de metales pesados (Cu, Zn, Ni, Pb, Cd, Cr) en suelos tipo Oxisol, sometidos a usos agrícolas intensivos, durante un tiempo superior a 10 años en la región del Ariari. Los autores para realizar la determinación de las concentraciones de los metales pesados (Cu, Zn, Ni, Pb, Cd, Cr) lo realizaron de acuerdo con el método de digestión de ácido nítrico, ácido clorhídrico y peróxido de hidrogeno y espectrofotometría de absorción atómica con llama Aire – Acetileno, EPA 3050B, SM 3111B. El pH se midió con el potenciómetro en relación 1:1

suelo: agua; la materia orgánica se determinó por el método de Walkley-Black; la capacidad de intercambio catiónico se determinó al desplazar el amonio ( $\text{NH}_4$ ) intercambiado con  $\text{NaCl}$  1 M y con valoración volumétrica; la textura, por el método de Bouyoucos (IGAC, 1990). Los resultados de las propiedades físico-químicas y los contenidos de metales pesados para los suelos agrícolas de la vega del río Ariari, municipio de Fuente de Oro, se analizaron con estadística descriptiva, en general el pH de las muestras analizadas se caracteriza por ser ácido en un rango que va de 4,3 a 5,4, de acuerdo con Alloway (2013); estas condiciones de acidez propician la solubilidad de los elementos metálicos y permiten que sean asimilados por las plantas, al igual que reduce la retención que puede generarse en los contenidos en la materia orgánica (Kabata – Pendias, 2004). Por su parte, los contenidos de materia orgánica (MO) presentan una media de 2,7% donde los resultados varían en un rango de 0,8 a 4,3%, resultados que son relativamente bajos, lo que reduce la formación de complejos órgano-metálicos. Estos contenidos de MO y pH bajos son consistentes para suelos de tipo Oxisol, de acuerdo a lo planteado por Sánchez (2010) y Alloway (2013). La capacidad de intercambio catiónico está en la categoría de moderadamente bajo, variando entre 7,9 a 21,6 meq/100g, con una media de 16,3 meq/100g, propiedad que facilita la movilización de los metales en el suelo (Silvera et al. 2003; Naidu y Oliver, 2003). Se concluyó que en los suelos agrícolas de la región del Ariari a pesar de ser una zona de producción agrícola intensiva y con alta tasa de aplicación de productos agroquímicos, no se evidenció concentraciones por encima de los valores de referencias aplicados, esto podría estar asociado con las condiciones físico-químicas que poseen estos suelos.

(Acosta Alvarez , 2007), presento la tesis “Determinación de metales pesados en suelos agrícolas del Valle del Mezquital, HGO” para obtener el título de Licenciado en Biología de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. El objetivo general fue determinar la presencia y concentración de metales pesados en suelos agrícolas del Valle del Mezquital, en los que se empleen aguas residuales de la Presa Requena, dentro del DR 03-Tula y el objetivo específico fue: realizar la caracterización físico-química de los suelos agrícolas del Valle del Mezquital. Para realizar La investigación se llevó a cabo dentro del DR 03-Tula, en el Valle del Mezquital específicamente en nueve municipios tomados de manera aleatoria (Ajacuba, Tlaxcoapan, Tlahuelilpan, Mixquiahuala, Progreso de Obregón, Tezontepec de Aldama, Francisco I. Madero, Actopan y Tula de Allende); en cada sitio de cultivo, se tomaron con una barrena, cinco sub muestras de suelo a una profundidad de 0-30 cm, en la capa arable de aproximadamente 1 kg, empleando la técnica

de recorrido de terreno en zig-zag (Ruiz *et al.*, 1999), éstas se homogenizaron para formar un muestra compuesta (Brady y Weil, 1999); de igual forma, en los mismos sitios, se tomaron submuestras del cultivo dominante y se colocaron en una bolsa de papel perfectamente identificada para su revisión en laboratorio. Para realizar la caracterización física y química se consideró los siguientes metales pesados: Cr, Cu, Ni y Zn. Se concluyó que de acuerdo a las observaciones de campo y la caracterización físico-química de los suelos agrícolas del Valle del Mezquital, se concluye que estos son poco profundos, de naturaleza calcárea, cuyo elemento cromógeno que da colores de castaño a grisáceo, se debe a su naturaleza y a la cantidad de materia orgánica, debido a las condiciones de aridez y al bajo aporte de residuos orgánicos que se generan entre cultivo y cultivo. Los suelos alcalinos del Valle del Mezquital, debido a su media y baja capacidad de intercambiar cationes con otros minerales; hace posible que los elementos potencialmente contaminantes como los metales pesados, estén poco biodisponibles para los cultivos, tal como se observa en las concentraciones de metales pesados absorbidos en los cultivos analizados y sus índices de biodisponibilidad, en contra parte, esta característica también disminuye notablemente el grado de fertilidad de los suelos, la cual está en constante modificación debido al uso de aguas residuales e implementos agrícolas para mejorar los cultivos.

(Rangel Cordova, y otros, 2015)”, Realizaron el artículo científico “*Caracterización y Recuperación de Sales de Cromo Hexavalente de un Pasivo Ambiental*”, el cual se desarrolló en Guanajuato – México, con los objetivos de realizar la Caracterización del Cromo Hexavalente. Utilizaron como método; El residuo industrial que fue muestreado aleatoriamente en 12 puntos del pasivo ambiental ubicado en el municipio de San Francisco del Rincón, Guanajuato a una profundidad de 0 a 15 cm. La cantidad total de material recolectado fue aproximadamente de 10 kg. Las muestras del residuo industrial fueron homogeneizadas y se determinaron sus características físicas y químicas conforme a la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. La concentración inicial de Cr<sup>+6</sup> se basa en reacciones redox donde el Cr<sup>+6</sup> se oxida en medio ácido con la 1,5-difenilcarbazida a 1,5-difenilcarbazona reduciéndose a Cr<sup>+3</sup> y formando un complejo rojo-violeta a una  $\lambda = 540$  nm. Las lecturas se hicieron en un espectrofotómetro Evolution 300 UV-Vis (Thermo Scientific®). El resultado de las características físicas y químicas del suelo muestran una concentración de al menos 9355 mg/kg de Cr<sup>+6</sup>, lo cual excede 18 veces el valor límite establecido en la NOM 147 - SEMARNAT/SSA1-2004 para suelos industriales (510 mg/kg). La caracterización física y química del residuo industrial proveniente de la extracción del sitio afectado fue: textura es franco – arenoso, su porcentaje de humedad

6.23, su porcentaje de MO es 1, su pH es 10, el  $\text{Cr}^{+6}$  Inicial (mg/kg base seca)  $9355 \pm 29.4$  y tamaño de porcentaje (%) 58.75 (>10 mm) y 41.2 (<5 mm) (Las partículas con una proporción menor a 5 mm, fueron empleadas en las pruebas de lavado). Por otra parte, se aprecia que el 58 % de las partículas poseen tamaños mayores a 10 mm, lo que dificulta el proceso de lavado si se piensa en un sistema de tratamiento a gran escala.

En el artículo científico realizado por (Reyes Guzmán, y otros, 2010) titulado “*Efecto de la materia orgánica del suelo en la retención de contaminantes*”, tuvo el objetivo de presentar el rol que desempeña la materia orgánica de los suelos en el estudio de la movilidad de contaminantes como los metales pesados. Se revisó información sobre la calidad de la materia orgánica del suelo como factor importante respecto a la acumulación y liberación de metales pesados. El primero corresponde a la acumulación y liberación de metales pesados. El segundo hace referencia al pH. La tercera es la presencia de complejantes orgánicos. En consecuencia, todo trabajo que involucre el estudio de la presencia de contaminantes, por ejemplo, los metales pesados, ya sea en suelos, en sedimentos, en aguas y en materia vegetal, necesariamente debe tener en cuenta el conjunto de características físicas y químicas que intervienen e influyen significativamente la movilidad de estos contaminantes. La calidad de la materia orgánica del suelo es un factor importante respecto a la acumulación y liberación de metales pesados por varias razones: tiene alta capacidad de acumulación de metales pesados, que al ser liberados de la materia orgánica entran en contacto directo con las plantas, las cuales proporcionan alimentos para el consumo humano, los que entrarían a causar problemas en animales y humanos. La naturaleza y dinámica de la materia orgánica dependen fuertemente de la actividad biológica del suelo, como de los cambios ambientales del medio y los efectos de algunas actividades humanas. La materia orgánica del suelo guarda una relación directa con la presencia de metales pesados; así como ella afecta sustancialmente el destino de los metales en el suelo, a su vez, la presencia de éstos cambia significativamente la naturaleza y dinámica de la materia orgánica y con el tiempo puede afectar negativamente las condiciones biológicas de los organismos del suelo y de las plantas. Se encontró que 1/3 parte de la capacidad total de enlace de los elementos con la materia orgánica se debe a la capacidad de intercambio catiónico (CIC), y las 2/3 partes dependen de las posiciones disponibles que existan como sitios de complejación. Para la extracción de la materia orgánica del suelo, se han elaborado múltiples investigaciones sobre la naturaleza de los diferentes extractantes usados en las técnicas de disolución parcial. En la extracción de metales unidos a materia orgánica, se utilizaron tres reactivos comúnmente usados para extraer los metales asociados con esta fracción: peróxido de

hidrógeno, hipoclorito de sodio y pirofosfato alcalino; cada uno tiene un uso en particular y restricciones en su efectividad. El peróxido de hidrógeno y el hipoclorito de sodio causan destrucción de la materia orgánica por oxidación mientras que el pirofosfato alcalino actúa como agente acomplejante. Se concluyó que en el caso del cromo puede existir en varios estados de oxidación; sin embargo, las formas comunes y estables son  $\text{Cr}^{+3}$  y  $\text{Cr}^{+6}$ . El  $\text{Cr}^{+6}$  existe como anión, es muy móvil en el suelo y se considera la forma más tóxica, por lo general, en presencia de materia orgánica se reduce a  $\text{Cr}^{+3}$ . El  $\text{Cr}^{+3}$  es menos móvil y se adsorbe a las partículas del suelo más fuertemente, a pH 4 empieza a precipitar y a pH 5,5 precipita totalmente. Así, en la mayoría de los suelos el  $\text{Cr}^{+3}$  predomina como óxidos e hidróxidos insolubles.

(Larios Bayona, 2014) realizó una investigación sobre *“Niveles de Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn en los suelos de ribera de la Cuenca del Río Turia”*, donde tuvo los objetivos de: Evaluar la presencia y los niveles de metales pesados (Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn) en suelos de ribera del cauce del río Turia, tanto de sus contenidos totales como extraíbles, establecer las relaciones entre las propiedades de los suelos, los contenidos en metales pesados e identificar las zonas con mayor nivel de degradación en la cuenca hidrológica del río Turia, que permitan seleccionar futuras zonas de estudio, en las que analizar los flujos químicos de los contaminantes a escala detallada. Para la metodología, se realizó un muestreo de suelo, donde fue un total de 7 unidades de paisaje representativas de la cuenca del Turia, que incluyen el cauce del río y abarcan su recorrido desde la cabecera hasta la llanura aluvial. El principal criterio para la selección de los puntos de muestreo de suelos dentro de cada una de estas unidades se basó en la localización de las posibles fuentes de contaminación (núcleos de población, EDARs, zonas industriales, etc.). Las muestras de suelo se tomaron en los primeros 10 cm, dado que generalmente, la movilidad de los metales pesados a través del perfil es muy baja, y en el caso de fuentes de contaminación de origen antrópico, quedan acumulados en los primeros centímetros. Una vez recolectadas, las muestras se llevaron al laboratorio, se extendieron y se secaron al aire. Posteriormente, se sometieron a una molienda suave y se pasaron por un tamiz de 2 mm  $\emptyset$  luz de malla, para obtener la fracción de tierra fina. Cada muestra se almacenó en recipientes de polipropileno hasta su posterior análisis. Donde las técnicas y determinaciones analíticas de las propiedades y características del suelo, se seleccionaron en función de su relación con los procesos de movilidad y disponibilidad de metales pesados en los suelos de estudio. Estas son: la reacción del suelo, la conductividad eléctrica del extracto de saturación, los carbonatos, el contenido de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico y las bases de cambio y el análisis granulométrico.

Todos los análisis se realizaron según los métodos oficiales del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA, 1994). Se obtuvo las siguientes conclusiones; primero: En base a las correlaciones obtenidas entre las variables edáficas y las concentraciones de metales pesados, tanto la fracción extraíble como el contenido total, se puede decir que: En suelos agrícolas y en cuanto a las correlaciones de metales pesados totales, cromo, níquel y plomo se encuentran precipitados en forma de carbonatos. La correlación que se da entre plomo y zinc concuerda con los resultados de otros autores que afirman que estos elementos por lo general, se presentan asociados en el suelo. Para este uso del suelo, todos los metales pesados totales estudiados, a excepción del cromo, no se encuentran correlaciones con la CIC, lo cual sugiere que las concentraciones de estos elementos no están reguladas por los procesos de intercambio catiónico. Dada las correlaciones obtenidas entre la arcilla y los metales pesados, el papel de ésta como elemento adsorbente de cromo y níquel (totales) adquiere gran relevancia, tanto en suelos agrícolas como en forestales. Para el resto, parece existir una menor proporción de metales pesados absorbibles y probablemente una mayor abundancia de las formas precipitadas. En general, las concentraciones de metales pesados cuantificadas no exceden los Niveles Genéricos de Referencia (NGR) establecidos por las diferentes Comunidades Autónomas de España. Sin embargo, de las 24 muestras analizadas, 4 (pertenecientes al uso agrícola) exceden los límites establecidos por algunas de éstas. A partir del índice de movilidad relativa, se ha visto que Pb y Cu han resultado ser los más móviles del conjunto de metales pesados estudiados. Dada la peligrosidad que presentan estos metales pesados de contaminar otros compartimentos ambientales, se considera necesario realizar un muestreo más amplio que permita determinar la causa de las elevadas concentraciones encontradas, con el fin de conocer con mayor precisión si esas zonas constituyen puntos calientes de contaminación.

### **2.1.2 Nacionales**

(Vilca Castro, y otros, 2016), Realizaron la tesis, “Retención de metales pesados en suelos y su impacto ambiental” para obtener el título de Licenciada en Química de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Donde el propósito fue determinar la retención de metales pesados y el impacto ambiental en el suelo, como consecuencia de la descarga de aguas residuales en la Quebrada de Añashuayco. Se determinaron las concentraciones de los metales pesados (As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Zn) y el comportamiento en relación a la profundidad del suelo. Posteriormente se evaluó el impacto generado por los metales pesados en el suelo, flora y fauna de la Quebrada de

Añashuayco. El trabajo se justifica porque posee valor teórico, utilidad experimental, relevancia ambiental y evaluación de impactos. La investigación está de acuerdo al tipo de estudio descriptivo – analítico, con un diseño experimental. El número de muestras fueron seis (06) muestras, con sus tres repeticiones las unidades experimentales fueron dieciocho (18) muestras. El muestreo empleado fue aleatorio simple con tres (03) puntos de monitoreo distintos. Las muestras fueron analizadas en el laboratorio acreditado: Corporación de Laboratorios Ambientales del Perú SAC. (CORPLAB) mediante los métodos EPA 3050B, EPA 7471B y NOM-021-RECNAT-2000. Los resultados de los análisis evidenciaron un incremento del cromo total hasta 9 221,15mg/kg, impactando sobre el suelo. Posteriormente, mediante la matriz de Leopold se evaluaron los impactos generados por los metales pesados en los medios: físicos, biológicos y socioeconómicos; identificándose un mayor impacto en medio físico, con un valor de (-146), el cual representa el 13.6% del impacto total, ocasionando un impacto negativo moderado. Por otro lado la caracterización del suelo conlleva a un suelo con textura Arenoso Franco, con un pH que oscila en el rango de 6,90 y 7,18; y una capacidad de intercambio catiónico media con efectos despreciables de salinidad. Asimismo de la evaluación de la retención de metales pesados, se concluye que existe una mayor concentración a la profundidad de 0 a 15 cm como en el caso del Hierro y del Zinc con concentraciones que oscilan entre 9 314,59 – 13 540, 91mg/kg y 33,07 – 69, 99mg/kg respectivamente.

(Maquerhua Ponce, y otros, 2012) Realizaron la tesis, “Evaluación del Nivel de Contaminación de los suelos en el Distrito "El Mantaro" Provincia de Jauja” para obtener el título de Ingeniero Químico de la Universidad Nacional del Centro del Perú. El objetivo general de la investigación fue evaluar el nivel de contaminación de los suelos de este distrito y conocer si son apropiados para la agricultura y los objetivos específicos fue: Caracterizar físicamente las muestras de suelo (textura), caracterizar fisicoquímicamente las muestras de suelo (pH, conductividad eléctrica), caracteriza químicamente las muestras (capacidad de intercambio catiónico (CIC), porcentaje de materia orgánica, macroelementos, porcentaje de carbonatos, porcentaje de carbono total, nitratos) y analizar y determinar las sustancias contaminantes de los suelos en estudio: metales pesados ( As, Cd, Co, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb, Sb, Sn, Zn). Se tomó como objeto de estudio los suelos agrícolas de la Estación Experimental El Mantaro de la Universidad Nacional del Centro del Perú ubicado en el barrio La Florida, los cuales son regados con aguas del canal. La población se determinó seleccionando los lotes destinados a la siembra en el mes de agosto, los cuales fueron: 2, 3, 6a, 6b, 7, en los que se sembró maíz; y 11, 12 y 13, en los que se sembró haba. El muestreo fue realizado por el método sistemático por cuadrícula.

El monitoreo se realizó en los meses de Agosto, Octubre y Diciembre del año 2011, en los días 10, 11 y 12 de cada mes. Las muestras fueron analizadas en los laboratorios de la Universidad Nacional Agraria la Molina y J. Ramón, ambos acreditados por INDECOPI. En el análisis de caracterización de los suelos, se encontró que el pH es óptimo variando de 6,74 a 7,58; la conductividad eléctrica varía de 0,52 a 1,06 dS/m; la textura va de Franco a Franco arcilloso; la capacidad de intercambio catiónico va de 11,20 a 16,32 meq/100g, el calcio intercambiable va de 6,46 hasta 12,23 meq/100g, el magnesio intercambiable está en el rango de 1,58 a 1,95 meq/100g), el potasio intercambiable varía de 0,19 a 0,42 meq/100g, y el sodio intercambiable de 0,07 a 0,30 meq/100g; el porcentaje de carbonatos varía de 0,00 a 6,00 y el porcentaje de materia orgánica está en el rango de 0,89 a 3,48; el fósforo va de 14,6 a 46,4 ppm y potasio va de 131 a 187 ppm; el porcentaje de nitrógeno va desde 0,14 hasta 0,21; el porcentaje de carbono va de 0,52 a 2,02; y la concentración de nitratos va de 8,85 a 42,21 ppm. Los resultados del análisis instrumental por el método analítico de Inducción de Plasma Acoplada (ICP), han detectado concentraciones importantes, que alcanzan y superan los niveles máximos permitidos por las normativas canadienses para los elementos As, B, Cd y Zn. El Perú no cuenta con estándares de calidad ambiental para suelos por lo que se tomó de referencia las directrices canadienses. El contenido de arsénico de 48,3 ppm es 302,5% mayor que el nivel referencial; la concentración de boro obtenida fue de 11,4 ppm superando en 470 % al límite de referencia; el contenido de cadmio 4,28 ppm supera en 198,6 % al límite referencial; y la concentración de zinc 777,9 ppm es mayor que el nivel referencial en 288,95%. El resto de los elementos analizados como el cromo, cobre, cobalto, estaño mercurio y níquel, no mostró resultados mayores a los límites referenciales.

## **2.2 Base teórica**

### **2.2.1 El cromo en el suelo**

Elemento químico, símbolo Cr, número atómico 24, peso atómico 51.996; metal que es de color blanco plateado, duro y quebradizo. Sin embargo, es relativamente suave y dúctil cuando no está tensionado o cuando está muy puro. Sus principales usos son la producción de aleaciones anticorrosivas de gran dureza y resistentes al calor y como recubrimiento para galvanizados. El cromo elemental no se encuentra en la naturaleza. Su mineral más importante por abundancia es la cromita. Es de interés geoquímico el hecho de que se encuentre 0.47% de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  en el basalto de la Luna, proporción que es de 3-20 veces mayor que el mismo espécimen terrestre. (Lenntech, 2018)

El cromo forma tres series de compuestos con otros elementos; éstos se representan en términos de los óxidos de cromo: cromo con valencia dos, CrO, óxido de Cr(II) u óxido cromoso; con valencia tres, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, óxido de Cr(III) u óxido crómico, y con valencia seis, CrO<sub>3</sub>, anhídrido de Cr(VI) o anhídrido de ácido crómico. El cromo es capaz de formar compuestos con otros elementos en estados de oxidación (II), (III) y (VI). (Lenntech, 2018)

## **2.2.2 Fuentes del cromo**

### **A. Material parental del suelo:**

Alloway (2013) reporta que, el contenido de metales pesados en un suelo es la suma de las concentraciones de elementos derivados de minerales en el material parental geológico sobre el cual el suelo se ha desarrollado (fuente litogénica) y las entradas provienen de un amplio rango de posibles fuentes antropogénicas (contaminación).

Según Iyaka (2009), generalmente, el material parental determina los niveles de cromo en los suelos, y las concentraciones de cromo típicas en el suelo varían ampliamente y los contenidos elevados están asociados con la contaminación antropogénica. El cromo trivalente, menos tóxico, menos móvil y abundante naturalmente en el suelo está principalmente enlazado a la materia orgánica, pero los compuestos de cromo en el estado hexavalente son tóxicos, raros y usualmente asociados con la contaminación industrial. Las barreras del sistema suelo-planta, limitan el impacto del cromo en los canales alimenticios, debido a la inmovilidad del cromo en el suelo, sin embargo, los niveles elevados de cromo en el suelo pueden influenciar la absorción de cromo por las plantas.

### **B. Deposición atmosférica:**

Estas incluyen la deposición atmosférica de partículas de aerosol (<30 µm de diámetro), gotas de lluvia contenido metales pesados, o formas gaseosas de elementos, aplicación directa de fertilizantes agrícolas, agroquímicos y diferentes materiales orgánicos incluyendo lodos de depuradora, estiércoles de ganado, residuos alimenticios y compost. Los materiales tecnogénicos tales como cenizas, residuos de minas y demolición de escombros pueden ser contaminantes en suelos existentes (pedogénicos) o pueden formar los materiales parentales de suelos nuevos, hechos por el hombre (Antrosols). La concentración total de un metal pesado en el suelo es la suma de estas diferentes entradas menos las pérdidas a través de las plantas cosechadas o cortadas (pastos), erosión de las partículas del

suelo por el viento o por el agua, lixiviación descendente desde la solución en el perfil de suelo y pérdida por volatilización de formas gaseosas de elementos.

### C. Industria

El cromo y sus compuestos son muy importantes para diversos usos, por ejemplo: es utilizado en la limpieza de metales de procesamiento curtido de cuero, conservación de la madera, la cerámica, la pirotecnia, la electrónica, fabricación de aleaciones metálicas, en la industria química, colorantes, plaguicidas, el cromado electrolítico o galvanoplastia, el uso de compuestos de cromo mordientes en teñido de telas y otros usos menores como conservación de la madera, fotograbado, fabricación de cerillos, explosivos, linóleo, como colorantes, pigmentos, por lo que es el contaminante más común en una amplia variedad de desechos industriales, es por ello primordial considerar su toxicidad en el medio laboral y en el medio ambiente en general. En la tabla 1 se muestra algunos tipos de compuestos de cromo y los usos que tienen en diferentes industrias. (Mayta et al., 2015).

**Tabla N° 1:** Compuestos de cromo y sus usos en diferentes procesos de la industria.

TIPO DE COMPUESTO	USOS
Acido Crómico	Galvanoplastia
Dicromato sódico	Curtido de pieles
Trifluoruro de cromo Cloruro crómico	Mordiente para teñidos
Sulfato crómico	Colorante de gemas sintéticas
Fluoruro de cromo Dicromato sódico	Tinción de telas
Dicromato de sodio	Mordiente
Acetato de cromo	Estampados de textiles
Ion trivalente ( $Cr_{3+}$ ) Ion hexavalente ( $Cr_{6+}$ ), ( $CrO_4^{2-}$ )	Colorante de vidrio

Fuente: Diana Sofía Guevara Zumárraga: "Biorremoción de Cromo (Cromo Total y Cromo VI). En Agua Sintética por dos Inóculos Bacterianos Nativos Compuestos, a Escala de Laboratorio"

#### 2.2.3 Transporte del cromo

Alloway (2013) reporta que para que se presente la contaminación del suelo por metales o metaloides tienen que ser transportados desde una fuente al suelo

en una localidad particular. Los principales mecanismos por los cuales los metales o metaloides pesados son transportados desde una fuente al suelo son:

- Movimiento de corrientes de aire (viento) y deposición de cenizas, partículas de tamaño de aerosol ( $< 30 \mu\text{m}$ ) y formas gaseosas de metales (por ejemplo Hg).
- Movimiento de agua (escorrentía superficial o inundación de ríos) seguido por deposición de suelos en zonas casi planas, conteniendo metales o metaloides o en suelos aluviales en el caso de anegamiento de ríos.
- Movimiento por gravedad, pendiente abajo, de rocas ricas en metales y materiales minerales contaminados.
- Ubicación intencional por tractores, pulverizadores, esparcidores de estiércoles, camiones y excavadoras de materiales conteniendo metales o metaloides.

La reactividad química del cromo en los suelos varía en función del pH, potencial redox, presencia de potenciales donantes de electrones y de la adsorción de cromo sobre los coloides. En suelos de pH neutro con concentraciones naturales de cromo, el Cr (III) y el cromo (VI) pueden formar varios productos hidrolizados y deprotonados, que pueden dominar sobre los otros. En efecto, aunque el  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  es poco soluble entre pH 5.5 – 12.0 (Rai et al, 1987), las especies dominantes de Cr (III) deberían ser producto hidrolítico de  $\text{Cr}(\text{OH})_2^+$ . Sin embargo, con el incremento de la concentración de Cr (III), los productos hidrolíticos polinucleares ( $\text{Cr}_2(\text{OH})_4^{+2}$ ,  $\text{Cr}_3(\text{OH})_5^{+4}$ , y  $\text{Cr}_4(\text{OH})_6^{+6}$ ) pueden también formarse. En suelos ácidos (pH  $< 5.5$ ) y fuertemente ácidos (pH  $< 4$ ), el  $\text{Cr}(\text{OH})_2^+$  y el  $\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6^{+3}$ , respectivamente, pueden ser las formas predominantes de Cr (III) (Ritchie and Sposito, 1995).

Los productos de hidrólisis del Cr (III) son comúnmente adsorbidos en los minerales de arcilla, y la fuerza de esta adsorción generalmente se incrementa con la alcalinización del pH del suelo, también debido al incremento de la carga negativa en la superficie de arcillas y la deprotonización de ligantes orgánicos de las sustancias húmicas, mientras que a pH neutro-alcalino la precipitación de  $\text{Cr}(\text{OH})_3$ .  $\text{H}_2\text{O}$  previene la complejación orgánica de cromo (James, 1996).

En suelos neutros y alcalinos, con valores de pH mayores de 7.0, el cromo precipita como  $\text{Cr}(\text{OH})_3$ , también en combinación con metales alcalinos y metales pesados (Gonnelli and Renella, 2013).

Por los datos expuestos, de la influencia de las propiedades del suelo, el cromo es fuertemente retenido por la fase sólida, y es generalmente poco soluble y no móvil. Sin embargo, la acidificación del suelo, así como el incremento de las concentraciones de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{F}^-$  pueden incrementar drásticamente la solubilidad del cromo (Bequer et al., 2003).

#### **2.2.4 Especiación de cromo**

La especiación es un término que se utiliza como sinónimo de distribución de las especies químicas. Las especies químicas de un elemento son las formas específicas en que se presenta definidas a partir de: la composición isotópica, el estado de oxidación, y/o la estructura compleja o molecular (Adriano, 2001). La forma resultante de la especiación condiciona la movilidad, biodisponibilidad y toxicidad de un mismo elemento, es decir, su comportamiento como contaminante potencial de un determinado medio (Larios Bayona, 2014)

El análisis de especiación se define como la separación y cuantificación de los diferentes estados de oxidación o formas químicas de un elemento en particular. Esta clase de análisis es esencial para predecir y modelar el destino, el riesgo y los efectos de un elemento químico en el ambiente. Aunque determinar la concentración total de un elemento es útil, la determinación de cada especie es un paso muy importante ya que permite estudiar el proceso que ha ocurrido (Montauban Gonzáles, 2013).

##### **a) La especiación del cromo: Cr(III)**

La presencia y la concentración de la forma del Cr trivalente, como un ion libre en el ambiente depende de diferentes procesos químicos y físicos, tales como: la hidrólisis, formación de complejos, reacciones redox y de adsorción. Como par iónico libre el Cr (III) existe como  $[\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$  y como los productos de su hidrólisis. Estos productos son el  $[\text{Cr}(\text{OH})_2]^{2+}$  (ac),  $[\text{Cr}(\text{OH})_2]^{+}$  (ac) y  $\text{Cr}(\text{OH})_3$ (ac), los cuales predominan en una solución que va en un rango de pH de 4 – 10. (Vilca Castro, y otros, 2016).

##### **b) La especiación del cromo: Cr(VI)**

El Cr (VI) forma diferentes especies dependiendo del pH y la concentración total del Cr (VI). Existe dependencia de este ion con el pH, debido a que a valores de pH > 7 predominan iones de  $[\text{CrO}_4]^{2-}$ , mientras que a valores de pH entre 1 – 6, predomina el  $[\text{HCrO}_4]^-$ . Los compuestos donantes de los electrones son la materia orgánica o especies inorgánicas reductoras muy abundantes en los suelos. (Vilca Castro, y otros, 2016)

### 2.2.5 Efectos del Cromo

#### A. En el ambiente

En los ecosistemas acuáticos, el  $\text{Cr}^{+6}$  se encuentra principalmente en forma soluble, que puede ser lo suficientemente estable como para ser transportado por el agua. Sin embargo, éste finalmente se convierte en  $\text{Cr}^{+3}$  mediante la reducción de especies tales como las sustancias orgánicas, el ácido sulfhídrico, el azufre, el sulfuro de hierro, el amonio y el nitrito. Por lo general, esa forma trivalente no migra de manera significativa sino que se precipita rápidamente y se adsorbe en partículas en suspensión y sedimentos del fondo. Se ha comprobado que se acumulan en muchas especies acuáticas, especialmente en peces que se alimentan del fondo, como el bagre (*Ictalurus nebulosus*), en los bivalvos, como la ostra (*Crassostrea virginica*), el mejillón azul (*Mytilus edulis*) y la almeja de caparazón blando. (Chávez Porras, 2010)

En los suelos, el  $\text{Cr}^{+3}$  es relativamente inmóvil debido a su gran capacidad de adsorción en los suelos, pero el  $\text{Cr}^{+6}$  es muy inestable. Las reacciones redox afectan la biodisponibilidad y la toxicidad del mismo. La oxidación puede ocurrir en presencia de óxidos de Fe y Mg, en suelos frescos y húmedos (anaeróbicos) y en condiciones levemente ácidas. La reducción puede ocurrir en presencia de sulfuros y Fe (II) (condiciones anaeróbicas) y se acelera en presencia de materia orgánica. Debido a esta razón, aunque el  $\text{Cr}^{+3}$  (en muy bajas dosis) constituye un microelemento esencial en los animales, el  $\text{Cr}^{+6}$  es no esencial y tóxico en concentraciones bajas; por lo cual deben controlarse las actividades antrópicas que liberan  $\text{Cr}^{+3}$ . Aun cuando se libera al ambiente, no existe garantía alguna de que permanezca en ese estado químico. Por ejemplo, la práctica de depositar residuos en rellenos sanitarios con contenido de  $\text{Cr}^{+3}$  provenientes de curtiembres, junto con otros desechos industriales ácidos o con desechos cloacales, que crean condiciones ácidas al descomponerse, puede transformar el  $\text{Cr}^{+3}$  en  $\text{Cr}^{+6}$ . (Chávez Porras, 2010)

## **B. Salud**

Los compuestos con cromo en estado de oxidación Cromo III son considerablemente menos peligrosos que los compuestos de Cromo VI. Los compuestos de Cromo III no se absorben fácilmente en el aparato digestivo y pueden combinarse con proteínas de las capas superficiales de la piel, formando complejos estables. En ausencia de una sensibilización previa con compuestos de Cromo VI, los compuestos de Cromo III no producen ulceraciones ni suelen producir dermatitis alérgicas.

Los compuestos de cromo en estado de oxidación Cromo VI se absorben rápidamente después de la ingestión o la inhalación. La captación a través de la piel intacta es menos conocida. Los efectos irritantes y corrosivos del Cromo VI se producen inmediatamente después de la absorción a través de la mucosa, que es muy rápida. La exposición profesional a los compuestos de Cromo VI puede producir irritación o corrosión cutáneo-mucosa, reacciones cutáneas de tipo alérgico o ulceraciones de la piel.

Los efectos nocivos de los compuestos de cromo se observan generalmente entre las personas que trabajan en lugares donde está presente el Cromo VI, especialmente durante su fabricación o utilización, y afectan principalmente a la piel y al aparato respiratorio.

Los riesgos industriales típicos son: la inhalación de polvo y humos procedentes de la fabricación del dicromato a partir del mineral de cromita y de la fabricación de los cromatos de plomo y zinc; la inhalación de nieblas de ácido crómico durante el cromado o el revestimiento de superficies metálicas; y el contacto cutáneo con compuestos de Cromo VI durante su fabricación o uso. La exposición a humos que contienen Cromo VI también puede producirse durante la soldadura del acero inoxidable. (Gunnar, 2017)

### **2.2.6 Propiedades físicas del suelo**

#### **2.2.6.1 Textura**

El conocimiento de las proporciones de los diferentes tamaños de partícula en un suelo (textura del suelo) es crítico para el entendimiento del funcionamiento y manejo del suelo. Cuando se investigan los suelos en un lugar, la textura del suelo es frecuentemente una de las primeras y más importantes propiedades a determinar, para que un especialista en suelos pueda sacar muchas conclusiones de esta información. Además la textura del

suelo es una propiedad del suelo que está sujeta difícilmente a cambio, de tal manera que es considerada una propiedad básica del suelo (Weil and Brady, 2016).

La textura de los suelos se determina por procedimiento de laboratorio conocido como análisis mecánico o del tamaño de las partículas. El fundamento es determinar la distribución porcentual de las partículas individualizadas de las fracciones arena, limo y arcilla. Los suelos son siempre el resultado de una mezcla de sus fracciones. Las clases texturales se basan en las diferentes combinaciones de arena, limo y arcilla, por consiguiente, estas combinaciones con casi infinitas. No obstante se han fijado solo doce clases texturales básicas, que se enumeran en orden de incremento de la fracción fina; y en relación al suelo se denominan: arena, arena franca, franco arenoso, franco, franco limoso, limo, franco arcillo arenoso, franco arcilloso, franco arcillo limoso, arcillo arenoso, arcillo limoso y arcilla (Zavaleta, 1992).

En largos periodos de tiempo, los procesos pedológicos tales como la iluviación y la meteorización mineral pueden alterar la textura de ciertos horizontes de suelo. Igualmente, la erosión y la subsecuente deposición hacia las partes inferiores de un paisaje pueden selectivamente remover o depositar partículas de cierto tamaño. Sin embargo, las prácticas de manejo generalmente no alteran la clase textural de un suelo. Cambiar la textura del suelo podría requerir la mezcla con otro material suelo de una clase textural diferente. Por ejemplo, la incorporación de grandes cantidades de arena para cambiar las propiedades físicas de un suelo arcilloso para usarlo en recipientes de invernadero o para pastos podría ser considerado un cambio en la textura del suelo. Sin embargo, agregar turba o compost a un suelo mientras se mezcla en un recipiente no constituye un cambio en la textura del suelo, desde que esta propiedad se refiere solo a las partículas minerales (Weil and Brady, 2016).

Las partículas de **arena** mayormente son granos visibles al ojo humano que consisten de un mineral simple, usualmente cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y otros minerales primarios. Debido a la dominancia de cuarzo, las separatas de arena generalmente contienen pocos nutrientes de las plantas. Las relaciones entre el tamaño de partícula de la arena y el área superficial específica (área superficial para una masa dada de partículas) son inversa. Las partículas grandes de arena tienen baja área superficial específica. Por lo tanto, las partículas de arena poseen poca capacidad para retener agua o nutrientes. Por las propiedades descritas anteriormente, los suelos mayormente arenosos son infértiles y sueltos. Las partículas de **limo**, son similares en forma y composición minerales a las partículas de arena, pero ya no son visibles al ojo humano. La poca plasticidad, cohesión,

y capacidad adsorptiva que exhiben algunas fracciones de limo se deben mayormente a las películas de arcilla adherentes. Las partículas de arcilla tiene una gran área superficial específica, que le confiere una tremenda capacidad para adsorber agua y otras sustancias (Weil and Brady, 2016).

El tipo de arcilla tiene que ver con su estructura y tiene arcillas con carga permanente, es decir, carga generada por sustitución isomórfica, y arcillas con carga variable o dependiente del pH, la cual es generada por la adsorción o remoción de iones hidrógeno en la superficie de los coloides. Por lo tanto, la mayor parte de las arcillas se caracterizan por tener cargas eléctricas negativas en su superficie, estas cargas son responsables de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) del suelo y constituyen un freno al movimiento de los cationes metálicos en la solución del suelo, esto hace que los metales permanezcan por más tiempo en el suelo y disminuyan su solubilidad y biodisponibilidad (Esteves da Silva, 2002; Basta y McGovern, 2004; Wang y Qin, 2007).

Los suelos arenosos carecen de capacidad de fijación de metales pesados, pasando rápidamente al subsuelo y contaminando los niveles freáticos. Por el contrario, los suelos arcillosos tienden a adsorber metales pesados que quedan retenidos en su superficie, donde cada especie de arcilla en el suelo tiene valores determinados de superficie específica y descompensación eléctrica (García y Dorronsoro, 2001).

## **2.2.7 Propiedades químicas del suelo**

### **2.2.7.1 pH**

Los suelos ácidos ( $\text{pH} < 7$ ) son normalmente comunes en regiones húmedas. En estos suelos, la concentración de iones  $\text{H}^+$  excede la de los iones  $\text{OH}^-$ . La mayoría de las plantas crecen mejor en suelos con una reacción ligeramente ácida. En este rango de pH, casi todos los nutrientes de las plantas están disponibles en cantidades óptimas. Los suelos con un  $\text{pH} < 6$  es probable que sean deficientes en algunos de los nutrientes disponibles para el óptimo crecimiento de las plantas. Calcio, magnesio y potasio son especialmente deficientes en suelos ácidos. En suelos muy fuertemente ácidos, el aluminio, el hierro, y el manganeso pueden estar en cantidades tóxicas debido a que se incrementa su solubilidad. Además, estos elementos reaccionarán con los fosfatos para formar fosfatos insolubles (Tan, 2011).

La acidez y alcalinidad son usualmente cuantificadas usando la escala de pH, que expresa la actividad o concentración de iones  $\text{H}^+$  presentes en una solución. Para entender la acidificación del suelo y su manejo, se necesita saber de dónde provienen los iones  $\text{H}^+$ , como ellos entran al sistema suelo, y como ellos pueden perderse. Esos factores que son

fuentes de iones H<sup>+</sup> son los siguientes: (i) ácido carbónico y otros ácidos orgánicos, (ii) acumulación de materia orgánica, (iii) oxidación de nitrógeno (nitrificación), (iv) oxidación del azufre, (v) precipitación pluvial, y (vi) absorción de cationes por las plantas (Weil and Brady, 2008).

El pH de los suelos varía de 3.5 a 10. Todas las plantas más comunes exigen un grado de preferencia por un rango determinado de pH para una mejor producción, no es por la avidez que tengan de iones H<sup>+</sup> u OH<sup>-</sup>, sino porque dentro de un rango de pH hay una mayor o menor disponibilidad de nutrientes; por consiguiente, el efecto del pH en el crecimiento de las plantas es preferentemente nutricional (Zavaleta, 1992).

El pH del suelo tiene un efecto sobre la concentración del metal libre y lábil, porque afectan el equilibrio entre la especiación metálica, solubilidad, adsorción e intercambio de iones en el suelo. Además es un factor esencial, porque la mayoría de los metales tienden a estar más disponibles a pH ácido, a excepción As, Mo, Se y Cr, que se movilizan a pH alcalino, pero en los suelos ácidos, se produce una competencia de los iones de hidrogeno con los cationes metálicos por los sitios de intercambio (Arao et al., 2010). Lo cual permite definir la movilidad del catión, debido a que con valores moderadamente altos se produce la precipitación como hidróxidos y en medios muy alcalinos pasan como hidroxicomplejos.

La Tabla N°2 muestra la movilidad relativa de los metales pesados según el pH del suelo.

**Tabla N° 2:** Movilidad relativa de los metales pesados según el pH.

<b>Movilidad</b>	<b>Ácido</b>	<b>Neutro y alcalino</b>
<b>Alta</b>	Zn, Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au	
<b>Media</b>	Cd	Cd
<b>Baja</b>	Pb	Pb
<b>Muy Baja</b>	Al, Sn, Pt, Cr	Al, Sn, Cr, Zn, Cu, Co, Ni, Hg, Ag, Au

Fuente: García y Dorronsoro, 2001.

### 2.2.7.2 Materia orgánica

La medida a la cual la materia orgánica se acumula en los suelos está determinada por el balance de ganancias y pérdidas de carbono orgánico. Tres factores ambientales

destacan en la determinación general de la concentración de carbono orgánico en la superficie de los suelos, estos son temperatura, humedad y textura. Cuando el stock de carbono orgánico del suelo, la cantidad almacenada por unidad de área de la superficie de la tierra es considerada, entonces la distribución en profundidad del suelo es un cuarto factor determinante (Weil and Brady, 2016).

Según Plaster (2014), cinco principales factores afectan directamente la cantidad de materia orgánica en el suelo, vegetación, clima, textura del suelo, drenaje y labranza. En suelos bien drenados, las praderas generan la mayor materia orgánica del suelo debido al sistema radicular extensamente fibroso de pastos en las praderas que generan gran cantidad de material orgánico subterráneo. En contraste, los árboles generan materia orgánica como litter sobre la superficie del suelo. El litter se descompone dentro de una capa orgánica delgada, el horizonte O, sobre la superficie. Los insectos, las lombrices, y otros animales mezclan el material dentro de la parte superior de unos pocos centímetros de suelo, haciendo un horizonte A superficial, rico en humus. Las agujas de las coníferas son especialmente recalcitrantes, por lo que los bosques de coníferas tienen menos materia orgánica que otros bosques y no tienen un horizonte A. Las plantas en las praderas también mueren cada año, mientras que los árboles no. Esto significa que la mayor parte de las plantas de la pradera son devueltas al suelo cada año. El crecimiento diferente de gramíneas y árboles causa diferencias en praderas y zonas húmedas y en sus suelos.

La descomposición de la materia orgánica del suelo, evaluada a través de las tasas de descomposición y mineralización, son influenciadas por el pH del suelo, entre otros factores. Las condiciones ambientales conducentes a una rápida mineralización y descomposición orgánica incluyen suficiente humedad, aireación, temperaturas alrededor de 35°C y pH alrededor de la neutralidad. Los organismos responsables de la descomposición orgánica en el suelo son afectados por el pH, y un alto contenido de calcio y pH alrededor de la neutralidad resulta en una población bacteriana más diversa y abundante. Se debe enfatizar que la diversidad bacteriana incrementa dramáticamente con el pH del suelo, desde suelos muy ácidos a ligeramente alcalinos (Weil and Brady, 2016).

La materia orgánica del suelo influye en las propiedades del suelo e indirectamente en el crecimiento de las plantas. El humus, que es la fase más estable de la materia orgánica del suelo, incluye en las **propiedades físicas**, confiriendo a los horizontes superficiales colores oscuros a negros, favorece la granulación y estabilidad de los agregados, reduce la plasticidad y cohesión de los suelos arcillosos, haciéndolos más fáciles de manipular, asimismo, incrementa la capacidad de retención de agua e infiltración.

En relación a las **propiedades químicas**, el humus generalmente representa el 50 al 90% del poder de adsorción de cationes de los suelos minerales superficiales. El humus coloidal tiene gran área superficial que permite la retención de cationes nutrientes (potasio, calcio, magnesio, etc.) en forma fácilmente intercambiable, que pueden ser usados por las plantas y no ser fácilmente lixiviados por el agua percolante del suelo. A través de su alta capacidad de intercambio de cationes y los grupos funciones ácidos y básicos, proporciona gran parte de la capacidad tampón de los suelos. Entre los **efectos biológicos** de la materia orgánica del suelo, especialmente de la fracción descompuesta, proporciona mayormente el alimento para la comunidad de los organismos del suelo (Weil and Brady, 2016).

La materia orgánica del suelo se compone de sustancias húmicas y no húmicas, siendo las sustancias húmicas los compuestos más estables del suelo (ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y huminas), además, tiene un número relativamente grande de grupos funcionales como: hidroxilos, carboxilos, metoxilos, fenólicos, etc. que tienen una alta afinidad por los iones metálicos, pudiendo formar complejos órgano-metálicos (Kabata-Pendias, 2004).

La materia orgánica reacciona con los metales formando un conjunto de partículas con capacidad para adsorber los iones de la solución del suelo y los metales una vez que forman quelatos o complejos pueden migran con mayor facilidad a lo largo del perfil. Además pueden adsorber tan fuertemente algunos metales, como es el Cu, que pueden quedar en posición no disponible por las plantas; mientras que el Pb y el Zn forman quelatos solubles muy estables.

### **2.2.7.3 Carbonato de Calcio**

El carbonato de calcio,  $\text{CaCO}_3$ , es una sal poco soluble que se encuentra naturalmente en varias formas y en varios grados de concentración en el suelo. Su presencia juega un papel fundamental en la estructura del suelo si se encuentra en concentraciones moderadas. Se utiliza como enmienda para neutralizar el pH de suelos ácidos y para suministrar el nivel de Calcio (Ca) para la nutrición de las plantas. Sin embargo, puede resultar problemático si su concentración llega a exceder la capacidad de adsorción en el suelo formando complejos insolubles con otros elementos. Estos componentes son difíciles de asimilar por las plantas llevando a su acumulación. Cantidades excesivas de calcio puede por ello restringir la disponibilidad de fósforo, boro y hierro para las plantas. (FAO, 2018)

#### **2.2.7.4 Conductividad eléctrica**

La conductividad eléctrica (CE) es una medida de la concentración de sales solubles en un suelo. La salinidad del suelo es hallada midiendo la CE en milimho por centímetro (mmho/cm) del extracto de suelos saturado. En el Sistema Internacional de Unidades (SI), se usa el decisiemen/m, siendo ambas unidades equivalentes, es decir: mmh/cm = decisiemen/m. Los suelos salinos están caracterizados por tener una conductividad eléctrica mayor de 4 dS/m a 25°C. El pH de los suelos salinos normalmente es menor de 8.5. Debido a la presencia de un exceso de sales y baja cantidad de iones sodio en posición de intercambio, estos suelos usualmente están en un estado floculado, y su permeabilidad es considerada a ser igual o mayor que la de suelos salino-sódicos o sódicos (Tan, 2011).

La conductividad eléctrica de un extracto de pasta saturada (CEs) mide la salinidad de una muestra en condiciones de saturación de agua. Para preparar el extracto se añade agua desmineralizada a una muestra seca y tamizada, hasta conseguir que se forme una pasta, con suficiente agua para poder considerar que está saturada y sin que aparezcan dos fases por exceso de agua. Se deja equilibrar la pasta y después se extrae el líquido filtrando con un embudo buchner al vacío. La CEs es proporcional a la concentración de sales en la solución y es función de la temperatura. La acumulación de sales en el suelo y la consecuente formación de suelos salinos depende principalmente de factores: (i) litológicos, (ii) geomorfológicos, (iii) Climáticos, (iv) hidrológicos, (v) antrópicos. El estudio del ciclo geoquímico de los elementos químicos permite identificar la procedencia de las sales que se acumulan en los suelos salinos. El origen último reside en las rocas que, al verse afectadas por la meteorización, liberan los elementos que la constituyen (Porta et al., 2003).

El aumento de la salinidad puede incrementar la movilización de metales pesados por dos mecanismos. En primer lugar los cationes, tales como sodio y potasio, asociados con las sales pueden reemplazar a los metales pesados en lugares de adsorción. En segundo lugar los aniones cloruro pueden formar complejos solubles estables con metales pesados tales como Cd, Zn y Hg; los cuales tienden a dar suelos con pH básico (Basta y McGowen, 2004).

#### **2.2.7.5 Fósforo disponible**

La disponibilidad de un elemento nutritivo es la resultante, en un determinado momento, de la serie de reacciones químicas complejas que se producen simultáneamente y cuyo equilibrio depende tanto de los factores físico-químicos del suelo, así como de las

interacciones fundamentales de la planta en el sistema. De tal manera, que el nivel de exigencias de elementos nutritivos del cultivo, el volumen de suelo explorado por las raíces, la capacidad de éstas de solubilizar y absorber los elementos nutritivos, son factores que varían enormemente de unas especies a otras y hacen aún más compleja la idea de elemento disponible (Domínguez, 1997).

Al evaluar la relativa disponibilidad y extractabilidad para la planta de las formas inorgánicas de fósforo (P) en el suelo, los iones  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  y  $\text{HPO}_4^{2-}$  en la solución suelo o débilmente adsorbidos a los sitios de intercambio aniónico sobre las superficies minerales son las fuentes dominantes de P inmediatamente disponibles para las plantas. El fósforo fuertemente adsorbido y los minerales conteniendo fósforo proporcionan poco fósforo inmediatamente disponible para las plantas. Mientras que el fósforo débilmente adsorbido (P labil) puede ser fácilmente desorbido a la solución, la conversión del fósforo fuertemente adsorbido y el P mineral a fósforo soluble es substancialmente bajo (Havlin et al., 2014).

La disponibilidad de fósforo en la mayoría de los suelos es máxima a pH cercano a 6.5. A pH bajo, la fijación de P es mayormente debido a la reacción con óxidos de Fe/Al y precipitación como  $\text{AlPO}_4$  y  $\text{FePO}_4$ . Conforme se incrementa el pH, el Al y Fe en solución disminuye, lo cual reduce la adsorción/precipitación de P e incrementa la concentración de P en solución. A pH mayor de 7.0, el  $\text{Ca}^{+2}$  precipita con P como minerales de P-Ca y la disponibilidad de P disminuye (Havlin et.al., 2014)

#### **2.2.7.6 Potasio disponible**

Los elementos nutrientes de las plantas como el potasio (K) están presentes en el suelo en cuatro formas. En forma conjunta, estas cuatro formas tienen dos funciones: almacenar nutrientes, y hacerlos disponibles para las plantas. Las cantidades de cada de las cuatro formas varían en sus funciones: unas formas son inmediatamente disponibles, pero, si no son absorbidos por la planta, se puede fácilmente perder del suelo. Otras formas son lentamente disponible y provee de nutrientes a mediano y largo plazo, preservando su uso para el futuro (Plaster, 2014).

Cuanto mayor sea la proporción de minerales altos en potasio, será mayor el potencial de disponibilidad de potasio en el suelo. Los suelos que contienen montmorillonita, vermiculita, o mica tienen más potasio que los suelos conteniendo principalmente arcillas caolinita, comúnmente presentes en suelos altamente meteorizados. El potasio intercambiable está altamente correlacionado a la disponibilidad de Potasio (K) para las plantas. Conforme se incrementa la disponibilidad de potasio en el suelo las recomendaciones de fertilización potásica disminuyen (Havlin et al., 2014).

### **2.2.7.7 Capacidad de intercambio catiónico**

La capacidad de intercambio de cationes (CIC) de un suelo está fuertemente afectada por la naturaleza y cantidad de los minerales de arcilla y la materia orgánica en el suelo. Los suelos con minerales 2:1 predominantemente tienen alta CIC que aquellos suelos con predominancia de minerales 1:1 o suelos altamente meteorizados conteniendo vermiculitas con hidroxialuminios. Los suelos con alto contenido de arcilla y materia orgánica tienen una alta CIC que los suelos arenosos, bajos en materia orgánica (Havlin et al., 2014).

Muchos de los componentes de la fase sólida del suelo retienen moléculas o iones, en forma más o menos permanente, este fenómeno corresponde a la adsorción. Algunos de estos procesos son reversibles, y los diferentes iones se retienen en cantidades aproximadamente equivalentes. Para analizar estos procesos se acostumbra utilizar el término de “cambio o intercambio de iones”. Por su influencia sobre las propiedades de los suelos, tanto químicas, como físicas y biológicas, es de importancia un buen conocimiento de estos fenómenos, que han sido bastante estudiados en condiciones de clima templado. Se entiende por adsorción el fenómeno por el cual una sustancia se une a una superficie, al ser atraída (la primera) por fuerzas que pueden ser. Electroestáticas, de Van der Waals o químicas, por un periodo más o menos largo. Cuando las fuerzas que intervienen son predominantemente electroestáticas, los procesos son más o menos reversibles y se les designa como cambio iónico, debido a que además de la adsorción de un ion se libera una cantidad equivalente de otro. Cuando la unión se debe a fuerzas de Van der Waals, se tiene una adsorción física, y en estos casos no se tiene que liberar una sustancia adsorbida. Es útil recordar que estas fuerzas son aditivas y de corta distancia. La retención también puede ocurrir por medio de precipitación, fijación y quimiosorción pero estos últimos procesos son poco reversibles (Fassbender y Bornemisza, 1987).

### **2.2.7.8 Cationes cambiables**

La mayoría de los cationes intercambiables son nutrientes de las plantas, excepto aluminio y sodio. En suelos ácidos, los principales cationes son aluminio, hidrógeno, calcio, magnesio, y potasio, mientras que en suelos neutros y básicos, los cationes predominantes son calcio, magnesio, potasio y sodio. Los cationes son adsorbidos a la capacidad de intercambio de cationes con diferente fuerza de adsorción, influenciando la facilidad con la cual los cationes pueden ser reemplazados o intercambiados con otros cationes. Para la mayoría de minerales, la fuerza de adsorción de cationes, o serie liotrópica, está generalmente representada así:



Las propiedades de los cationes determinan la fuerza de adsorción o facilidad de desorción. Primero, la fuerza de adsorción es directamente proporcional a la carga sobre los cationes (> carga > fuerza de adsorción). El ion  $\text{H}^{+}$  es único debido a que su pequeño tamaño y alta densidad de carga, de tal manera que su fuerza de adsorción está entre aluminio y calcio. Segundo, la fuerza de adsorción para cationes con similar carga está determinado por el tamaño o radio del catión hidratado. Conforme se incrementa el tamaño del catión hidratado, la distancia entre el catión y la superficie de la arcilla se incrementa. Los cationes más hidratados no pueden estar cerca de la superficie de intercambio como los cationes menos hidratados, resultando en una disminución de la fuerza de adsorción (Havlin et al., 2014).

#### **2.2.7.9 Saturación de bases**

La saturación de bases se incrementa con el incremento del pH del suelo. Estas relaciones varían ligeramente entre diferentes suelos. En Ultisols, la saturación de bases es aproximadamente 50% a pH 5, 80% a pH 6, y aproximadamente 100% a pH 7. A pesar de la variación entre suelos, las relaciones pH-saturación de bases pueden ser útiles en la evaluación de los requerimientos de cal para suelos ácidos. El incremento de pH tiene un gran efecto en incrementar la capacidad de intercambio de cationes en la fracción de la materia orgánica en el suelo comparado a la montmorillonita, que exhibe poca carga dependiente del pH. De tal manera, que la influencia del pH sobre la capacidad de intercambio de cationes es mayor en suelos con alta materia orgánica. Los suelos ácidos, intemperizados que contienen vermiculitas con hidróxido de aluminio (ultisols) también exhiben capacidad de intercambio de cationes dependiente del pH, debido a la gran cantidad de hidróxidos de aluminio en los espacios interlaminares de estas arcillas (Havlin et al., 2014).

#### **2.2.7.10 Acidez intercambiable**

La acidez reemplazable por sales o acidez intercambiable está primariamente asociada con el hidrógeno y aluminio intercambiable que están presentes en grandes cantidades en suelos muy ácidos. Estos iones son liberados a la solución suelo por intercambio de cationes con una sal tamponada. Una vez liberados a la solución suelo, el aluminio hidroliza para formar  $\text{H}^{+}$  adicional. El equivalente químico de acidez reemplazable por sales en suelos fuertemente ácidos es comúnmente miles de veces que la acidez activa en la solución suelo. Aún en suelos moderadamente ácidos, la caliza necesaria para

neutralizar este tipo de acidez es comúnmente más de 100 veces que lo necesario para neutralizar la solución suelo (acidez activa) (Weil and Brady, 2016).

Los tipos de iones  $H^+$  y el grado de disociación dentro de la solución suelo determinan la naturaleza de la acidez del suelo. Los iones  $H^+$  adsorbidos, de reserva o intercambiables son la causa del desarrollo de la acidez intercambiable, potencial o de reserva. La magnitud puede ser determinada por titulación del suelo. La acidez activa es medida y expresada como el pH el suelo. Este es el tipo de acidez sobre el cual reacciona el crecimiento de la planta (Tan, 2011).

### 2.2.8 La fertilidad del suelo

La fertilidad es una *condición* del suelo, o un conjunto de caracteres o propiedades, en virtud de las cuales en el suelo se produce la germinación de las semillas y el desarrollo vegetal.

Cuando estas condiciones o **factores de la fertilidad** se dan en un suelo, este producirá cosechas de calidad y de elevados rendimientos. Estos factores son: la presencia de humedad, de aireación y de elementos nutritivos asimilables en la solución del suelo, junto con unas adecuadas condiciones climáticas. Por tanto, lo que podemos decir sobre la fertilidad del suelo no es más que un resumen de lo dicho hasta aquí, es decir: la fertilidad del suelo depende de sus buenas condiciones físicas, químicas, biológicas y del clima. (Cuadrado Sanchez, y otros, 1980)

Relacionada al contenido de macronutrientes: materia orgánica (nitrógeno), fósforo y potasio de la capa superficial del suelo, hasta 30 cm de espesor. Su valor alto, medio o bajo se determina aplicándose la ley del mínimo, ello quiere decir que es definida por el parámetro que presenta el menor valor (MINAGRI, 2009).

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
1	<b>Fertilidad Alta</b> Todos los contenidos de Materia Orgánica, nitrógeno, <b>fósforo y/o potasio</b> son altos.
2	<b>Fertilidad Media</b> Cuando alguno de los contenidos de Materia Orgánica, <b>fósforo y/o potasio</b> es medio, los demás son altos.
3	<b>Fertilidad Baja</b> Cuando por lo menos uno de los contenidos de Materia Orgánica, <b>fósforo y/o potasio</b> es bajo.

Fuente: Laboratorio de suelos de la Universidad Nacional Agraria – La Molina.

**Tabla N° 3:** Parámetros que definen la fertilidad del suelo

<b>NIVEL</b>	<b>MATERIA ORGÁNICA (%)</b>	<b>FOSFORO DISPONIBLE (ppm)</b>	<b>POTASIO DISPONIBLE (ppm)</b>
Bajo	Menor de 2	Menor de 7	Menor de 100
Medio	2 – 4	7 – 14	100 – 240
Alto	Mayor de 4	Mayor de 14	Mayor de 240

Fuente: Laboratorio de suelos de la Universidad Nacional Agraria – La Molina.

La importancia de la fertilidad del suelo y la nutrición de la planta en la salud de toda la vida no puede ser sobreestimado. Conforme las poblaciones humanas continúan incrementándose, la alteración humana de los ecosistemas terrestres para producir alimentos y fibras dará lugar a una mayor demanda sobre los suelos para suministrar nutrientes a las plantas. Conforme el suministro de nutrientes de los suelos disminuye con el incremento de la intensidad del cultivo, es esencial mejorar la comprensión del comportamiento de los nutrientes en el suelo y hacer un uso eficiente de cada fuente de nutriente disponible para optimizar su aprovechamiento. Uno de los mayores desafíos de las generaciones futuras será desarrollar e implementar tecnologías de manejo del suelo, cultivo y nutrientes que favorezcan la productividad de la planta, mientras se protege la calidad del suelo, del agua y del aire. Si no hacemos algo por mejorar y mantener la capacidad productiva de nuestros suelos frágiles, no podremos continuar soportando la demanda de alimentos y fibra de la población creciente (Havlin et al., 2014).

### **2.2.9 Relación del cromo con el pH, MO y CIC**

#### **a. Relación del cromo con el pH:**

El cromo puede existir en varios estados de oxidación; sin embargo, las formas comunes y estables son  $Cr^{+3}$  y  $Cr^{+6}$ . El  $Cr^{+6}$  existe como anión, es muy móvil en el suelo y se considera la forma más tóxica, por lo general, en presencia de materia orgánica se reduce a  $Cr^{+3}$ . El  $Cr^{+3}$  es menos móvil y se adsorbe a las partículas del suelo más fuertemente, a pH 4 empieza a precipitar y a pH 5,5 precipita totalmente. Así, en la mayoría de los suelos el  $Cr^{+3}$  predomina como óxidos e hidróxidos insolubles (Reyes Guzmán, y otros, 2010)

Con valores entre 7,5 y 8,9. El Cr no muestra una dependencia directa con el pH, siendo también móvil con valores de pH > 8. Las fracciones extraíbles, intercambiables y solubles del Cr presentaron una correlación negativa con el pH,

indicando mayor movilidad en zonas con menor pH. No obstante, lo que condiciona con mayor intensidad la movilidad del Cr es su estado de oxidación, siendo el Cr (VI) altamente móvil y tóxico, pero el Cr (III) presenta muy baja movilidad y disponibilidad al ser fuertemente retenido por las partículas del suelo. La mayor proporción del Cr en los suelos se encuentra en forma reducida, con muy baja biodisponibilidad, como se pone de manifiesto en este estudio sobre los sedimentos. Se ha observado de todos modos en diferentes trabajos consultados que la oxidación de Cr (III) a Cr (VI) suele ser frecuente en suelos alcalinos, pobres en materia orgánica y con alto contenido en humedad. (Murcia Navarro, 2014)

#### **b. Relación del cromo con la MO:**

La materia orgánica juntamente con la arcilla del suelo y mediante una serie de reacciones fisicoquímicas, adsorben los contaminantes y permiten su inmovilización o liberación. No obstante, la formación de complejos y quelatos con los metales puede facilitar una mayor migración de éstos a través de los horizontes del suelo. De esta forma, la complejación por parte de la materia orgánica del suelo es uno de los procesos que gobiernan la solubilidad y bioasimilación de los metales pesados. Así, la toxicidad de los metales pesados se ve potenciada por la tendencia hacia la formación de compuestos organometálicos, los cuales son más solubles, disponibles y dispersables, además de aumentar la persistencia de estos contaminantes en el suelo debido a la dificultad de degradación de los complejos formados.

El Cr (III) en el suelo se encuentra como hidróxido de cromo o complejado, es incluso adsorbido en la materia orgánica. En cambio el Cr (VI) es un fuerte agente oxidante y muestra efectos tóxicos crónicos. (Vilca Castro, y otros, 2016)

#### **c. Relación del cromo con la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC):**

La capacidad de intercambio catiónico (CIC), la cual a su vez se ve influenciada por el pH del sustrato. La CIC aumenta la capacidad de autodepuración de los suelos y sedimentos al fijar los contaminantes sobre las superficies de las partículas. Dicha retención depende de características propias de cada ión metálico, como el radio iónico y la valencia, aumentando la retención al reducirse el radio y aumentar la valencia. Por ello, se ve favorecida la retención en mayor grado para Ni>Cu>Cr>Zn>Cd>Pb. Hay que tener en cuenta que una disminución del tamaño de partícula, implica un aumento de la superficie reactiva,

aumentando la capacidad de intercambio cationico, al incrementarse la carga de la superficie. Por otra parte, la disminuci3n del tama1o de part3cula contribuye a aumentar la fertilidad del suelo y de sus caracter3sticas de drenaje. (P3rez G3nzales, 2005)

**Tabla N° 4:** Par3metros edafol3gicos determinantes de la capacidad del suelo para acumular metales pesados y compuestos org3nicos t3xicos.

<b>PAR3METRO EDAFOL3GICO</b>	<b>EFEECTO MEDIOAMBIENTAL</b>
<b>CIC</b>	La CIC depende del contenido inorg3nico, de los materiales arcillosos y de su tipo, del contenido de materia org3nica y del pH del suelo. Suelos con baja CIC tienen poca capacidad para retener cationes o aniones por absorci3n.
<b>pH</b>	Disminuyendo el pH se aumenta la solubilidad de los metales pesados, disminuyendo la CIC y alterando la poblaci3n microbiana del suelo.
<b>Potencial redox (Eh)</b>	La disminuci3n del potencial redox a condiciones m3s reductoras implica la disoluci3n de los 3xidos de Fe y Mn, lo cual moviliza las sustancias adsorbidas sobre los 3xidos. El aumento del potencial redox a condiciones m3s oxidantes moviliza los metales pesados disolviendo los sulfuros met3licos y materia org3nica.
<b>Materia org3nica (%M.O.)</b>	La disminuci3n del contenido de MO reduce la CIC, la capacidad tamponante del suelo, la capacidad de adsorci3n para especies qu3micas, la capacidad de retener agua, la alteraci3n de la estructura f3sica y la disminuci3n de la actividad microbiana.
<b>Salinidad</b>	El aumento de la salinidad solubiliza los metales t3xicos, alterando el equilibrio de intercambio i3nico, aumentando la complejacion soluble. Tambi3n puede reducirse la actividad microbiana.

## 2.2.10 Marco Legal

### 2.2.9.1. Estándar de Calidad Ambiental – Canadá

#### Guía de Calidad Ambiental Canadiense.

Consejo Canadiense del Ministerio de Medio Ambiente (CCME). 2003, que consideran en sus criterios:

- Valores de suelo sobre las cuales se tiene efectos potencialmente perjudiciales en la salud.
- Valores para suelos de calidad aceptable.

**Tabla N° 5:** Estándares de Calidad de Suelo

<b>Estándares de Calidad de Suelo (mg/kg) o (ppm)</b>			
<b>Parámetro</b>	<b>Uso agrícola</b>	<b>Uso residencia – Áreas verdes</b>	<b>Uso Comercial e Industrial</b>
Arsénico	12	12	12
Bario	750	200	2000
Cadmio	1.4	10	22
Cromo total	64	64	87
Cromo (+6)	0.4	0.4	1.4
Cobre	63	63	91
Plomo	70	140	260 – 600
Mercurio	6.6	6.6	24 – 50
Níquel	50	50	50
Vanadio	130	130	130
Zinc	200	200	360

\*Fuente: Estándar de Calidad Ambiental – Canadá.

### 2.2.9.2. ECA para Suelo

**Tabla N° 6:** Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo (Decreto Supremo N° 011-2017-MINAM)

Parámetros en mg/kg PS <sup>(2)</sup>	Usos de suelo <sup>(1)</sup>			Método de ensayo
	Suelo agrícola <sup>(3)</sup>	Suelo Residencial/ Parques	Suelo Comercial/ Industrial / Extractivos	
<b>Orgánicos</b>				
<b>Hidrocarburos aromáticos volátiles</b>				
Benceno	0.03	0.03	0.03	EPA 8260 EPA 8021
Tolueno	0.37	0.37	0.37	EPA 8260 EPA 8021
Etilbenceno	0.082	0.082	0.082	EPA 8260 EPA 8021
Xilenos	11	11	11	EPA 8260 EPA 8021
<b>Hidrocarburos poliaromáticos</b>				
Naftaleno	0.1	0.6	22	EPA 8260 EPA 8021 EPA 8270
Benzo(a) pireno	0,1	0,7	0,7	EPA 8270
<b>Hidrocarburos de Petróleo</b>				
Fracción de hidrocarburos F1 (C6-C10)	200	200	500	EPA 8015
Fracción de hidrocarburos F2 (C10-C28)	1200	1200	5000	EPA 8015
Fracción de hidrocarburos F3 (C28-C40)	3000	3000	6000	EPA 8015
<b>Compuestos organoclorados</b>				
Bifenilos policlorados - PCB	0.5	1.3	33	EPA 8082 EPA 8270
Tetracloroetileno	2	4	10	EPA 8260
Tricloroetileno	0.01	0.01	0.01	EPA 8260
<b>Inorgánicos</b>				
Cianuro libre	0.9	0.9	8	EPA 9013- SEMWW-AWWA- WEF 4500 CN F o ASTM D7237 y/o ISO 17690:2015
Arsénico	50	50	140	EPA 3050 EPA 3051

Bario total	750	500	2000	EPA 3050 EPA 3051
Cadmio	1.4	10	22	EPA 3050 EPA 3051
Cromo total	**	400	1 000	EPA 3060/EPA 7199 o DIN EN 15192
Cromo VI	0,4	0.4	1.4	EPA 3060/EPA 7199 ó DIN EN 15192
Mercurio	6.6	6.6	24	EPA 7471 EPA 6020 ó 200.8
Plomo total (mg/kg MS) <sup>(2)</sup>	70	140	800	EPA 3050 EPA 3051

\*\* No aplica para el uso de suelo agrícola

- (1) Suelo: material no consolidado compuesto por partículas inorgánicas, materia orgánica, agua, aire y organismos, que comprende desde la capa superior de la superficie terrestre hasta diferentes niveles de profundidad.
- (2) PS: Peso seco.
- (3) Suelo agrícola: suelo dedicado a la producción de cultivos, forrajes y pastos cultivados. Es también aquel suelo con aptitud para el crecimiento de cultivos y el desarrollo de la ganadería. Esto incluye tierras clasificadas como agrícolas, que mantienen un hábitat para especies permanentes y transitorias, además de flora y fauna nativa, como es el caso de las áreas naturales protegidas.

EPA: Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos)

DIN: German Institute for Standardization

MS: materia seca a 105 C°, excepto para compuestos orgánicos y mercurio no debe exceder 40 °C, para cianuro libre se debe realizar el secado de muestra fresca en una estufa a menos de 10 °C por 4 días. Luego de secada la muestra debe ser tamizada con malla de 2 mm. Para el análisis se emplea la muestra tamizada < 2mm.

## 2.2.11 Fundamentos metodológicos y técnicos

### 2.2.11.1. Guía para el Muestreo de Suelos

Procedimiento para la toma de muestra; (MINAM, 2014):

#### A. Tipo de muestreo

##### Muestreo de identificación (MI):

El tipo de muestreo que se realizó fue el Muestreo de identificación (MI), que tiene por objetivo investigar la existencia de contaminación del suelo a través de la obtención de muestras representativas con el fin de establecer si el suelo supera o no los Estándares de Calidad Ambiental. El alcance del MI estará definido por los resultados y conclusiones de la investigación histórica y el levantamiento técnico (inspección) del sitio. (MINAM, 2014)

En el muestreo de identificación, no se dispone de datos precisos sobre la concentración de compuestos contaminantes en un suelo, sin embargo, para contar con un límite de confianza aceptable, es pertinente realizar un número mínimo de puntos de muestreo.

Para la elaboración del muestreo de identificación es necesario utilizar la información de la investigación histórica y la inspección del sitio potencialmente contaminado, que provee de insumos para la elaboración del modelo conceptual inicial, el mismo que debe ser lo suficientemente detallado para identificar claramente las fuentes potenciales o sospechosas de contaminación. La hipótesis de distribución de contaminantes contenidas en el modelo conceptual orientan el diseño del muestreo de identificación.

Para la elaboración del MI se utilizó como antecedente los reportes del Proyecto Mantaro Revive respecto al Cr y la inspección del sitio potencialmente contaminado para identificar las fuentes potenciales o sospechosas de contaminación.

Se debe tener en consideración los siguientes aspectos al momento de la formulación del Muestreo de Identificación:

- Se determina el Área de potencial Interés sobre la base de la investigación histórica y el levantamiento técnico (inspección) del sitio.
- Cuando en base a la investigación histórica y la inspección del sitio se considere que hay información concluyente sobre el origen, fuente y tipo de la posible contaminación del suelo, el número de puntos de muestreo se determinará respetando el número mínimo de puntos de muestreo indicados en la Tabla N° 8, aportando información que valide los resultados obtenidos y enfocado en el área y los compuestos de potencial interés.
- La profundidad del muestreo dependerá del tipo de suelo y contaminante a estudiar, y debe ser debidamente justificado, siendo necesario el muestreo a lo largo de la perforación, incluyendo su documentación geológica.

**Tabla N° 7:** Recomendaciones acerca de la aplicabilidad de los patrones de muestreo

<b>PATRÓN DE MUESTREO</b>	<b>EN IDENTIFICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN</b>	<b>EN REMEDIACIÓN</b>
<b>Rejillas regulares</b>	Recomendado ampliamente	Recomendado ampliamente
<b>Rejillas triangulares</b>	Recomendado ampliamente	Recomendado ampliamente
<b>Rejillas circulares</b>	Recomendado en sitios donde hayan ocurrido fugas o derrames puntuales	Recomendado en sitios donde se aplique una remediación <i>in situ</i> en contaminaciones puntuales.
<b>Sobre una línea</b>	Recomendado en sitios donde hayan ocurrido fugas a lo largo de ductos.	Recomendado en sitios donde se aplique una remediación <i>in situ</i> a lo largo de ductos.
<b>Diagonales múltiples</b>	Recomendado sólo si se asegura equidistancia entre los puntos.	Recomendado sólo si se asegura homogeneidad en el suelo y equidistancia entre los puntos.
<b>CON DISTRIBUCIÓN HOMOGÉNEA</b>		
<b>Diagonal cruzadas rotantes</b>	No recomendado.	Recomendado sólo en aquellos sitios donde la contaminación es uniforme y se va a dar seguimiento a una atenuación natural.

Fuente: Adaptado de SEMARNAT (2010).

## **B. Determinación de puntos de muestreo**

Un punto de muestreo es la ubicación espacial geo-referenciada del lugar donde se va a coleccionar las muestras sean éstas superficiales o en profundidad.

- **Para el muestreo de Identificación:**

El número mínimo de puntos de muestreo se determina en función de cada área de potencial interés dentro del predio de estudio, según lo establecido en la Tabla N° 8, que abarca el número total de los puntos de muestreo, tanto superficial (área de toma de muestras compuestas) como de profundidad.

**Tabla N° 8:** Número mínimo de puntos de muestreo para el Muestreo de Identificación

<b>ÁREA DE POTENCIAL INTERÉS (ha)</b>	<b>PUNTOS DE MUESTREO EN TOTAL</b>
0,1	4
0,5	6
1	9
2	15
3	19
4	21
5	23
10	30
15	33
20	36
25	38
30	40
40	42
50	44
100	50

FUENTE: Guía para Muestreo de Suelos Contaminados, 2014, MINAM.

- **Muestreo dirigido o a juicio de expertos**

Muestreo que se lleva a cabo sobre puntos específicamente determinados, cuando se cuenta con información previa del sitio, se conoce el producto derramado y es evidente la extensión de la afectación.

**C. Técnicas de muestreo:**

El muestreo es la actividad por la que se toman muestras representativas que permiten caracterizar el suelo en estudio, en tanto que la muestra puede ser definida como una parte representativa que presenta las mismas características o propiedades del material que se está estudiando y las muestras que serán enviadas al laboratorio, constituyen las muestras elegidas para ser analizadas de acuerdo a los objetivos establecidos.

La técnica del muestreo a aplicar depende, entre otros, del objetivo del estudio, de las condiciones edáficas, meteorológicas, geológicas e hidrogeológicas en el sitio, la profundidad y accesibilidad de la contaminación en estudio y de los requerimientos analíticos acerca de la cantidad y calidad de las muestras.

Los equipos, las herramientas y los instrumentos a usarse en el muestreo estarán en función de:

- La profundidad máxima a la que se va a tomar la muestra.
- El tipo de textura del suelo.
- El tipo de contaminante (volátil, semivolátil, no volátil) que se presume en el sitio.
- La accesibilidad al punto de muestreo.
- El tamaño de muestra necesaria para los análisis requeridos, con base en la(s) característica(s) o propiedad(es) de interés del contaminante y del sitio, así como las especificaciones de los métodos analíticos.

La toma de muestras debe documentarse detalladamente considerando los siguientes aspectos:

- Datos generales del sitio en estudio (por ejemplo razón social, ubicación, uso principal).
- Datos del punto de muestreo (por ejemplo clave del punto, coordenadas, técnica de muestreo, instrumentos usados, profundidad final, profundidad de la napa freática, operador, etc.).
- Datos de las muestras tomadas (por ejemplo, clave de muestra, profundidad, características organolépticas, textura, cantidad de la muestra tomada, compactación/consistencia, humedad, etc.).
- Comentarios adicionales y ubicación de los puntos de muestreo en un Croquis.

Durante el muestreo las condiciones organolépticas comprenden:

- El color determinado con la Tabla Munsell de colores.
- El olor teniendo cuidado de posibles intoxicaciones por inhalación de agentes contaminantes (por ejemplo olor petroquímico para gasolinas y productos petroquímicos, sulfuroso por presencia de H<sub>2</sub>S, ácido proveniente de relaves mineros, aromático provenientes de hidrocarburos aromáticos como alquitrán, BTEX, dulce para solventes, almendrado para cianuros, etc.).

## **2.3 Definición de términos básicos:**

### **2.3.1 Suelo**

(i) Material mineral u orgánico no consolidado sobre la superficie inmediata de la tierra que sirve como medio natural para el crecimiento de plantas terrestres, (ii) El mineral no consolidado o materia orgánica sobre la superficie de la tierra que ha estado sujeto a los efectos de factores ambientales y genéticos de: clima (incluyendo efectos del agua y la temperatura), y macro y microorganismos, condicionados por el relieve, actuando sobre el

material parental sobre un periodo de tiempo. Un suelo difiere de los materiales del cual se deriva en muchas propiedades físicas, químicas, biológicas y morfológicas (SSSA, 2015).

Según Weil and Brady (2016), los **suelos** son frecuentemente definidos en términos de los factores de formación como un cuerpo dinámico teniendo propiedades derivadas de los efectos combinados del clima y actividades bióticas, modificado por la topografía, actuando sobre los materiales parentales sobre periodos de tiempo. El horizonte A enriquecido orgánicamente en la superficie del suelo es denominado capa superficial del suelo. La aradura y el cultivo homogenizan y modifican los 20 a 25 cm superiores del perfil para formar una capa arable. La capa arable puede permanecer aún después que el cultivo ha cesado. En los suelos cultivados, la mayoría de las raíces de las plantas se hallan en la capa superficial del suelo y es la zona en que el agricultor puede fácilmente favorecer el suministro de nutrientes, aire y agua por la mezcla de enmiendas orgánicas e inorgánicas, mejoramiento de la estructura, y aplicación de riego.

### **2.3.2 pH**

La reacción de un horizonte de un suelo hace referencia al grado de acidez o basicidad de dicho horizonte, generalmente se expresa por medio del pH (Porta et al., 2003).

### **2.3.3 Caracterización de sitios contaminados**

Determinación cualitativa y cuantitativa de los contaminantes químicos o biológicos presentes, provenientes de materiales o residuos peligrosos, para estimar la magnitud y tipo de riesgos que conlleva dicha contaminación.

### **2.3.4 Contenido y concentración de nutrientes**

la concentración de nutrientes es usualmente expresada en gramos por kilogramo (g/kg) o miligramos por kilogramo (mg/kg) de peso fresco o seco, el contenido es usualmente expresado como peso por unidad de área (kg/ha) (SSSA, 2015).

### **2.3.5 Estándar de Calidad Ambiental (ECA)**

De acuerdo a la **Ley N° 28611 - Ley General del Ambiente**, el artículo 31º, señala que es la medida que establece el nivel de concentración o del grado de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el aire, agua o suelo, en su condición de cuerpo receptor, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente. Según el parámetro en particular a que se refiera, la concentración o grado podrá ser expresada en máximos, mínimos o rangos.

Por otro lado; el artículo 31.2 señala que el ECA es obligatorio en el diseño de las normas legales y las políticas públicas. Es un referente obligatorio en el diseño y aplicación de todos los instrumentos de gestión ambiental. El artículo 31.3 No se otorga la certificación ambiental establecida mediante la Ley del Sistema Nacional de Evaluación del Impacto Ambiental, cuando el respectivo EIA concluye que la implementación de la actividad implicaría el incumplimiento de algún Estándar de Calidad Ambiental. Los Programas de Adecuación y Manejo Ambiental también deben considerar los Estándares de Calidad Ambiental al momento de establecer los compromisos respectivos. Y el artículo 31.4 Ninguna autoridad judicial o administrativa podrá hacer uso de los estándares nacionales de calidad ambiental, con el objeto de sancionar bajo forma alguna a personas jurídicas o naturales, a menos que se demuestre que existe causalidad entre su actuación y la transgresión de dichos estándares. Las sanciones deben basarse en el incumplimiento de obligaciones a cargo de las personas naturales o jurídicas, incluyendo las contenidas en los instrumentos de gestión ambiental.

### **2.3.6 Límites Máximos Permitidos (LMP)**

Son la medida de concentración de elementos, sustancias, parámetros físicos, químicos y biológicos, se encuentran presentes en las emisiones, efluentes o descargas generadas por una actividad productiva (industria, minería, electricidad, pesquería etc.), que al exceder causa daño a la salud humana y al ambiente. (OEFA, s/f)

### **2.3.7 Saturación de bases**

La suma de las bases cambiables (calcio, magnesio, potasio y sodio) expresada como porcentaje de la capacidad total de intercambio catiónico, se conoce como el porcentaje de saturación de bases; el tanto por ciento de acidez cambiante (aluminio e hidrógeno) correspondería al complemento del anterior hasta el 100%. En suelos de coloides similares existe una correlación entre pH y porcentaje de saturación de las bases. Esta correlación directa no existe cuando se consideran suelos con una mineralogía de arcilla diferente (Fassbender y Bornemisza, 1987).

### **2.3.8 Textura del suelo**

La textura es una propiedad física que se determina en laboratorio y cuantifica la distribución del tamaño de partículas. Lo más importante de este dato es su uso en la descripción e identificación, documentación y mapeo de suelos. La textura se ha usado para pronosticar algunas propiedades químicas como la capacidad de intercambio

catiónico y algunas propiedades físicas como la retención de agua, la consistencia y la infiltración (Forsythe, 1980).

### **2.3.9 Nutriente disponible**

Un elemento esencial, o nutriente, en el suelo en una forma que la planta puede absorberlo al interior de las raíces (Plaster, 2014).

### **2.3.10 Capacidad de intercambio de cationes (CIC)**

Número total de cationes intercambiables que un suelo puede adsorber. Una medida de la habilidad del suelo para retener nutrientes que son cationes en el suelo. Expresado como miliequivalentes por 100 gramos de suelos o centímol de carga por kilogramo de suelo (Plaster, 2014).

### **2.3.11 Lábil**

Una sustancia que es fácilmente transformada por los microorganismos del suelo o está fácilmente disponible para la absorción de las plantas (SSSA, 2015).

### **2.3.12 Materia orgánica del suelo**

La fracción orgánica del suelo que incluye residuos de plantas y animales en diferentes estados de descomposición, células y tejidos de organismos, y sustancias sintetizadas por la población del suelo. Comúnmente determinada como la cantidad de material orgánico contenida en una muestra de suelo pasada a través de una malla de 2 mm (SSSA, 2015).

### **2.3.13 Nivel de fondo**

Concentración en el suelo de los químicos regulados que no fueron generados por la actividad objeto de análisis y que se encuentran en el suelo de manera natural o fueron generados por alguna fuente antropogénica ajena a la considerada. (MINAM, 2018)

### **2.3.14 Solución suelo**

La fase líquida del suelo y sus solutos, consistente de iones disociados de la superficie de las partículas del suelo y de otros materiales solubles (SSSA, 2015).

### **2.3.15 Contaminantes y contaminación**

Burt et al. (2003) menciona que las fuentes antropogénicas de metales y metaloides pueden ser descritas como **contaminantes** en el contexto de suelo o tierra. La importancia de la contaminación se puede mostrar claramente en una comparación de datos analíticos para gran número de base de datos de suelos con los resultados de suelos afectados por

contaminación antropogénica de diferentes fuentes (actividades urbanas, agrícolas, minería o fundición).

Yaron et al. (1996) consideran como un **contaminante** a cualquier compuesto químico de origen natural o antropogénico que se acumula en el suelo y cambia su equilibrio natural, como resultado de la actividad humana. Sin embargo, en una sociedad moderna, no puede desarrollarse sin el uso de compuestos naturales o sintéticos que pueden ser agregadas a los diferentes ecosistemas. El arte de salvaguardar el ambiente consiste en minimizar la cantidad de compuestos externos al sistema que alcancen la superficie de la tierra y limiten tanto como sea posible los sitios de generación de contaminación controlando sus hábitos de depósito.

Misra and Mani (2012) reportan que la **contaminación** puede ser definida como un cambio indeseable en las características físicas, químicas y biológicas del aire, agua y suelo que afecta la vida humana, la vida de organismos relacionados como animales y plantas, progreso industrial, condiciones de vida y bienes culturales.

## **CAPÍTULO III: METODOLOGÍA**

### **3.1. Método y alcance de la investigación**

#### **3.1.1 Método de Investigación**

##### **3.1.1.1. Método general de la Investigación**

El método general del trabajo es Hipotético – deductivo, porque trata de establecer la verdad o falsedad de las hipótesis, de acuerdo a las variables que componen el problema general, mediante el análisis de los datos obtenidos (Behar, 2008) y comprende la identificación, muestreo, análisis e interpretación de los datos de los suelos contaminados con cromo en el Valle del Mantaro.

##### **3.1.1.2. Método específico de la investigación**

###### **A. Selección del área de estudio**

Teniendo como referencia los reportes del proyecto Mantaro Revive 2007, se seleccionó el distrito de El Mantaro por sobrepasar el contenido de cromo en cuanto al ECA canadiense.

###### **a. Método de muestreo de suelos**

Teniendo en cuenta la Guía de muestreo para suelos contaminados del MINAM. (MINAM, 2014)

###### **b. Patrones de muestreo para definir la localización de puntos de muestreo en suelos contaminados**

Según la Guía de muestreo para suelos contaminados del MINAM nos indica que según nuestro objetivo a lograr podemos seleccionar el método para definir la localización de puntos de muestreo. Para esta investigación se utilizó el muestreo dirigido, muestreo que se lleva a cabo sobre puntos específicamente determinados y cuando se cuenta con la información previa del sitio.

### c. Número mínimo de puntos de muestreo

El número mínimo de puntos de muestreo se determina en función de cada área de potencial interés dentro del predio de estudio, según lo establecido en la Tabla N° 8, que abarca el número total de los puntos de muestreo, tanto superficial (área de toma de muestras compuestas) como de profundidad. Para la investigación se utilizó 05 localidades de 25 muestreos cada uno.

**Tabla N°8:** Número mínimo de puntos de muestreo para el Muestreo de Identificación

ÁREA DE POTENCIAL INTERÉS (ha)	PUNTOS DE MUESTREO EN TOTAL
0,1	4
0,5	6
1	9
2	15
3	19
4	21
5	23
10	30
15	33
20	36
25	38
30	40
40	42
50	44
100	50

FUENTE: Guía para Muestreo de Suelos Contaminados, 2014, MINAM.

### d. Para muestras superficiales

Para la toma de muestras superficiales (hasta una profundidad de aproximadamente un metro) se aplicó sondeos manuales. Este sistema es relativamente fácil, rápido de usar y de bajo costo, siendo poca la cantidad de

suelo que se extrajo con esta técnica, fue necesario obtener muestras compuestas de un total de 10 sondeos.

Las muestras compuestas fueron sometidas a partición, para reducir las y obtener una muestra representativa. Para esto se cuarteó la muestra mezclada y se repitió el proceso hasta que se llegó a la cantidad de material necesario (Figura N°2).

**Figura N° 2:** Partición de muestras



Fuente: LfUMerkblatt 3.8/4; 2010, Alemania, adaptado.

Como referencia, se tomó el espesor de las capas con respecto al uso del suelo de la Tabla N°9.

**Tabla N° 9:** Profundidad del muestreo según el uso del suelo

USOS DE SUELO	PROFUNDIDAD DEL MUESTREO (CAPAS)
Suelo Agrícola	0 – 30 cm (1) 30 – 60 cm
Suelo Residencial/Parques	0 – 10 cm (2) 10 – 30 cm (3)
Suelo Comercial/ Industrias/ Extractivo	0 – 10 cm (2)

Fuente: Guía para el Muestreo de Suelos, 2014

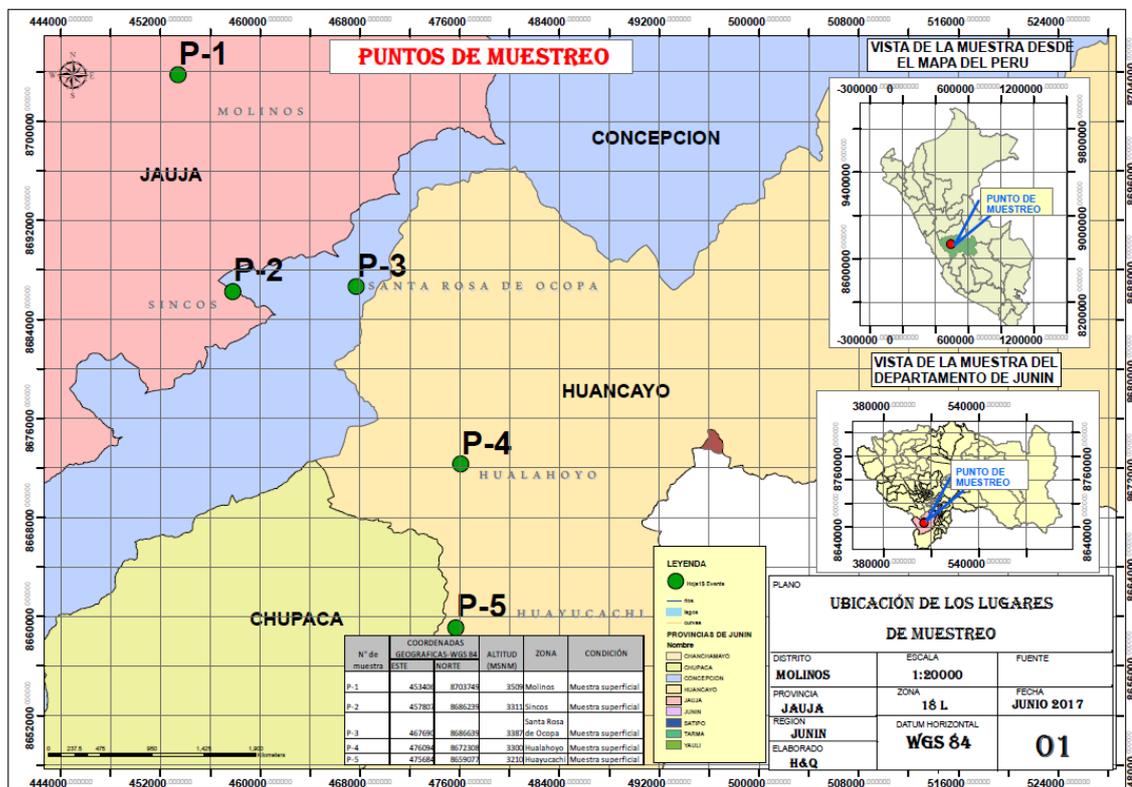
- 1) Profundidad de aradura
- 2) Capa de contacto oral o dermal de contaminantes
- 3) Profundidad máxima alcanzable por niños

## B. Procedimiento para la toma de muestras de suelo para el experimento

Puntos de muestreo – 05 localidades:

- Se seleccionó 05 localidades del Valle del Mantaro; Molinos, Hualahoyo, Santa Rosa de Ocopa, Sincos y Huayucachi del Valle del Mantaro
- En cada punto se realizó la toma de coordenadas como latitud y sus Coordenadas Geográficas-WGS 84.
- Obteniéndose como peso final de las 25 muestras simples, se obtuvo un total de cinco muestras compuestas, provenientes de cada uno de los distritos seleccionados.

Figura N° 3: Área de muestreo



FUENTE: Elaboración propia.

### 3.1.2 Alcance de la investigación

El presente trabajo de investigación se realizó utilizando las muestras superficiales compuestas de suelos contaminados con cromo de los distritos de Hualahoyo, Sincos, Santa Rosa de Ocopa, Huayucachi y Molinos, considerando que es la capa superficial de los suelos, donde suceden las principales reacciones físico-químicas de los suelos, y se desarrollan el mayor volumen de raíces de las principales plantas cultivadas. El periodo de esta investigación fue el año 2016.

### **3.2.1.1 Tipo de investigación**

El tipo de investigación es aplicada, pues se aplican los principios de la ciencia del suelo en la caracterización de suelos contaminados con cromo, y medir e interpretar su variación.

Paéz (2013) menciona que la investigación aplicada es de naturaleza eminentemente práctica realizada con la intención de aplicar los conocimientos científicos a la solución o tratamiento de problemas específicos, correspondientes a diversos tipos de objetos.

### **3.1.1.2 Nivel de investigación**

El nivel del presente trabajo de investigación es correlacional, el cual consiste en describir las relaciones entre dos o más categorías, conceptos o variables en un momento determinado, ya sea en términos correlacionales, o en función de la relación causa-efecto. (Hernandez Sampieri, y otros, 2010).

Hernández et al. (2014) menciona que los estudios correlacionales analizan la relación entre dos variables, pero con frecuencia se ubican en el estudio de relaciones entre tres, cuatro o más variables. Los estudios correlacionales, al evaluar el grado de asociación entre dos o más variables, miden cada una de ellas (presuntamente relacionadas) y, después cuantifican y analizan la vinculación.

Paéz (2013) reporta que en la investigación correlacional se indica la existencia de algún tipo de asociación, nexo o correspondencia entre variables, no establece ninguna relación causal en el fenómeno estudiado. La magnitud de la relación existente se calcula mediante el coeficiente de correlación representado por "r".

Hernández et al. (2010), reporta que los estudios descriptivos buscan especificar las propiedades, las características y los perfiles de personas, grupos, comunidades, procesos, objetos o cualquier otros fenómeno que se someta a un análisis. Es decir, pretender medir o recoger información de manera independiente o conjunta sobre los conceptos o las variables a las que se refieren.

Paéz (2013) menciona que el objeto de la investigación descriptiva es conocer de manera precisa la magnitud de un problema o situación, identificar sus variables, jerarquizar problemas, señalar los lineamientos para la prueba de hipótesis y establecer elementos de juicio para estructurar estrategias operativas.

En esta investigación se trata de encontrar la relación o grado de asociación que existe entre las características físico-químicas de los suelos contaminados con cromo y el nivel de contenido de este elemento pesado en suelos de 5 distritos del Valle del Mantaro.

### 3.2 Diseño de la investigación

Las determinaciones físico-químicas de las muestras de suelo a obtener, para cada uno de los cinco distritos del Valle del Mantaro, responde al siguiente modelo:

$$\gamma_i = X_i + \varepsilon_i$$

$X_i$  = características físico-químicas del suelo

$\gamma_i$  = elementos contaminantes del suelo.

$\varepsilon_i$  = error de observación

### 3.3 Población y muestra

#### 3.3.1 Población

La **población** está constituida por los suelos agrícolas de los distritos de Molinos, Sincos, Santa Rosa de Ocopa, Hualahoyo y Huayucachi del Valle del Mantaro.

#### 3.3.2 Muestra

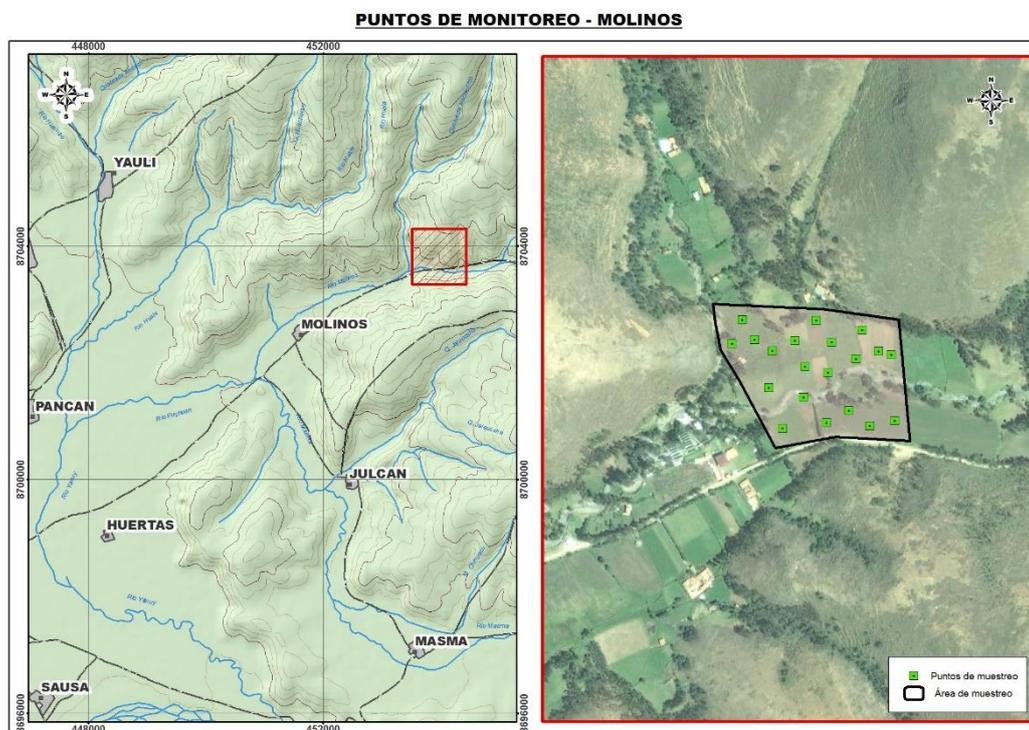
La muestra estuvo constituida por el volumen de suelo de la capa superficial, localizados en cada distrito del Valle del Mantaro: Molinos, Sincos, Santa Rosa de Ocopa, Hualahoyo y Huayucachi, según la georeferenciación de las parcelas que aparecen en la tabla N°10.

**Tabla N° 10:** Datos de georreferenciación del muestreo de suelos.

Coordenadas Geográficas-		Altitud (msnm)	Zona	Condición
WGS 84				
Este	Norte			
453406	8703749	3509	Molinos	Muestra superficial
457807	8686239	3311	Sincos	Muestra superficial
467690	8686639	3387	Santa Rosa de Ocopa	Muestra superficial
476094	8672308	3300	Hualahoyo	Muestra superficial
475684	8659077	3210	Huayucachi	Muestra superficial

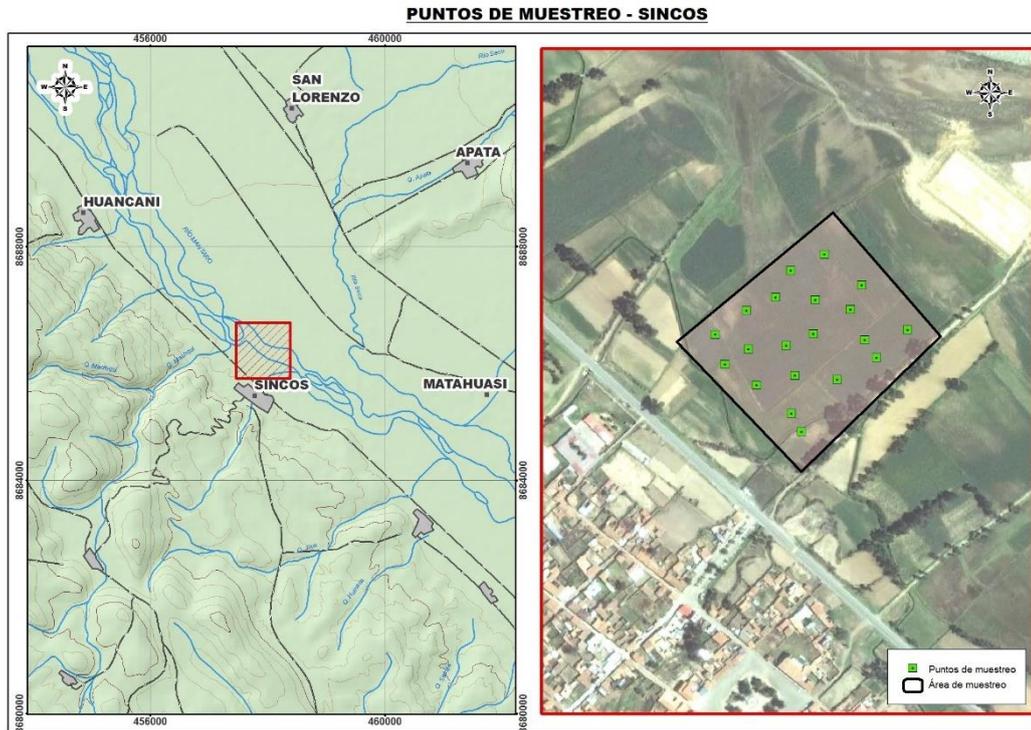
Fuente: Proyecto Mantaro Revive, 2007.

**Figura N° 4:** Punto de muestreo de Molinos, Jauja

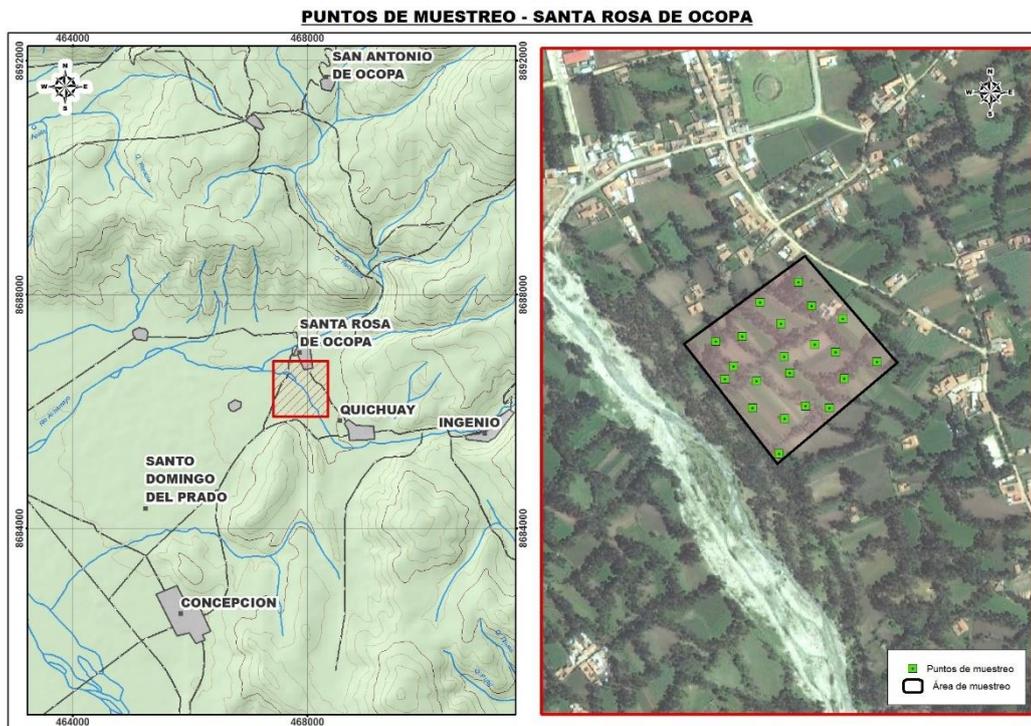


FUENTE: Elaboración propia.

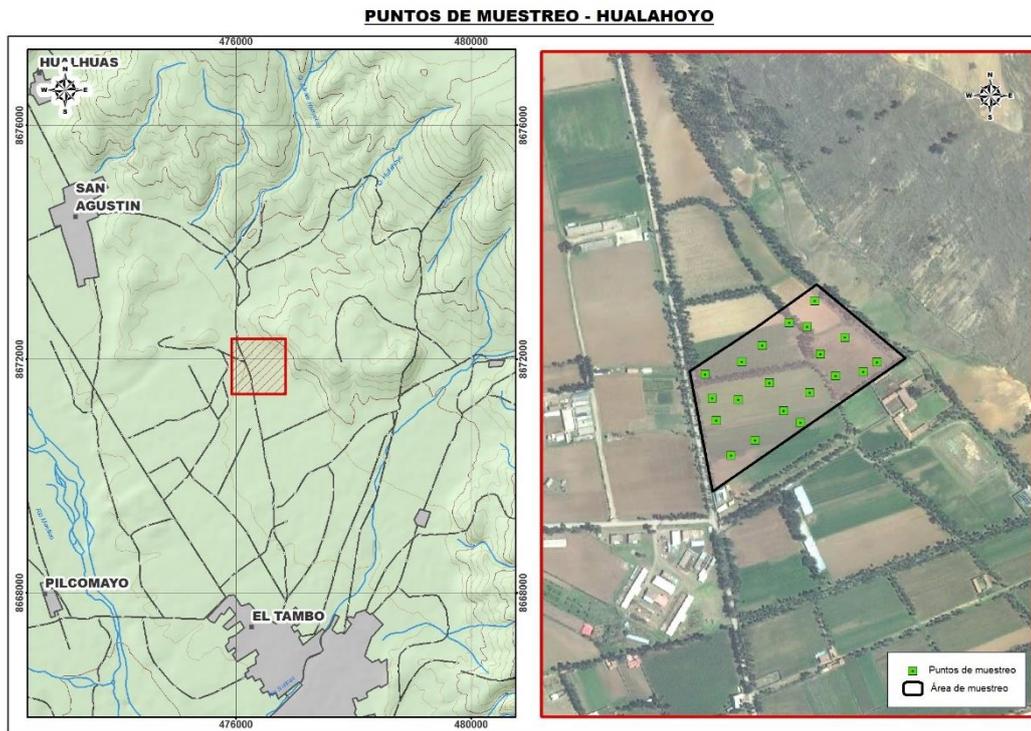
**Figura N° 5:** Punto de muestreo de Sincos, Jauja



**Figura N° 6:** Punto de muestreo de Santa Rosa de Ocopa, Concepción

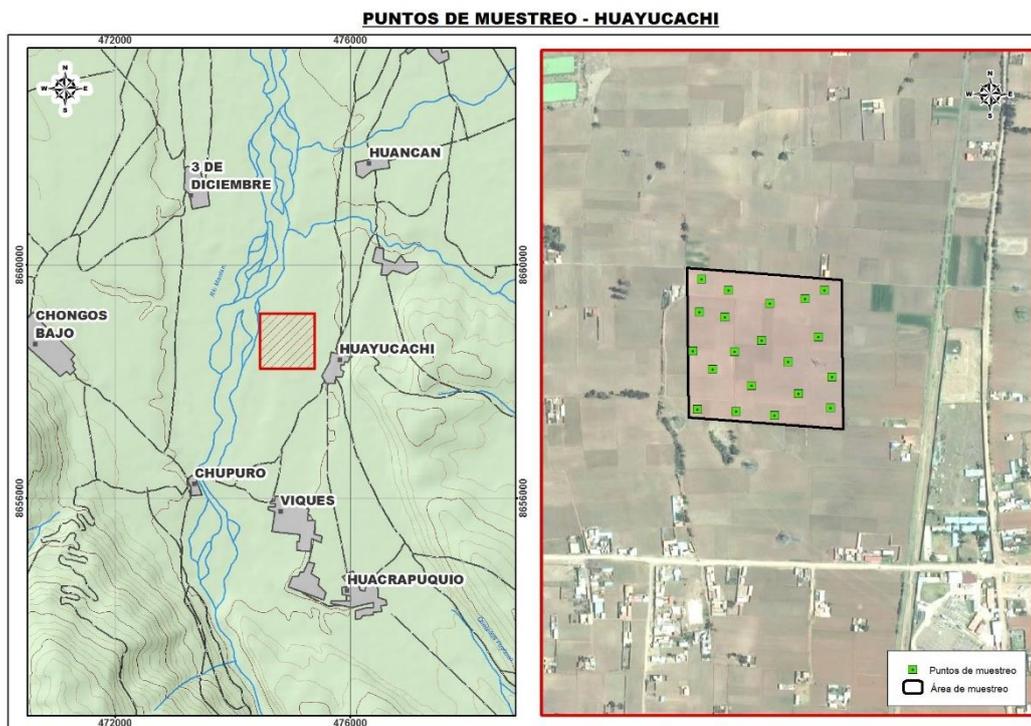


**Figura N° 7: Punto de muestreo de Hualahoyo**



FUENTE: Elaboración propia.

**Figura N° 8: Punto de muestreo de Huayucachi, Huancayo**



FUENTE: Elaboración propia.

### 3.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

#### a. Observación:

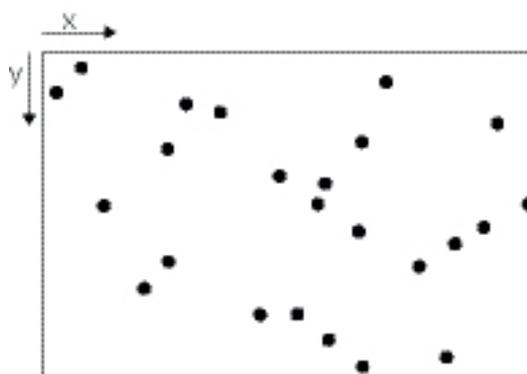
Es una técnica que consiste en observar atentamente el fenómeno, hecho o caso, tomar información y registrarla para su posterior análisis.

La observación es un elemento fundamental de todo proceso investigativo, el ella se apoya el investigador para obtener el mayor número de datos. Gran parte del acervo de conocimientos que constituye la ciencia ha sido lograda mediante la observación. (Oseda Gago, y otros, 2015)

#### b. Extracción de muestra

Este trabajo de investigación empleo la técnica de muestra aleatoria, ya que los puntos se eligieron al azar en el área de estudio, con el fin de obtener la concentración de Cromo en el suelo de las 05 localidades del Valle de Mantaro.

**Figura N° 9: Muestra Aleatoria**



FUENTE: (MINAM, 2014)

#### 3.4.1 Guía para el Muestreo de Suelos, 2014

Procedimiento para la toma de muestra:

##### A. Procedimiento para la toma de muestra de sedimentos de las 05 localidades del Valle del Mantaro.

- Se identificó el suelo contaminado con cromo de cada distrito, tomando como referencia los datos publicados por el Proyecto Mantaro Revive (2007), debidamente georeferenciados, obteniendo una muestra compuesta de aproximadamente un kilogramo (proveniente de 25 muestras simples).
- De la primera capa superior de suelo, utilizando una lampa, pico, manta para mezclar el suelo, bolsas plásticas y etiquetas.
- Se obtuvo un total de cinco muestras compuestas, provenientes de cada uno de los distritos seleccionados.

## B. Análisis de laboratorio

La muestra de suelo fue analizada en el Laboratorio de Análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

**Tabla N° 11:** Métodos de análisis físico-químico del suelo.

Parámetro	Método
Cromo total	EPA* 3060
Textura:	
- Arena (%)	
- Limo (%)	Bouyoucos
- Arcilla (%)	
- Clase textural	Triángulo textural
Carbonato de Calcio	Gasovolumétrico
Conductividad eléctrica (dS.m <sup>-1</sup> )	Electrométrico
pH	Electrométrico
Materia Orgánica	Walkley y Black
Fósforo disponible	Olsen modificado
Potasio disponible	Acetato de amonio
Cationes cambiabiles:	
- Calcio	
- Magnesio	Espectrometría de Absorción Atómica
- Sodio	
- Potasio	
Capacidad de Intercambio Catiónico	Acetato de amonio

Fuente: Laboratorio de Análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú

Donde:

\*EPA = *Environmental Protection Agency* (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos)

### 3.4.2 Análisis de cromo total en el suelo (EPA 3060)

**EPA 3060:** El método 3060 es un procedimiento de digestión alcalina para extraer cromo hexavalente [Cr (VI)] de formas solubles, adsorbidas y precipitadas de compuestos de cromo en suelos, lodos, sedimentos y materiales de desecho similares. Para cuantificar el Cr (VI) total en una matriz sólida, se deben cumplir tres criterios: (1) la solución de extracción debe solubilizar todas las formas de Cr (VI), (2) las condiciones de la extracción no deben inducir la reducción de Cr nativo (VI) a Cr (III), y (3) el método no debe causar la oxidación del Cr (III) nativo contenido en la muestra a Cr (VI). ( (Method3060, 1996)

#### **Procedimiento:**

- Las muestras de suelo se digirieron según método normalizado. Se conoce que la lixiviación por este método puede ser parcial o total, según la distribución y fortaleza de la asociación del elemento en las diferentes fases mineralógicas.
- Se pesó 1,0000 g de muestra seca, tamizada en malla de 2 mm y se trasvasó a un erlenmeyer de 100 mL, en el que se adicionaron 10 mL de HNO<sub>3</sub> (1: 1).
- Se calentó a reflujo por 15 min en placa eléctrica a 95 °C.
- A continuación, se añadieron dos o tres porciones de 5 mL de HNO<sub>3</sub>(c), para evitar la ocurrencia de pequeñas explosiones, según el contenido de materia orgánica de la muestra, hasta desaparición de humos pardos.
- El volumen de la disolución se mantuvo en 5 mL. Luego, se adicionaron 2 mL de H<sub>2</sub>O y 3 mL de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 30 %, y se mantuvo el calentamiento hasta reducir el volumen a 5 mL.
- Seguidamente, se realizaron cuatro adiciones sucesivas de 1 mL de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> al 30 %, mientras se calentaba.
- Por último, se agregaron 10 mL de HCl(c) y se calentó durante 15 min. Se filtró con papel de filtración rápida y recogió el filtrado directamente en volumétricos de 100 mL que se enrasaron con HCl al 10 %.
- Se hicieron cuatro réplicas de digestión por cada muestra, dos de ellas por día. Además, se preparó un blanco de digestión para cada día. Toda la cristalería se sumergió durante 48 h en una disolución de HNO<sub>3</sub> al 10 % y se lavó tres veces con agua bidestilada antes de ser usada. La absorbancia del cromo se midió en un Espectrómetro de Absorción Atómica. La intensidad de corriente de la lámpara de cátodo hueco se fijó en 7 mA. Se empleó la línea espectral de 357,6 nm y un ancho de banda de 0,2 nm. Se utilizó llama aire/acetileno, con el flujo de aire constante e igual a 5 L • min<sup>-1</sup> (EPA, 1982).

### 3.4.3 Análisis físico-químico del suelo

#### 3.4.3.1 Textura

**Método del Hidrómetro o de Bouyoucos:** Es un método para determinar el contenido de arcilla, limo y arena en suelos, sin separarlos. La muestra se dispersa en una máquina mecánica haciendo uso de un agente dispersante, la suspensión se vierte en un cilindro largo y dentro se coloca un hidrómetro de diseño especial. Éste, por el principio de Arquímedes, tenderá a sumergirse en mayor proporción cuando menos sea la densidad media de la suspensión. (L. Weaver).

#### **Procedimiento:**

Se utilizó el método del Hidrómetro o de Bouyoucos, para lo cual se pesó 40 g de TFSA (Tierra fina seca al aire) y se colocó en el vaso metálico de dispersión.

- Se agregó 100 ml de agua destilada y 100 ml de Hexametáfosfato de sodio.
- Se agregó agua destilada al vaso metálico de dispersión hasta las 1/3 partes de su capacidad y se agitó por 5 minutos.
- Se transfirió la muestra del vaso metálico de dispersión a la probeta de sedimentación de bouyoucos, lavando bien las partículas adheridas al vaso.
- Se llenó la probeta hasta la graduación de 1000 mL, con agua destilada.
- Se agitó la solución de la probeta de sedimentación con la ayuda de una varilla de madera de base circular con huecos, durante 1 minuto.
- Inmediatamente después se introdujo el hidrómetro y se hizo la lectura a los 40 segundos, registrando en el cuadro de datos.
- Se sacó el hidrómetro y se midió la temperatura de la suspensión.
- Se tomó la segunda lectura del hidrómetro y temperatura a las dos horas.
- Se calculó la cantidad de arena, limo y arcilla y se determinó la clase textural en base al triángulo americano (USDA) (Forsythe, 1980).

#### 3.4.3.2 Análisis de pH

Se utilizó el método electrométrico; a través de este método se puede determinar el pH en las soluciones transparentes y en las soluciones turbias, e incluso directamente en las suspensiones del suelo (Andrades Rodríguez, 2015).

Relación 1:1 (suelo:agua); para lo cual se pesó 10 g de suelo y se colocó en un vaso de precipitación de 100 ml, agregando 10 mL de agua destilada, se agitó por 5 minutos y se midió directamente el pH en la suspensión suelo, utilizando el potenciómetro, previamente calibrado (Thomas, 1996).

### **3.4.3.3 Carbonato de calcio**

Se empleó el método gasovolumétrico, para lo cual se pesó 5 g de muestra y se llevó a un frasco de 150 mL. Se midió 10 mL de HCl diluido en un cúbito de vidrio. Se introdujo el cúbito en el frasco de 150 cm<sup>3</sup> que llevaba la muestra de 5 g de suelo, cuidando que el ácido no derrame. Se tapó el frasco y se derramó el ácido del cubo sobre la tierra agitando el frasco, más o menos 1/2 minuto. Se determinó en el gasómetro el volumen de CO<sub>2</sub> liberado, midiendo el desplazamiento de la columna de agua por acción del CO<sub>2</sub>. Este volumen se multiplicó por el factor (f) para obtener el % de CaCO<sub>3</sub> (Loeppert and Suárez, 1986).

### **3.4.3.4 Conductividad eléctrica**

Para la determinación de la CE se utilizó el método conductimétrico. Para ello se formó una suspensión 1:1 suelo/agua. Se pesó 150 g de suelo y se añadió 150 mL de agua desionizada. Se agitó vigorosamente por una hora y se dejó reposar por 24 horas. Se filtró en una centrifuga de 4000 rpm por 20 minutos (90). Finalmente, se realizaron las mediciones de conductividad a la solución transparente. Los resultados obtenidos en este caso son convertidos de esta suspensión 1:1 a la del extracto de saturación usando un factor igual a dos (Rhoades, 1996)

### **3.4.3.5 Materia orgánica**

Se empleó el método de Walkley-Black (Nelson and Sommers, 1996), para lo cual se siguió el siguiente procedimiento:

- Se pesó 1 g de suelo pasado con una malla de 2 mm.
- Se colocó en un erlenmeyer de 500 ml de capacidad.
- Se agregó 10 mL de dicromato de potasio (K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>) 1N, agitando suavemente para dispersar el suelo en solución.
- Después, se agregó rápidamente 10 ml de ácido sulfúrico concentrado, directamente dentro de la suspensión, tratando que el suelo se mezcle en la suspensión, agitando suavemente el Erlenmeyer por un minuto.
- Se dejó reposar el Erlenmeyer por un periodo de 30 minutos.
- Simultáneamente se realizó un ensayo de valoración en blanco (sin suelo), de la misma forma.
- Se diluyó la solución a 200 ml con agua destilada y se filtró.

- Al filtrado, se agregó 3 gotas del indicador difenilamina, y se tituló la solución con sulfato ferroso heptahidratado ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), 0,5 M. Conforme se acercó el punto final de titulación, la solución tomó apariencia verdusca (por los iones cromo) y luego cambió a verde oscuro, se desplazó a un azul turbio a medida que avanzó la valoración. En el punto final este color cambió bruscamente a verde brillante, dando el viraje con una gota.
- Se calculó los resultados de acuerdo a la siguiente fórmula, usando el factor de corrección 1,30:

$$\text{Carbono Orgánico} \left( \frac{\text{g}}{\text{kg}} \right) = \frac{(\text{mL Blanco} - \text{mL Muestra})(M\text{Fe}^{+2})(0,003)(1000)}{\text{peso de la muestra}} \times 1,30$$

$$\text{Materia Orgánica} \left( \frac{\text{g}}{\text{kg}} \right) = \left[ \text{Carbono Orgánico} \left( \frac{\text{g}}{\text{kg}} \right) \right] [1,724]$$

Donde:

C = Carbono Orgánico

mL Muestra = Gasto de sulfato ferroso de la muestra

MI Blanco = Gasto de sulfato ferroso del blanco

$M\text{Fe}^{+2}$  = Molaridad del sulfato ferroso

0,003 = peso miliequivalente del carbono (12/4000)

1000 = convertir los resultados en base a 1000 g (1 kg de suelo)

1,30 = factor de recuperación del carbono (100/77)

1,724 = Factor de conversión del Carbono Orgánico a Materia Orgánica (100/58)

#### 3.4.3.6 Fósforo disponible

Se utilizó el método de Olsen modificado (Kuo, 1996), para lo cual se siguió el siguiente procedimiento:

- Se pesó 2 g de suelo (TFSA) y se colocó en un frasco de 100 mL.
- Se añadió igual cantidad de carbón lavado.
- Se agregó 20 mL de solución extractora de bicarbonato de sodio.
- Se agitó durante 30 minutos
- Se filtró usando un papel filtro Whatman N° 42

- Se tomó 3 ml del filtrado
- Se agregó 10 ml de la solución de trabajo.
- Se dejó en reposo 30 minutos para que desarrolle el color azul.
- Se hizo la lectura en el espectrofotómetro, usando una longitud de onda de 660 nm y se anotó el porcentaje de trasmittancia.
- Utilizando la curva de calibración, se calculó el contenido de P en la muestra.

#### **3.4.3.7 Potasio disponible**

Se utilizó el método del cobaltinitrito (Jackson, 1976), con el siguiente procedimiento:

- Del extracto de CIC, se tomó 50 ml y se sometió a desecación a 100°C hasta evaporación completa, luego se añadió 50 ml de H<sub>2</sub>O y unas gotas de HCl 15%.
- Se transfirió 1,5 ml de la solución a un tubo de ensayo.
- Se añadió 1,5 ml de agua destilada, y 0,5 ml del reactivo cobaltinitrito de sodio.
- Se agitó el compuesto constantemente para evitar precipitaciones y se dejó en reposo 1 hora.
- Se leyó la trasmittancia en el espectrofotómetro a 670 nm.
- Se realizó un blanco de referencia con agua destilada o desionizada.
- Se calculó el potasio utilizando una curva de calibración.

#### **3.4.3.8 Capacidad de intercambio catiónico y cationes cambiables**

Para la determinación de la capacidad de intercambio catiónico se utilizó el método del acetato de amonio descrito en la norma ASTM D2973-10e1.

- Para el análisis se colocó 5g de la muestra de suelo sobre un embudo con papel de filtro ligeramente 68 humedecido y se lavó con un exceso de 100 mL de solución de acetato de amonio 1N pH 7,0 con el objeto de remover los cationes cambiables y saturar el suelo con amonio.
- Se recibió el lavado para determinar los cationes intercambiables Ca, Mg, K y Na por fotometría de llama.
- El exceso de amonio presente en los poros del suelo se lavó con 25 mL de alcohol etílico.
- Luego, se lavó el suelo con 100 mL de KCl 1N con la finalidad de desplazar el amonio absorbido. Se tomó una alícuota de 10 mL del filtrado y se destiló en presencia de 3

mL de una base fuerte NaOH colectando el destilado en ácido bórico al 2% más indicador mixto.

- Finalmente fue titulado por  $H_2SO_4$  0,02N y calculado en términos de miliequivalentes por 100g de suelo o centimoles por kg de suelo.
- Este método de destilación es conocido como método de Kjeldahl (Sumner and Miller, 1996).

### 3.5 Tratamiento de datos

Los datos, fueron sistematizados, calificados e interpretados para caracterizar los suelos contaminados con cromo de cada uno de los distritos seleccionados.

Se comparan los datos de las 05 localidades del Valle del Mantaro con los resultados del Laboratorio de Análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

Asimismo, se evaluó la fertilidad de los suelos contaminados con Cromo, calificándolos según la Guía de Clasificación para Interpretación de Análisis de Suelo (Anexos).

El contenido de cromo fue comparado con los valores límites permisibles de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) de suelos de Canadá.

La información cuantitativa de los análisis de suelo, en sus diferentes propiedades físico-químicas, fueron correlacionados con el contenido de cromo para los cinco distritos seleccionados; para lo cual se planteó la siguiente hipótesis estadística:

**Ho:  $\rho = 0$**  No hay correlación

**Ha:  $\rho \neq 0$**  Existe correlación.

## CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Resultados del tratamiento y análisis de la información

#### 4.1.1. Análisis físico químico de los suelos en estudio

**Tabla N° 12:** Resultados del análisis físico-químico de los suelos en estudio.

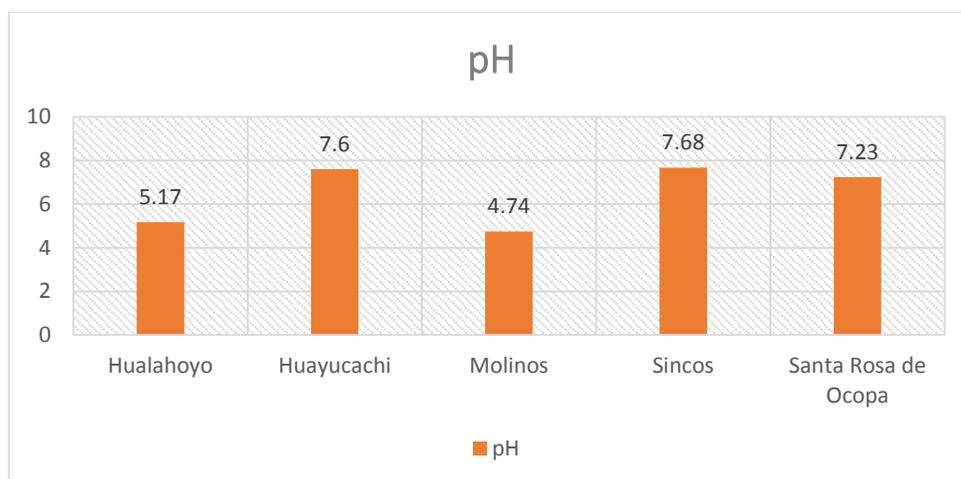
Parámetros	Tipos de suelos				
	Hualahoyo	Huayucachi	Molinos	Sincos	Santa Rosa de Ocopa
pH	5.17	7.60	4.74	7.68	7.23
Conductividad Eléctrica (dS/m)	0.53	1.08	0.33	0.93	0.81
CaCO <sub>3</sub> (%)	0.00	2.80	0.00	4.30	0.00
Materia Orgánica (%)	1.00	2.88	2.33	1.48	1.57
P disponible (ppm)	32.0	5.3	8.2	9.5	23.2
K disponible (ppm)	135	329	243	283	195
Arena (%)	45	45	43	37	31
Limo (%)	34	28	34	40	46
Arcilla (%)	21	27	23	23	23
Clase Textural	Franco	Franco Arcilloso	Franco	Franco	Franco
CIC (meq/100 g)	9.60	28.32	14.08	13.76	12.80
Ca <sup>2+</sup> cambiable (meq/100 g)	6.05	23.25	3.27	10.05	10.29
Mg <sup>2+</sup> cambiable (meq/100 g)	1.03	4.42	0.85	2.88	1.92
K <sup>+</sup> cambiable ((meq/100 g)	0.43	0.61	0.52	0.77	0.52
Na <sup>+</sup> Cambiable (meq/100 g)	0.04	0.04	0.03	0.05	0.08
Al <sup>3+</sup> +H <sup>+</sup> cambiables (meq/100 g)	0.40	0.00	1.10	0.00	0.00
Saturación de bases (%)	79	100	33	100	100
Acidez intercambiable (%)	4.17	0.00	7.81	0.00	0.00

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes. UNALM, Lima.

#### 4.1.1.1 El pH

El rango de pH de los suelos en estudio, tiene valores entre 4.74 (muy fuertemente ácido) en la localidad de Molinos a 7.68 (Ligeramente alcalino) en la localidad de Sincos. El suelo de la localidad de Hualahoyo tiene un pH fuertemente ácido (pH = 5.1 a 5.5), el suelo de Huayucachi tiene un pH ligeramente alcalino (pH = 7.4 a 7.8), y el suelo de Santa Rosa de Ocopa tiene un pH neutro (pH = 6.6 a 7.3). Estos valores muestran que los suelos de Molinos y Hualahoyo están en el rango de los suelos ácidos, el suelo de Santa Rosa de Ocopa está en el rango de pH neutro y los suelos de Molinos y Huayucachi tienen un rango de pH alcalino. Los suelos de pH ácido favorecen la solubilidad del cromo, mientras que los suelos de pH alcalino muestran menor solubilidad del cromo. Como lo explican Bequer et. al, (2003), la acidificación del suelo puede incrementar la solubilidad del cromo.

**Figura N° 10:** Resultados del pH de las 05 localidades del Valle del Mantaro.



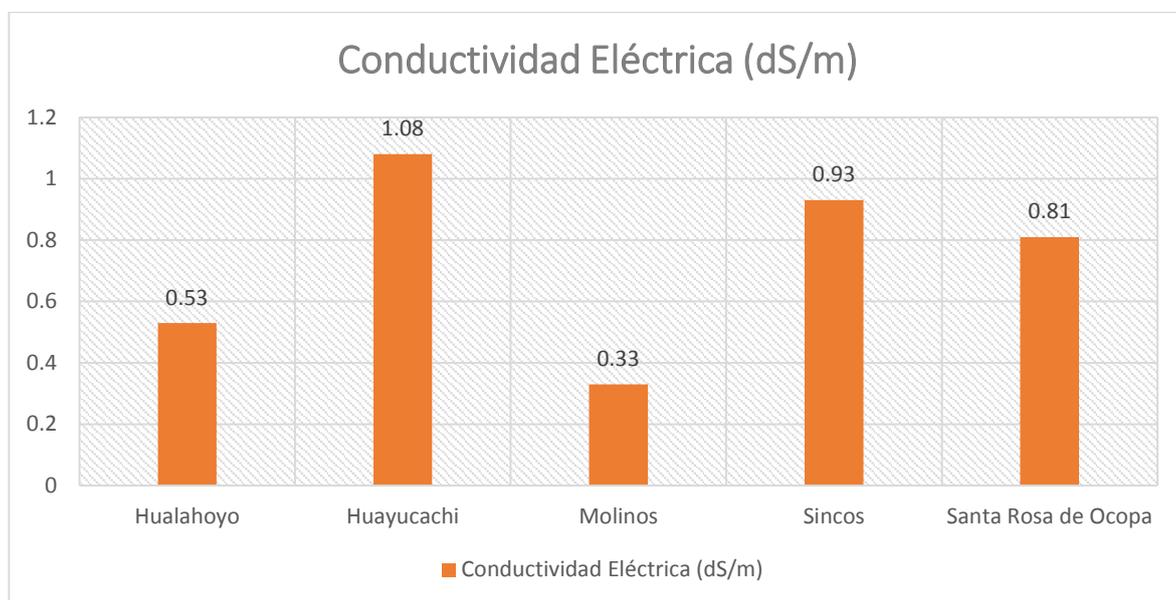
Fuente: Elaboración propia

#### 4.1.1.2 La conductividad eléctrica (CE)

La conductividad eléctrica, que tiene relación directa con la concentración de sales solubles en el suelo, o salinidad, reportó valores bajos en los suelos evaluados de Hualahoyo, Huayucachi, Molinos, Sincos y Santa Rosa de Ocopa (CE = 0.33 a 1.08 dS/m). La CE en lo suelo evaluados fue menor de 4 dS/m, siendo calificados como libres a muy ligeramente afectados por exceso de sales y sodio. Esto se debe a que la precipitación pluvial promedio anual del Valle del Mantaro (aproximadamente entre 600 a 700 mm) es suficiente para solubilizar y lavar las sales solubles, evitando su acumulación. La concentración de sales solubles en el suelo depende principalmente de los factores: (i) litológicos, (ii) geomorfológicos, (iii) climáticos, (iv) hidrológicos, y (v) antrópicos; por lo tanto

estos factores no tienen incidencia en incrementar la concentración de sales solubles en los suelos del Valle del Mantaro, como lo afirman Porta et al., (2003).

**Figura N° 11:** Resultados de la Conductividad eléctrica (dS/m) de las 05 localidades del Valle del Mantaro.

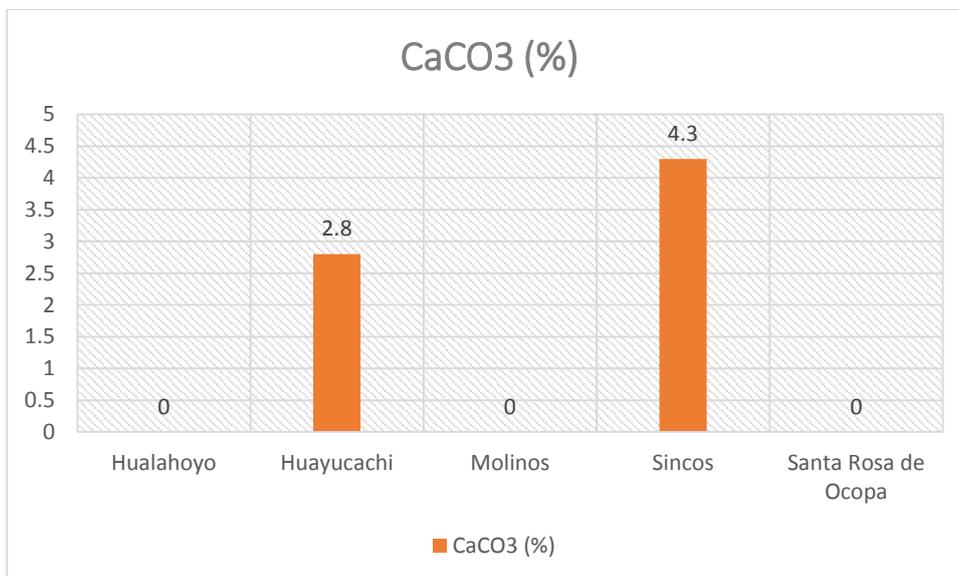


Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.1.3 El contenido de Carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>)

El contenido de carbonato de calcio en los suelo evaluados está ausente en Hualahoyo, Molinos y Santa Rosa de Ocopa (CaCO<sub>3</sub> = 0%), debido al pH ácido a neutro (pH = 4.74 a 7.23); en cambio, en los suelos de Huayucachi y Sincos lo contenido reportados de carbonato de calcio son medios (CaCO<sub>3</sub> = 1 a 5%), esto debido a la naturaleza calcárea de esto suelos (efecto del material parental), que influye en el incremento del pH, y puede ocasionar la precipitación de cromo, como lo reportan Gonnelli y Renella (2013).

**Figura N° 12:** Resultados del Carbonato de Calcio (%) de las 05 localidades del Valle del Mantaro.



Fuente: Elaboración propia.

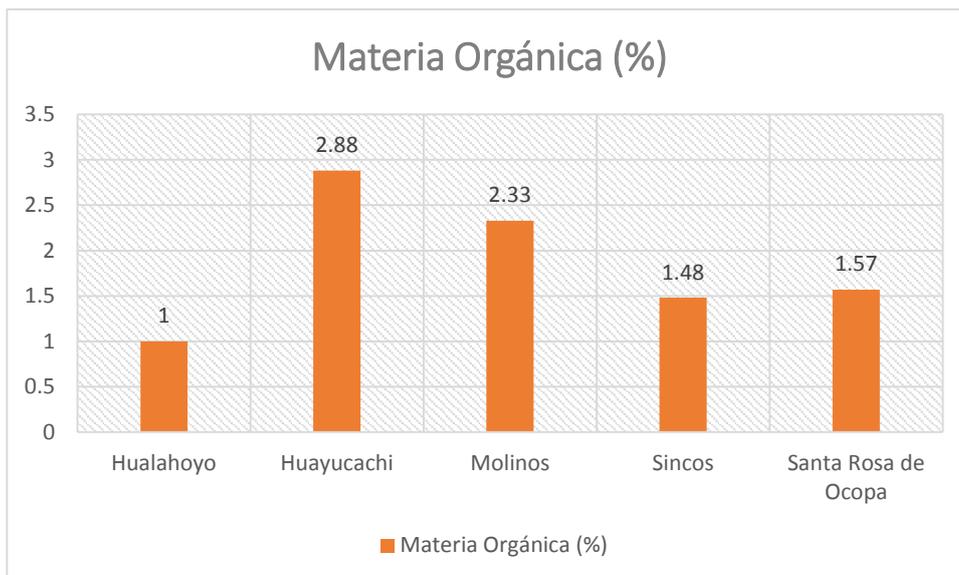
Además la presencia de carbonato de calcio en el suelo favorece la transformación de la materia orgánica del suelo (mayor descomposición), debido a que el  $\text{CaCO}_3$  influye en el aumento del pH del suelo y se favorece la actividad microbial del suelo, responsable de la transformación de la materia orgánica del suelo. Esto está corroborado por lo afirmado por Weil and Brady (2016).

Otra influencia que ejerce la presencia de carbonato de calcio es la disminución del P disponible, debido a que lo precipita, disminuyendo su disponibilidad en el suelo.

#### 4.1.1.4 Contenido de materia orgánica (MO) del suelo

El contenido de materia orgánica en los suelos del Valle del Mantaro contaminados con cromo, tienen valores bajos ( $\text{MO} = < 2\%$ ) a medios ( $\text{MO} = 2$  a  $4\%$ ). Los suelos de Hualahoyo, Sincos y Santa Rosa de Ocopa presentan contenidos bajos de materia orgánica, esto afecta negativamente la calidad del suelo, su fertilidad y las diversas propiedades físicas, químicas y biológicas, donde influye la materia orgánica del suelo. Los suelos de Huayucachi y Molinos presentan contenidos medios de materia orgánica del suelo y requieren de adiciones de fuentes orgánicas naturales (estiércoles, residuos de vegetación) o preparadas (humus de lombriz, compost, bocashi, entre otros), para mejorar las propiedades del suelo.

**Figura N° 13:** Resultados de la Materia orgánica de las 05 localidades del Valle del Mantaro.



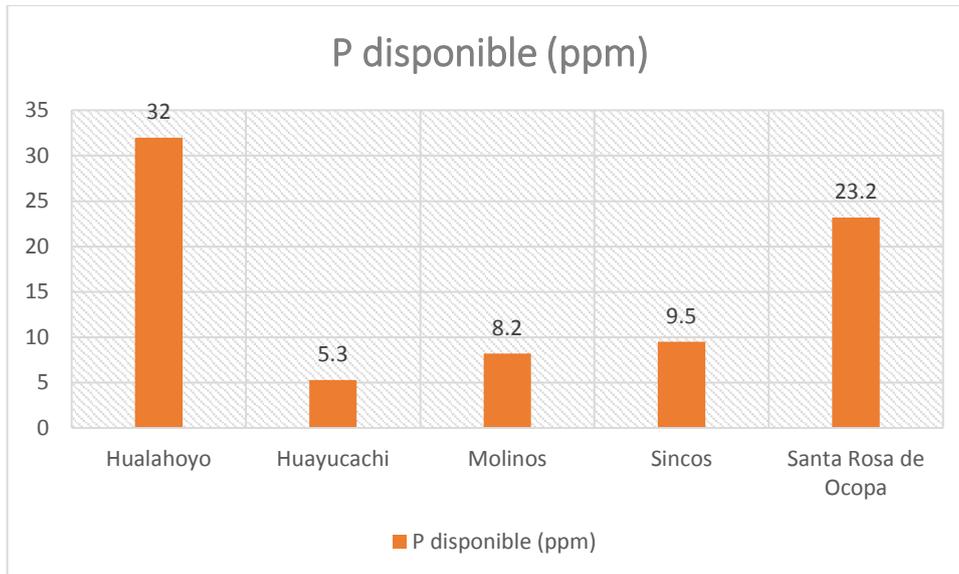
Fuente: Elaboración propia

Los factores que determinan el contenido de materia orgánica del suelo son varios entre ellos se encuentran, la vegetación, el clima, la textura del suelo, el drenaje y la labranza. En las condiciones del Valle del Mantaro, la mayor intensidad de labranza del suelo, que favorece la oxidación o descomposición de la materia orgánica, disminuye su contenido en el suelo. La vegetación que queda como residuos de cosecha, si es quemada, también reduce el contenido de materia orgánica en los suelos del Valle del Mantaro. Estos factores mencionados, y su efecto en el contenido de materia orgánica, fueron corroborados por lo afirmado por Plaster (2014).

#### 4.1.1.5 Fósforo disponible

El contenido de fósforo disponible en los suelos contaminados con cromo del Valle del Mantaro presenta valores bajos (P disponible = 5.3 ppm, Huayucachi), medios (P disponible = 8.2 ppm, Molinos; P disponible = 9.5 ppm, Sincos), y altos (P disponible = 32 ppm, Hualahoyo; P disponible = 23.2 ppm, Santa Rosa de Ocopa). Uno de los factores que influyó en la baja disponibilidad de fósforo es el pH del suelo, siendo máxima la disponibilidad de P a pH cercano a la neutralidad (pH = 6.5 a 7.5), como en el caso de Santa Rosa de Ocopa (pH = 7.23) donde el valor de P disponible es alto y cuando el suelo es alcalino, el P precipita como fosfato de calcio, como es el caso del suelo de Huayucachi (pH = 7.60) donde el P disponible es bajo. Esto es corroborado por lo afirmado por Havlin et al. (2014). Los suelos que tienen alto contenido de P a pesar de tener pH ácido, se puede deber a la continua aplicación de P al suelo a través de los fertilizantes, que incrementa su disponibilidad.

**Figura N° 14:** Resultados del Fosforo disponible (ppm) de las 05 localidades del Valle del Mantaro.

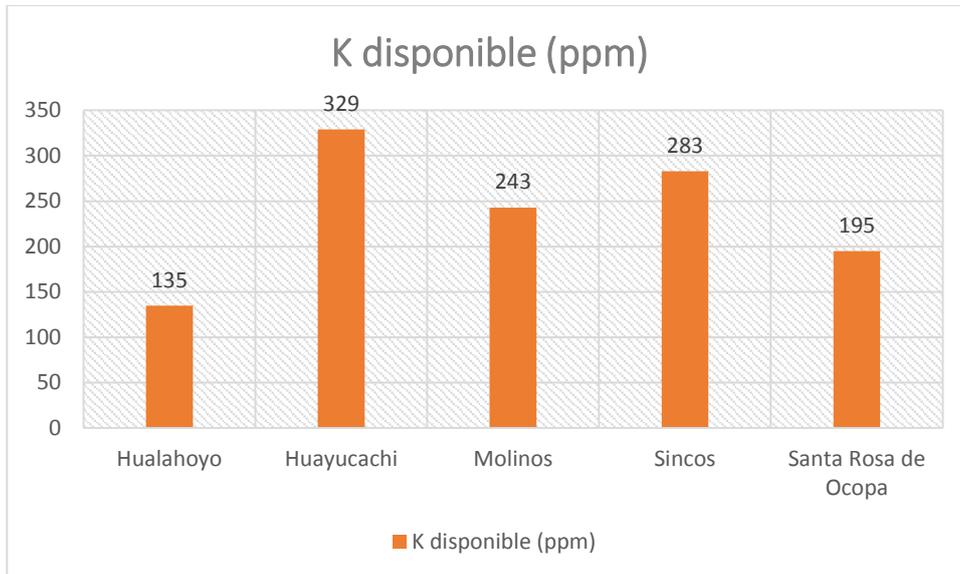


Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.1.6 Potasio disponible

El contenido de potasio disponible en los suelos contaminados con cromo del Valle del Mantaro presenta valores altos en Huayucachi (K disponible = 329 ppm), Molinos (K disponible = 243 ppm) y Sincos (283 ppm), mientras que se presentaron valores medios en Hualahoyo (K disponible = 135 ppm), y Santa Rosa de Ocopa (K disponible = 185 ppm). Los valores altos se deben a la alta tasa de liberación de potasio de los minerales primarios, micas y feldspatos, que son abundantes en los suelos evaluados; esto se corrobora por lo afirmado por Havlin et al., (2014). Los suelos con contenido medio, han ido agotando el potasio, posiblemente debido a que no hubo reposición del K después de cada cosecha. Es necesario agregar K a los suelos que presentan contenido medio para lograr niveles altos y no perjudicar el crecimiento de las plantas.

**Figura N° 15:** Resultados del Potasio disponible (ppm) de las 05 localidades del Valle del Mantaro.

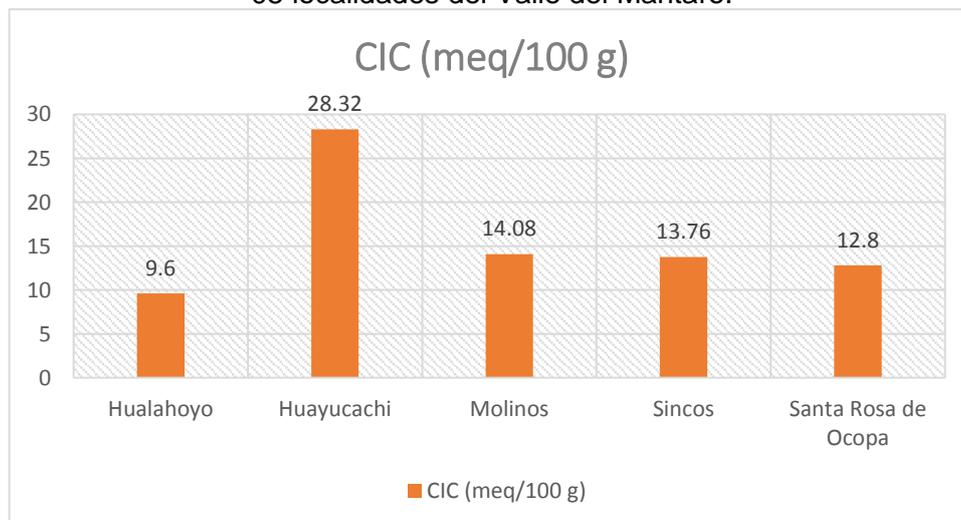


Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.1.7 La capacidad de intercambio catiónico (CIC)

El contenido de potasio disponible en los suelos contaminados con cromo del Valle del Mantaro, es bastante variable, siendo para el caso de Hualahoyo, un contenido bajo (CIC = 9.60 meq/100 g); en Molinos el contenido es moderadamente alta (CIC = 14.08 meq/100 g), así como en Sincos (CIC = 13.76 meq/100 g) y Santa Rosa de Ocopa (CIC = 12.809 meq/100 g); en cambio en Huayucachi la CIC del suelo es alta (CIC = 28.32 meq/100 g).

**Figura N° 16:** Resultados de la Capacidad de Intercambio Catiónico (meq/100 g) de las 05 localidades del Valle del Mantaro.



Fuente: Elaboración propia.

Los factores que determinan la CIC del suelo son la naturaleza y cantidad de los minerales de arcilla y la materia orgánica del suelo; siendo los suelos de Santa Rosa de Ocopa, Sincos y Molinos, de un contenido medio, debido al contenido de la fracción arcilla (Arcilla = 23%) y dentro de esta fracción arcilla a las arcillas del tipo 2:1, por ser suelos en desarrollo; en estos suelos el contenido de materia orgánica es medio a bajo, y tendría una menor influencia en estos suelos. En cambio, en el suelo de Huayucachi, con alta CIC, esto sería debido al mayor contenido de arcilla (Arcilla = 27%) y el contenido medio de materia orgánica. El suelo de Hualahoyo presentó una baja CIC debido posiblemente al bajo contenido de materia orgánica y menor contenido de arcilla (Arcilla = 21%) respecto a los otros suelos evaluados. Estos resultados se sustentan en lo afirmado por Havlin et al. (2014).

Otro factor importante en la CIC del suelo es el intercambio de iones, pues permite que los iones de la solución suelo, donde se incluye al Cromo, se adsorban a la superficie de los sólidos del suelo (arcilla y materia orgánica), y de esa manera habría una relación inversa entre la cantidad de cromo total y la CIC del suelo, pues los iones adsorbidos al suelo disminuyen su movilidad, y dependiendo de las fuerzas de retención (físicas o químicas), se van liberando lentamente hacia la solución suelo. Estos resultados encontrados en los suelos del valle del Mantaro, están sustentados en lo afirmado por Fassbender y Bornemisza, 1987), quienes afirman que muchos de los componentes de la fase sólida del suelo retienen moléculas o iones, en forma más o menos permanente, fenómeno conocido como adsorción. Algunos de estos procesos son reversibles y los diferentes iones se retienen en cantidades aproximadamente equivalentes.

#### **4.1.1.8 La textura del suelo**

La proporción de partículas del suelo, arena, limo y arcilla, que determina la textura del suelo, en los suelos contaminados por cromo del valle del Mantaro, tiene en los suelos de Molinos, Sincos, Santa Rosa de Ocopa y Hualahoyo una calificación de textura media (Textura = franco), mientras que en el suelo de Huayucachi un calificativo de moderadamente fina (textura = franco arcilloso). En los suelos de Hualahoyo, Huayucachi y Molinos, la predominancia es de la fracción arena, seguido de limo y finalmente arcilla, esto le da al suelo poca reactividad o menor capacidad de retener iones como el cromo, mientras que en los suelos de Sincos y Santa Rosa de Ocopa, predomina el limo, seguido de la arena y finalmente la arcilla. La fracción limo tiene también poca reactividad físico-química, debido a la naturaleza mineralógica, que es mayormente cuarzo, un mineral primario que no tiene cargas eléctricas, que podrían servir para retener o adsorber iones desde la solución suelo como el cromo. Esto concuerda con lo afirmado por Weil and Brady

(2016), quienes atribuyen la mayor adsorción de iones o moléculas a la fracción arcilla, por su tamaño pequeño y su gran área superficial específica.

**Tabla N° 13:** Resultados de la Clase textural de las 05 localidades del Valle del Mantaro.

Parámetros	Tipos de suelos				
	Hualahoyo	Huayucachi	Molinos	Sincos	Santa Rosa de Ocopa
Clase Textural	Franco	Franco Arcilloso	Franco	Franco	Franco

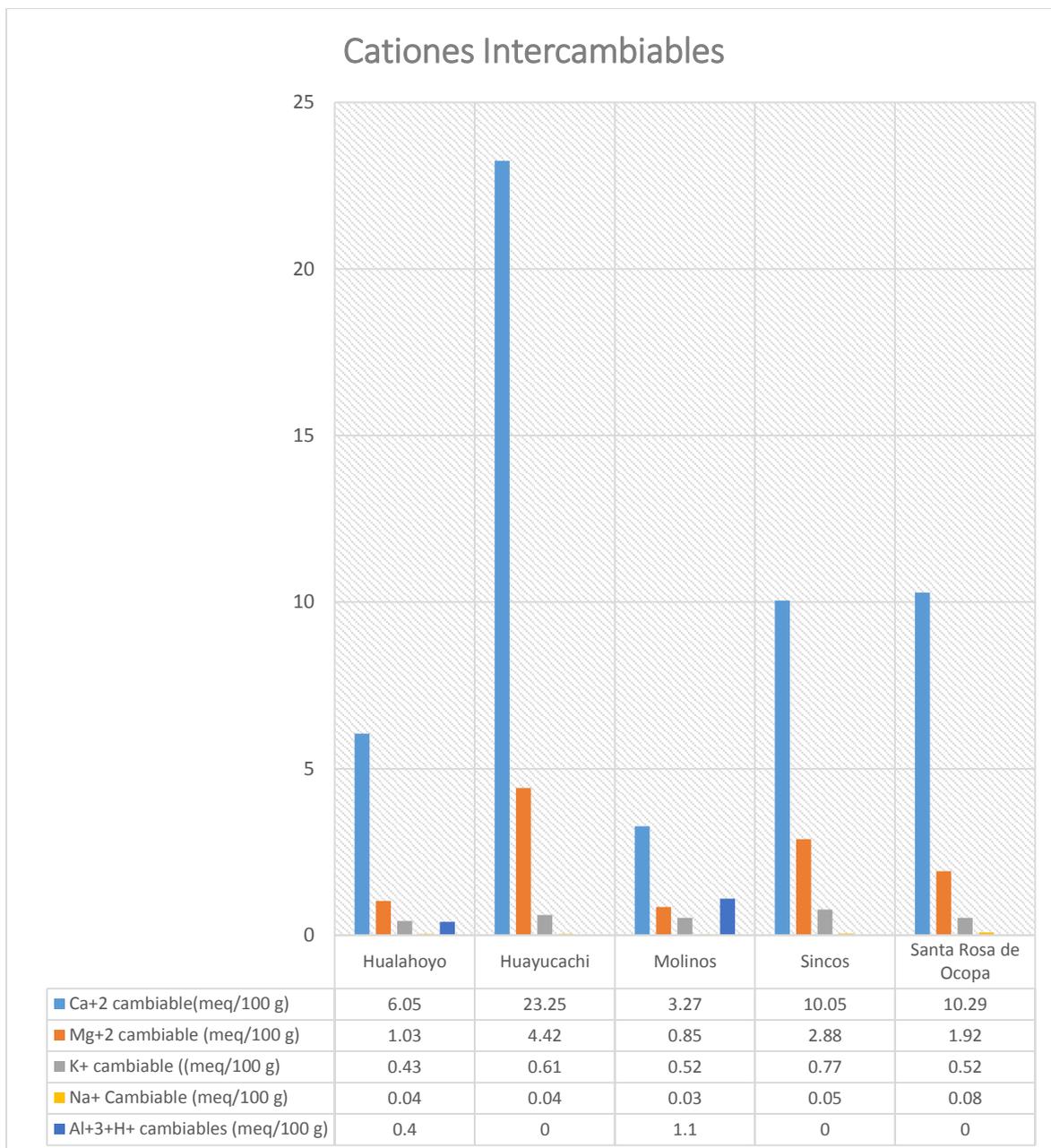
Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes. UNALM, Lima.

#### 4.1.1.9 Los cationes intercambiables

Los cationes calcio, magnesio, potasio, sodio, hidrógeno y aluminio, constituyen los cationes intercambiables entre la fase sólida del suelo y la solución suelo. En todos los suelos estudiados predomina el calcio dentro del complejo de cambio (arcilla y materia orgánica), seguido del magnesio, potasio, sodio y finalmente el hidrógeno y aluminio, excepto en los suelos de Hualahoyo y Molinos (ácidos), donde el aluminio e hidrógeno le siguen en orden de abundancia al calcio y magnesio, y después se encuentran el potasio y sodio.

La presencia de cationes intercambiables en la fase sólida del suelo, se debe a la capacidad de intercambio de cationes del suelo, que determina su mayor o menor cantidad, influenciado por el pH, que influye en el tipo de catión predominante. Esto concuerda por lo manifestado por Havlin et al., (2014), quienes afirman que los cationes son adsorbidos a la capacidad de intercambio de cationes con diferente fuerza de adsorción, influenciando la facilidad con la cual los cationes pueden ser reemplazados o intercambiados con otros cationes.

**Figura N° 17:** Resultados de la Capacidad de Intercambio Catiónica de las 05 localidades del Valle del Mantaro.



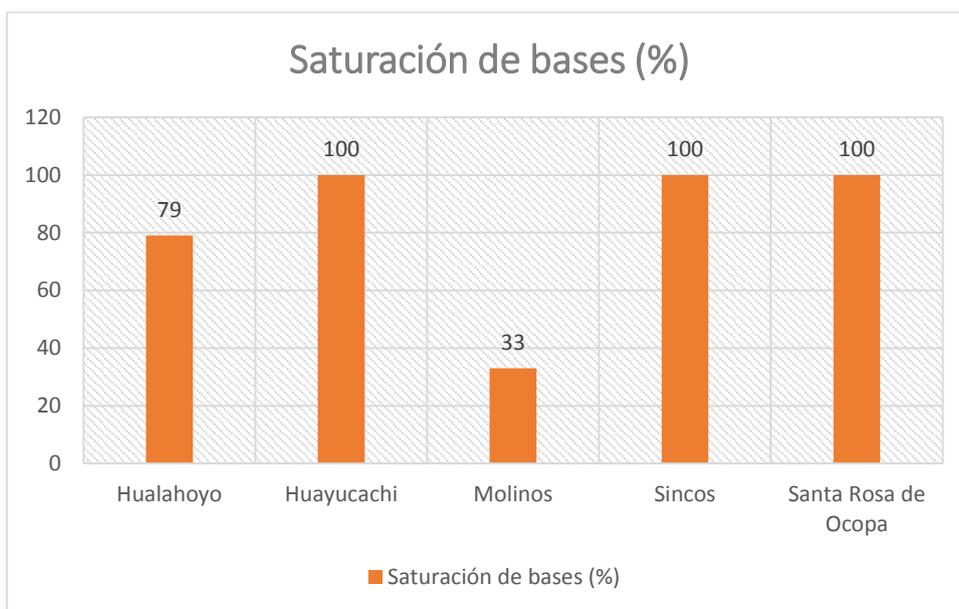
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.1.10 La saturación de bases

En los suelos estudiados del valle del Mantaro, la saturación de bases tiene valores altos, siendo los suelos de Sincos, Santa Rosa de Ocopa y Huayucachi, los que presentaron 100% de saturación de bases, debido al pH alcalino que presentaron, en cambio el suelo de Hualahoyo tuvo un saturación de bases de 79% y el suelo de Molinos, una saturación de bases de 33%, debido al pH ácido que presentaron. La relación entre el

pH y la saturación de bases es directa, es decir a mayor pH se tiene mayor saturación de bases, en cambio a menor pH se tiene menor saturación de bases. Esto concuerda con lo que sostienen Havlin et al (2016), quienes afirman que la saturación de bases se incrementa con el pH el suelo, con ligeras variaciones entre diferentes suelos.

**Figura N° 18:** Resultados de la Saturación de bases (%) de las 05 localidades del Valle del Mantaro.



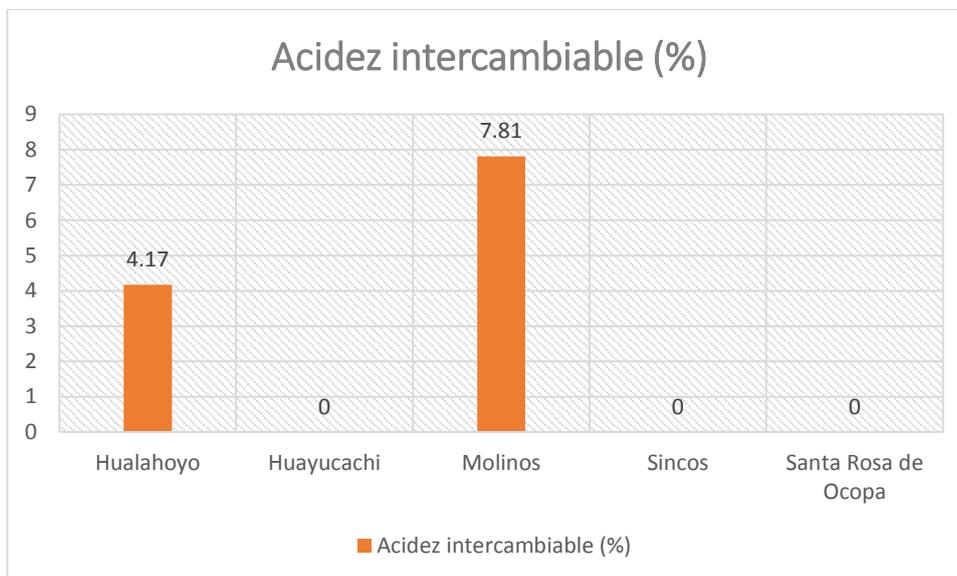
Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.1.11 La acidez intercambiable

La acidez intercambiable de un suelo está determinada por la proporción de los iones hidrógeno y aluminio de la capacidad de intercambio de cationes y está en relación directa con el pH del suelo. Los suelos de Hualahoyo y Molinos presentan acidez intercambiable en niveles bajos, debido al carácter ácido; en cambio los suelos de Sincos, Santa Rosa de Ocopa y Huayucachi no tienen acidez intercambiable debido a su pH alcalino. Esta fracción de la acidez del suelo tiene mayor proporción que la acidez medida por el pH del suelo (acidez activa), y determina las necesidades de encalado del suelo para elevar el pH del suelo y la disponibilidad de nutrientes, como lo menciona Tan (2011).

Los suelos del Valle del Mantaro no tendrían mayor necesidad de encalado, debido a la baja proporción de la acidez intercambiable que se ha observado.

**Figura N° 19:** Resultados de la acidez intercambiable (%) de las 05 localidades del Valle del Mantaro.



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.2 Contenido de cromo total en los suelos seleccionados del Valle del Mantaro

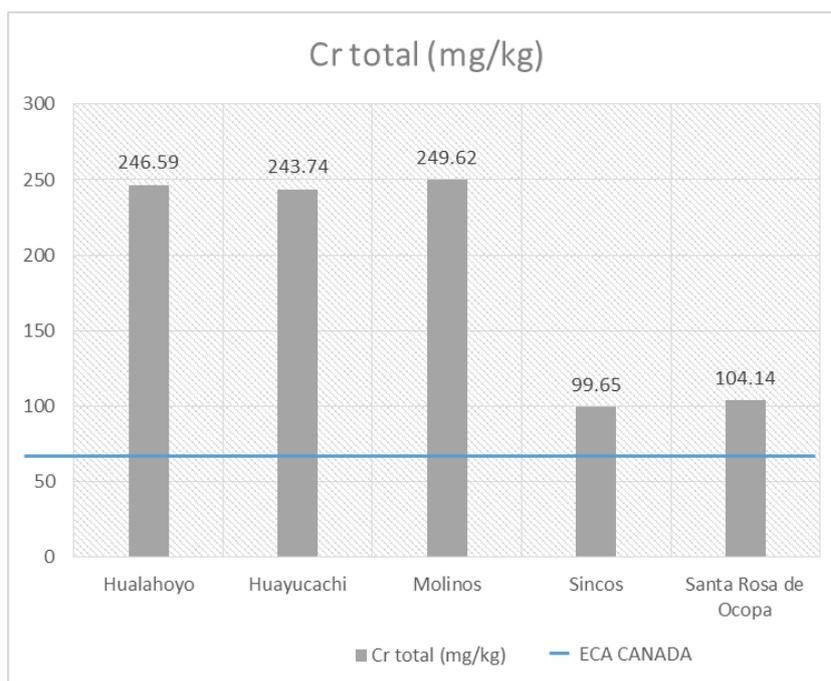
**Tabla N° 14:** Resultados del análisis de cromo total en el suelo.

Parámetros	Tipos de suelos				
	Hualahoyo	Huayucachi	Molinos	Sincos	Santa Rosa de Ocopa
Cr total (mg/kg)	246.59	243.74	249.62	99.65	104.14

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes. UNALM, Lima.

El contenido de cromo total en los suelos estudiados del Valle del Mantaro, sobrepasa el Estándar de Calidad de Ambiental (ECA) de suelos de Canadá, cuyo valor es 64 mg/kg (Proyecto Mantaro Revive, 2007). Los valores encontrados en Hualahoyo, Huayucachi y Molinos superan en más de 3.8 veces el ECA-Canadá, en cambio los suelos de Sincos y Santa Rosa de Ocopa superan en más de 1.5 veces el ECA-Canadá.

**Figura N° 20:** Resultados del análisis de cromo total en el suelo.



Fuente: Elaboración propia.

Esto datos confirman el nivel de contaminación de los suelos estudiados del Valle del Mantaro, que se constituyen en una fuente de contaminación para el agua, especialmente.

#### 4.1.3 Nivel de fertilidad de los suelos

Considerando la Guía de Clasificación de los parámetros edáficos (Reglamento de Clasificación de Tierras por su Capacidad de Uso Mayor, 2009), que se presenta en anexos, la fertilidad de los suelos contaminados por cromo en el Valle del Mantaro, tienen un nivel bajo, excepto el suelo de Molinos que presenta un nivel medio de fertilidad del suelo.

De los tres componentes evaluados para determinar el nivel de fertilidad del suelo (materia orgánica, fósforo disponible y potasio disponible), los suelos de Hualahoyo, Sincos y Santa Rosa de Ocopa, deben su baja fertilidad al bajo contenido de materia orgánica (MO < 2%), El suelo de Huayucachi tienen baja fertilidad debido al bajo contenido de fósforo (P disponible < 7 ppm); en cambio el suelo de Molinos tiene un nivel de fertilidad media, debido al contenido de medio de fósforo (P disponible = 7 – 14 ppm) y materia orgánica (MO = 2 – 4%), pues el nivel de potasio disponible es alto (K disponible > 240 ppm).

Estos resultados del nivel de fertilidad del suelo requieren ser incrementados a niveles altos, agregando al suelo fuentes de materia orgánica, principalmente, y fósforo; el papel de la materia orgánica en mejorar las propiedades del suelo se resalta porque también permite a estos suelos contaminados con cromo actuar como un filtro para inmovilizar este metal pesado, inmovilizarlo y disminuir su potencial contaminante, mediante el gran poder adsorbente que tiene el humus del suelo, que es la fracción descompuesta de la materia orgánica del suelo. Esto concuerda con lo afirmado por Weil and Brady (2016).

**Tabla N° 15:** Calificación del nivel de fertilidad de los suelos contaminados con cromo, del Valle del Mantaro.

Suelo	Materia orgánica (%)		Fósforo disponible (ppm)		Potasio disponible (ppm)		Nivel de fertilidad del suelo
	Contenido	Nivel	Contenido	Nivel	Contenido	Nivel	
Molinos	2.33	<b>Medio</b>	8.2	<b>Medio</b>	243	Alto	<b>Medio</b>
Hualahoyo	1.00	<b>Bajo</b>	32.0	<b>Alto</b>	135	Medio	<b>Bajo</b>
Sincos	1.48	<b>Bajo</b>	9.5	<b>Medio</b>	283	Alto	<b>Bajo</b>
Santa Rosa Ocopa	1.57	<b>Bajo</b>	23.2	<b>Alto</b>	195	Medio	<b>Bajo</b>
Huayucachi	2.88	<b>Medio</b>	5.3	<b>Bajo</b>	329	Alto	<b>Bajo</b>

Fuente: Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas, Aguas y Fertilizantes. UNALM, Lima.

#### 4.1.4 Correlación del contenido total de cromo y propiedades físico-químicas

##### Regresión múltiple:

Permite estudiar la relación funcional entre una variable respuesta Y (variable dependiente) y una o más variables regresoras X (variables independientes o predictoras). El primer caso se conoce como Regresión Lineal Simple y el segundo como Regresión Lineal Múltiple (Draper y Smith, 1998).

Con frecuencia ocurre que una variable Y, que nos interesa, no depende solo de una variable X, sino además de otras variables X; en este caso se estudia mediante la regresión múltiple, siempre bajo la condición que las relaciones sean lineales entre las variables.

### Modelo Aditivo Lineal

$$Y_i = \alpha + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_k X_{ki} + \varepsilon_i \quad i = 1, 2, 3 \dots N$$

Donde:

- $Y_i$  = i-ésima observación de la variable dependiente Y
- $X_{1i}, X_{2i} + \dots + X_{ki}$  = i-ésimo valor de las variables regresoras  $X_1, X_2, \dots, X_k$  o independientes
- $\beta_0$  = parámetro desconocido que representa la ordenada al origen de la recta (indica el valor esperado de Y cuando  $x_1 = 0, x_2 = 0, \dots, x_k = 0$ )
- $\beta_1, \dots, \beta_k$  = parámetros desconocidos que representan las tasas de cambio en Y frente al cambio unitario de  $X_1, X_2, \dots, X_k$ , respectivamente.
- $\varepsilon_i$  = término de error aleatorio

Del análisis de regresión realizado entre el contenido de cromo total (Y) en los suelos en estudio y las propiedades físico-químicas del suelo ( $X_i$ ), solo se ha encontrado significancia estadística ( $p < 0.05$ ) entre la relación del contenido de cromo total del suelo (Y) y el pH ( $X_1$ ), contenido de materia orgánica ( $X_2$ ) y capacidad de intercambio catiónico ( $X_3$ ) (Tabla N° 12). En las demás regresiones simples y múltiples no se ha encontrado significación estadística.

**Tabla N° 16:** Coeficientes de regresión múltiple y estadísticos entre contenido total de cromo y pH, contenido de materia orgánica y Capacidad de Intercambio Catiónico.

Coeficiente	Valor estimado	Error Estándar	LI (95%)	LS (95%)	T	Valor-P
Constante	537.13	10.21	407.41	666.85	52.61	0.0121
MO (%)	-80.32	5.37	-148.50	-12.14	-14.97	0.0425
CIC(meq/100g)	17.38	0.62	9.45	25.31	27.83	0.0229
pH	-72.90	1.59	-93.17	-52.64	-45.71	0.0139

Fuente: Elaboración propia

**Tabla N° 17:** Cuadro de Análisis de variancia de la regresión múltiple entre contenido total de cromo y pH, contenido de materia orgánica y Capacidad de Intercambio Catiónico.

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F calculado	Valor-P
Modelo	25162.20	3	8387.39	838.43	0,025
MO (%)	2241.32	1	2241.32	224.05	0.0425
CIC(meq/100g)	7750.44	1	7750.44	774.76	0.0229
pH	20905.89	1	20905.89	2089.82	0.0139
Error	10.00	1	10.00		
Total	25172.20	4			

Fuente: Elaboración propia

**Tabla N° 18:** Análisis de variancia de la regresión múltiple entre contenido total de cromo y pH, contenido de materia orgánica y Capacidad de Intercambio Catiónico.

Fuente de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F calculado	Valor-P
Regresión	25162.20	3	8387.39	838.43	0,025
Error	10.00	1	10.00		
Total	25172.20	4			

Fuente: Elaboración propia

**Ecuación de regresión estimada fue:**

$$\text{Cr total} = 537.129 - 72.9026\text{pH} - 80.3218\text{MO} + 17.38\text{CIC}$$

Esta ecuación permite afirmar que por cada incremento de una unidad del pH de los suelos estudiados, el contenido de cromo total disminuye en 72.9026 mg/kg, manteniéndose constante el contenido de materia orgánica y CIC; esto debido a que el pH alto en el suelo favorece la precipitación de cromo y de esa manera disminuye el cromo total que se puede medir en el suelo, debido a que de las formas predominantes de Cromo en el suelo, el Cr(VI) es el más abundante y el Cr(III) se encuentra en menor concentración, lo cual concuerda con lo afirmado por Gonnelli y Renella (2013); respecto a la materia orgánica,

por cada incremento de 1% de materia orgánica en los suelos estudiados del Valle del Mantaro, la cantidad de cromo total disminuye en 80.3218 mg/kg, manteniéndose constante el pH y la CIC; la explicación de este comportamiento de la materia orgánica, es debido a que la materia orgánica, a través de su superficie coloidal cargada eléctricamente, actúa como un adsorbente del cromo, disminuyendo de esa manera su cantidad; cuando disminuye la cantidad de Cromo en el suelo, debido a su adsorción por la fase sólida, también disminuye su disponibilidad; esto concuerda con lo afirmado por Weil and Brady (2016), sobre la alta capacidad adsorbente de la materia orgánica del suelo. Finalmente, cuando se incrementa la capacidad de intercambio catiónico en 1 meq/100 g en los suelos estudiados del Valle del Mantaro, el contenido de cromo total se incrementa en 17.38 mg/kg, manteniéndose constante el pH y la materia orgánica, estos resultados son debidos a la facilidad de intercambio iónico entre la fase sólida del suelo (arcilla + materia orgánica) y la solución suelo, que incrementa la disponibilidad de cromo en el suelo. Esto tiene relación con lo afirmado por Fassbender y Bornemisza (1987), que menciona que los componentes de la fase sólida del suelo adsorben iones, y para analizar este proceso se acostumbra utilizar el término intercambio de iones y cuando las fuerzas que intervienen son predominantemente electrostáticas, los procesos son más o menos reversibles y se les designa como cambio iónico, debido a que además de la adsorción de un ion se libera una cantidad equivalente de otro hacia la solución suelo.

**Tabla N° 19:** Análisis de correlación entre el contenido de cromo total, pH, contenido de materia orgánica y Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC).

Variables	R calculado	R tablas		r <sup>2</sup>	Significación
		0.05	0.01		
Y = Cromo total en suelo X1 = pH X2 = Materia orgánica X3 = CIC	0.9998	0.873	0.959	0.9996	**

Fuente: Elaboración propia.

El análisis de correlación entre el contenido de cromo total (Y) y el pH (X1), materia orgánica (X2), y capacidad de intercambio catiónico (X3) presenta alta significación estadística ( $r \text{ calculado} > r \text{ tablas}_{0.01}$ ) (Tabla N° 8); es decir las variables están relacionadas. El coeficiente de determinación, de 0.9996, indica que la variación del contenido de cromo total en los suelos de Sincos, Huayucachi, Molinos, Santa Rosa de Ocopa y Hualahoyo, se debe en un 99.96% al pH, contenido de materia orgánica y a la capacidad de intercambio catiónico.

## CONCLUSIONES

Los suelos contaminados con cromo del Valle del Mantaro, en las localidades de Hualahoyo, Huayucachi, Molinos, Sincos y Santa Rosa de Ocopa, presentan las siguientes características físico-químicas:

1. Los suelos de Molinos y Hualahoyo están en el rango ácido ( $\text{pH} < 5.5$ ), el suelo de Santa Rosa de Ocopa está en el rango neutro ( $\text{pH} = 6.6 - 7.3$ ) y los suelos de Sincos y Huayucachi tienen un rango de pH alcalino ( $\text{pH} > 7.4$ ). La conductividad eléctrica de todos los suelos estudiados indica que no presentan exceso de sales solubles ( $\text{CE} < 4 \text{ dS/m}$ ).
2. El contenido de carbonato de calcio está ausente en Hualahoyo, Molinos y Santa Rosa de Ocopa, en cambio en Huayucachi y Sincos los valores son medios ( $\text{CaCO}_3 = 1$  a  $5\%$ ). El carbonato de calcio genera el incremento del pH del suelo y la precipitación de cromo en el suelo.
3. Los suelos de Hualahoyo, Sincos y Santa Rosa de Ocopa presentan contenidos bajos de materia orgánica ( $\text{MO} < 2\%$ ), en cambio los suelos de Huayucachi y Molinos presentan contenidos medios de materia orgánica ( $\text{MO} = 2 - 4\%$ ).
4. El P disponible en el suelo de Huayucachi es bajo ( $\text{P} < 7 \text{ ppm}$ ), es de nivel medio en los suelos de Molinos y Sincos ( $\text{P} = 7$  a  $14 \text{ ppm}$ ), y en los suelos de Hualahoyo y Santa Rosa de Ocopa los suelos muestreados presentaron contenidos altos ( $\text{P} > 14 \text{ ppm}$ ).
5. El potasio disponible en los suelos de Huayucachi, molinos y Sincos, es alto ( $\text{K} > 240 \text{ ppm}$ ), en cambio en los suelos de Hualahoyo y Santa Rosa de Ocopa presentaron valores medios ( $\text{K} = 100 - 240 \text{ ppm}$ ).
6. La capacidad de intercambio catiónico es bastante variable, siendo bajo en el suelo de Hualahoyo ( $\text{CIC} = 8-12 \text{ meq/100 g}$ ); en los suelos de Molinos, Santa Rosa de Ocopa y Sincos, la CIC es moderadamente alta ( $\text{CIC} = 12 - 20 \text{ meq/100 g}$ ), mientras que en el suelo de Huayucachi se presentó CIC alta ( $\text{CIC} > 20 \text{ meq/100 g}$ ).
7. La textura de los suelos de Molinos, Sincos, Santa Rosa de Ocopa y Hualahoyo, es calificada como media (Textura = franco), en cambio en el suelo de Huayucachi la textura es moderadamente fina (textura = franco arcilloso).
8. Entre los cationes cambiabiles, predomina el calcio en todos los suelos, seguido del magnesio, potasio, sodio, hidrógeno y aluminio, excepto en Hualahoyo y Molinos donde el aluminio y el hidrógeno le siguen en orden de abundancia al calcio y magnesio.

9. Todos los suelos estudiados presentan alta saturación de bases ( $SB > 78\%$ ), excepto el suelo de Molinos que presentó una baja saturación de bases (alrededor de 33%).
10. Los suelos de Hualahoyo y Molinos presentan baja acidez intercambiable, en cambio los suelos de Sincos, Santa Rosa de Ocopa y Huayucachi no presentan acidez intercambiable.
11. El contenido de cromo total (mg/kg) en todos los suelos estudiados, Hualahoyo, Huayucachi, Molinos, Sincos y Santa Rosa de Ocopa supera el ECA de suelos de Canadá, considerándose suelos contaminados con cromo.
12. La fertilidad de los suelos de Hualahoyo, Sincos, Santa Rosa de Ocopa y Huayucachi es baja, debido principalmente al bajo contenido de materia orgánica; el suelo de Molinos tiene una fertilidad media.
13. Existe regresión y correlación múltiple entre el contenido de cromo total en los suelos estudiados (Y) y el pH (X1), contenido de materia orgánica (X2), y capacidad de intercambio catiónico (X3).
14. No se encontró regresión y correlación lineal simple y múltiple entre el contenido de cromo total y las demás propiedades físico-químicas del suelo, excepto pH, materia orgánica y CIC.

## **RECOMENDACIONES**

1. El contenido de cromo total y su relación con las propiedades físico-químicas de estos suelos, es base para planificar las técnicas de remediación de suelos contaminados, que no sean onerosas y se encuentren al alcance de los productores de estos cinco distritos del Valle del Mantaro.
2. Utilizar la caracterización físico-química de los suelos estudiados para plantear medidas de remediación que estén al alcance de los productores agrícolas.
3. Realizar caracterización de las propiedades físico-químicas de los suelos contaminados con otros metales pesados en el Valle del Mantaro, teniendo en cuenta las medidas de seguridad correspondientes, ya que en su mayoría
4. Determinar los niveles de contaminación de los suelos del Valle del Mantaro, con otros metales pesados.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Method 3060. 1996.** [En línea] <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/3060a.pdf>.
2. **Acosta Alvarez , Marcos Martín. 2007.** Determinación de metales pesados en suelos agrícolas del Valle del Mezquital, HGO. Hidalgo, México : s.n., 2007.
3. **Agustín Alexander Rangel Cordova, Eloy Isarain Chávez Y María Maldonado Vega. 2015.** Caracterización y recuperación de sales de cromo hexavalente de un pasivo ambiental. Guanajuato, México : s.n., 2015.
4. **Alloway, B. 2013.** Heavy Metals in Soils. Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability. Third Edition. Springer.
5. **Andrades Rodríguez, Marisol. 2015.** Prácticas de Edafología. s.l. : Universidad de la Rioja, 2015.
6. **Anderson, R.H., N.T. Basta, and R.P. Lanno. 2008.** Partitioning Species Variability from Soil Property Effects on Phytotoxicity: ECx Normalization Using a Plant Contaminant Sensitive Index. *Journal of Environmental Quality* 37:1701-1709.
7. **Arao T., IS, MM, AK, MY&MT. 2010.** Heavy metal contamination of agricultural soil and countermeasures in Japan. In *Paddy and Water Environment*, p. 247-257.
8. **Barbarán C., S.J. 2017.** Reducción de cromo en suelos contaminados por agroquímicos utilizando lombrices de tierra (*Eisenia foetida*) en el centro poblado Huarabi-Canta, 2017. Tesis para obtener el título de Ingeniera Ambiental. Universidad César Vallejo. Facultad de Ingeniería, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental. Lima, Perú.
9. **Basta N.T. and McGowen S.L. 2004.** Evaluation of chemical immobilization treatments for reducing heavy metal transport in a smelter-contaminated soil. In *Environmental Pollution*, p. 73-82.
10. **Behar, D. 2008.** Metodología de la Investigación. [En línea] 2008. [Citado el: 30 de 09 de 2018.] <http://rdigital.unicv.edu.cv/bitstream/123456789/106/3/Libro%20metodologia%20in%20vestigacion%20este.pdf>. ISBN 978-959-212-783-7.
11. **Bequer, T., Quantin C., Sicot, M., and Boudot, J.P. 2003.** Chromium availability in ultramafic soils from New Caledonia. *Science of the Total Environment*, 301, 251-261.

12. **Burt, R., Wilson, M.A., Mays, M.D., and Lee, C.W. 2003.** Major and trace elements of select pedons in the USA. *Journal Environmental Quality*, 32, 2109-2121.
13. **Chávez Porras, Álvaro. 2010.** DESCRIPCIÓN DE LA NOCIDIDAD DEL CROMO PROVENIENTE DE LA INDUSTRIA CURTIEMBRE Y DE LAS POSIBLES FORMAS DE REMOVERLO. Medellín: Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 2010.
14. **Cuadrado Sanchez, S. y Lorenzo Martin, L.F. 1980.** Estudio del Suelo. Salamanca : s.n., 1980. pág. 28.
15. **Doelsch E., V. Van de Kerchove and H. Saint Macary. 2005.** Heavy metal content in soils of Reunion (Indian Ocean). *Geoderma* 134: 119-134.
16. **Domínguez V., A. 1997.** Tratado de Fertilización. 3ra. Edición. Ediciones Mundi Prensa. Madrid, España.
17. **Dragun, J. 1998.** The soil chemistry of hazardous materials. Amherst Scientific Publ. Amherst, MA.
18. **Esteves da Silva, J. 2002.** Fijación y movilidad de cadmio y zinc en tres tipos de suelos ácidos de Galicia, España. Tesis doctoral, España. Universidad de Vigo, departamento de Biología Vegetal y Ciencia del Suelo.
19. **Fassbender, H.W. y W. Bornemisza. 1987.** Química de Suelos con Enfoque en Suelos de América Latina. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica.
20. **Fendorf, S.E. and R.J. Zasoski, 1992.** Chromium (III) Oxidation by  $\delta$ -Mn<sub>2</sub>: I. Characterization. *Environ. Sci. Technol.* 26:79-85.
21. **Forsythe, W. 1980.** Física de Suelos. Manual de Laboratorio. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. San José, Costa Rica.
22. **García, I. 2005.** Vulnerabilidad y autodepuración de los suelos. <http://edafología.ugr>.
23. **Gad, C.S. 1989.** Acute and chronic systemic chromium toxicity. *Sci. Tot. Environ.* 86, 149-157.
24. **García I. y Dorronsoro, C. 2001.** Contaminación por metales pesados. In: Edafología y química en España. P. 1-16.
25. **Gonnelli, C. and G. Renella 2013.** Chromium and Nickel. B.J. Alloway (ed.) *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloides in Soils and their bioavailability.* Environmental Pollution 22. Springer.
26. **Gunnar, Nordberg. 2017.** ENCICLOPEDIA DE SALUD Y SEGURIDAD EN EL TRABAJO. 2017.

27. **Havlin J.L., S.L. Tisdale, W.L. Nelson and J.D. Beaton. 2014.** Soil Fertility and Fertilizers. An Introduction to nutrient management. Eighth edition. Pearson. USA.
28. **Heredía O.S. y A. Fernández Cirelli. 2008.** Importancia de las propiedades de los suelos en la determinación del riesgo de contaminación de acuíferos. Ci. Suelo (Argentina) 26(2): 131-140.
29. **Hernandez Sampieri, Roberto, Fernández Collado, Carlos y Baptista Lucio, Pilar. 2010.** Metodología de la investigación. México : The McGraw-Hill Companies, 2010.
30. **Hernández S. R., C.F. Collado, P.B. Lucio. 2014.** Metodología de la Investigación. 6ta. Edición. McGraw Hill. México.
31. **Iyaka, Y.A. 2009.** Chromium in Soils: A Review of its distribution and impacts. Continental J. Environmental Sciences 3:13-18.
32. **James, B.R. 1996.** The challenge of remediating chromium-contaminated soil. Environmental Science and Technology, 30, 248-251.
33. **Kabata-Pendias, A. 2004.** Soil-Plant transfer of trace elements-an environmental issue. In Geoderma p. 143-149.
34. **Kotas J. and Z. Stasicka. 2000.** Chromium occurrence in the environment and methods of its speciation. Environmental Pollution 107: 263-283.
35. Kuo, S. (1996). Phosphorus. In: D.L. Sparks Editor. Methods of Soil Analysis. Part 3-Chemical Methods. SSSA Book Series No. 5. USA.
36. **L. Weaver, Richard.** [En línea]  
<https://es.slideshare.net/rubeninfantesvargas/informe-bayoucos-02>.
37. **Larios Bayona, María. 2014.** Niveles de Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb y Zn en los suelos de ribera de la Cuenca del Río Turia. Barcelona : s.n., 2014.
38. **Lenntech. 2018.** Lenntech BV. Copyright © 1998-2018 Lenntech B.V. All rights reserved. [En línea] 2018. [Citado el: 30 de Setiembre de 2018.]  
<https://www.lenntech.es/periodica/elementos/cr.htm>.
39. **Lee, K.P., Ulrich, C.E., Geil, R.G., Trochimowicz, H.J. 1989.** Inhalation toxicity of chromium dioxide dust to rats after two years exposure. Sci. Tot. Environ. 86, 83-108.
40. **Loeppert R.H. and D.L. Suárez. 1996.** Carbonate and Gypsum. In: D.L. Sparks Editor. Methods of Soil Analysis. Part 3-Chemical Methods. SSSA Book Series No. 5. USA.

41. **Losi, M.E., C. Amrhein, and W.T. Frankenberger, Jr. 1994.** Bioremediation of chromate-contaminated groundwater by reduction and precipitation in surface soils. *J. Environ. Qual.* 23:1141-1150.
42. **Mahecha Pulido, Juan D., Trujillo González, Juan M. y Torres Mora, Marco A. 2015.** Contenido de metales pesados en suelos agrícolas de la región. Meta, Colombia : s.n., 2015. págs. 1-5.
43. **Maquerhua Ponce, Yuliana Nataly y Valverde Apfata, Neryeling Cris. 2012.** Evaluación del Nivel de Contaminación de los suelos en el Distrito "El Mantaro" Provincia de Jauja. Huancayo : s.n., 2012.
44. **Martinez Cardozo, L., Vargas Peña, Y.2017.** Evaluación de la Contaminación en el suelo por plomo y cromo y planteamiento de alternativa de remediación en la Represa Del Muña, Municipio De Sibaté-Cundinamarca - Universidad De La Salle.
45. **MINAGRI. 2009.** REGLAMENTO DE CLASIFICACIÓN DE TIERRAS SEGÚN SU CAPACIDAD DE USO MAYOR. Lima : s.n., 2009.
46. **MINAM. 2014.** Guía para el Muestreo de Suelos. D.S N° 002-2013-MINAM. Lima : Mavet Impresiones E.I.R.L, 2014.
47. **Ministerio de Agricultura 2009.** Reglamento de Clasificación de Tierras Según su Capacidad de Uso Mayor. Lima, Perú.
48. **Misra, S.G. and D. Mani 2012.** Soil Pollution. APH Publishing Corporation. New Delhi.
49. **Montauban Gonzáles, Rodolfo. 2013.** Determinación de Cromo(III) y Cromo(IV) mediante técnicas electroquímicas de Análisis. 2013.
50. **Murcia Navarro, Francisco José. 2014.** Caracterización del contenido de cromo, su disponibilidad y sus interacciones con las propiedades del suelo para evaluar el potencial uso de la fitoextracción. Cartagena : s.n., 2014.
51. **Nelson D.W. and L.E. Sommers. 1996.** Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter. In: D.L. Sparks Editor. *Methods of Soil Analysis. Part 3-Chemical Methods.* SSSA Book Series No. 5. USA.
52. **Oseda Gago, Dulio, y otros. 2015.** Teoría y Práctica de la Investigación Científica. Huancayo : Soluciones Gráficas SAC, 2015. pág. 169.
53. **Páez W.J. 2013.** El plan de tesis. Impresiones Olgraf. Lima, Perú.
54. **Peralta-Videoa, J.R., López M.L., Narayam, M., Saupe, G., & Gardea-Torresdey, J. 2009.** The Biochemistry of environmental heavy metal uptake by plants:

- Implications for the food chain. *International Journal of Biochemistry and Cell Biology*, 41, 1665-1677.
55. **Peña Rivera F. y Beltrán L., M.E. 2012.** Aplicación de la fitorremediación en suelos contaminados por metales pesados utilizando *Helianthus annuus* L. en la Estación Experimental El Mantaro. Universidad Nacional del Centro del Perú. *Prospectiva Universitaria*. Vol. 9 Nro. 1. Huancayo, Perú.
  56. **Pérez González, Gustavo. 2005.** Disponibilidad de Metales Tóxicos en sitios contaminados. Barcelona : s.n., 2005.
  57. **Plan de Desarrollo Regional Concertado Junín, 2004-2007. 2003.** Gobierno Regional de Junín, Huancayo, Perú.
  58. **Plaster, E.J. 2014.** Soil Science and Management. International Edition. Sixth Edition. USA.
  59. **Porta C. J., M. López-Acevedo R., C. R. De Laburu. 2003.** Edafología para la Agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi Prensa. Barcelona, España.
  60. **Proyecto “El Mantaro Revive” (2007).** Avances de resultados de la evaluación de calidad ambiental de los recursos agua y suelo. Data Mayo-octubre 2007. Caritas Huancayo.
  61. **Rai, D., Sass, B.M., and Moore, D.A. 1987.** Chromium (III) hydrolysis constants and solubility of chromium hydroxide. *Inorganic chemistry*, 26, 345-349.
  62. **Rangel Cordova, Agustín Alexander, Isarain Chávez, Eloy y Maldonado Vega, María. 2015.** Caracterización y Recuperación de Sales de Cromo Hexavalente de un Pasivo Ambiental. Guanajuato : s.n., 2015.
  63. **Reyes Guzmán, Maritza y Barreto , Luis. 2010.** Efecto de la materia orgánica del suelo en la retención de contaminantes. Colombia : Revista Épsilon, 2010.
  64. **Ritchie, G.S.P., and Sposito, G. 1995.** Speciation in soils. In A.M. Ure & C.M. Davidson (Eds.), *Chemical Speciation in the environment* (pp.234-275). London: Blackie Academic & Professional.
  65. **Rhoades, J.D. 1996.** Salinity. Electrical Conductivity and Total Dissolved Solids. In: D.L. Sparks Editor. *Methods of Soil Analysis. Part 3-Chemical Methods*. SSSA Book Series No. 5. USA.
  66. **SSSA. 2015.** Glossary of Soil Science Terms. Madison, Wisconsin: Soil Science Society American. USA.
  67. **Sumner M.E. and W.P. Miller. 1996.** Cation Exchange Capacity and Exchange Coefficients. In: D.L. Sparks Editor. *Methods of Soil Analysis. Part 3-Chemical Methods*. SSSA Book Series No. 5. USA.

68. **Tan, K.H. 2011.** Principles of Soil Chemistry. Fourth edition. CRC Press. USA.
69. **Thomas, G.W. 1996.** Soil pH and Soil Acidity. In: D.L. Sparks Editor. Methods of Soil Analysis. Part 3-Chemical Methods. SSSA Book Series No. 5. USA.
70. **United States Environmental Protection Agency 1982.** Test Methods for Evaluating Solid Wastes, Physical/Chemical Methods. SW-846, Second Edition, Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, D.C.
71. **Vilca Castro, Fiorella y Gordillo Vilca, Yomelly Bertha. 2016.** Retención de metales pesados en suelos y su Impacto ambiental. Arequipa : s.n., 2016.
72. **Vilca Castro, F. y Y.B. Gordillo Vilca. 2016.** Retención de metales pesados en suelos y su impacto ambiental. Tesis para optar el título profesional de licenciada en Química. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Facultad de Ciencias naturales y Formales. Escuela profesional de Química. Arequipa, Perú.
73. **Wang y Benoit J.P.G. 2007.** Influence of pH and Zinc concentration on cadmium sorption in acid, sandy soils. In Water Air and Soil Pollution, p. 349-589.
74. **Weil, R.R. and Brady, N.C. 2016.** The nature and properties of Soils. Pearson Prentice Hall. Revised Fourteenth Edition. New Jersey, Columbus, Ohio. USA.
75. **Yaron, B.; R. Calvet and R. Prost. 1996.** Soil Pollution. Processes and Dynamics. Springer. Germany.
76. **Young, S.D. 2013.** Chemistry of Heavy Metals and Metalloids in Soils. In: B.J. Alloway (ed.). Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability, Environmental Pollution 22. Springer.
77. **Zavaleta G., A. 1992.** Edafología. El suelo en relación con la producción. Concytec. Lima, Perú.

## **ANEXOS**



Figura 2. Punto N°1 de muestreo – Molinos



Figura 3: Muestreo del Punto N°1: Molinos



Figura 4: Punto N°2 de muestreo – Hualahoyo



Figura 5: Muestreo del Punto N°2 – Hualahoyo



Figura 6: Punto N°3 de muestreo – Sincos



Figura 7: Muestreo del Punto N°3 – Sincos



Figura 8: Punto N°4 de muestreo – Santa Rosa



Figura 9: Muestreo del Punto N°4 – Santa Rosa



Figura 10: Punto N°5 de muestreo - Huayucachi



Figura 11: Muestreo del Punto N°5 – Huayucachi

## **RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE SUELO**



# UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE AGRONOMIA - DEPARTAMENTO DE SUELOS  
LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



## ANALISIS DE SUELOS : CARACTERIZACION

Solicitante : GERALDYNE COLONIO CHUQUILLANQUI

Departamento : JUNIN

Distrito : MOLINOS

Referencia : H.R. 56293-158C-16

Bolt.: 13642

Provincia : JAUJA

Predio :

Fecha : 21/10/16

Número de Muestra		pH (1:1)	C.E. (1:1) dS/m	CaCO <sub>3</sub> %	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico			Clase Textural	CIC	Cationes Cambiables					Suma de Cationes	Suma de Bases	% Sat. De Bases
Lab	Claves							Arena %	Limo %	Arcilla %			Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Al <sup>+3</sup> + H <sup>+</sup>			
13922		4.74	0.33	0.00	2.33	8.2	243	43	34	23	Fr.	14.08	3.27	0.85	0.52	0.03	1.10	5.78	4.68	33

A = Arena ; A.Fr. = Arena Franca ; Fr.A. = Franco Arenoso ; Fr. = Franco ; Fr.L. = Franco Limoso ; L = Limoso ; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso ; Fr.Ar. = Franco Arcilloso ; Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso ; Ar.A. = Arcillo Arenoso ; Ar.L. = Arcillo Limoso ; Ar. = Arcilloso

Número de Muestra		Cr ppm
Lab.	Claves	
13922		249.62



*Sady García Bendezú*  
Sady García Bendezú  
Jefe del Laboratorio



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
**FACULTAD DE AGRONOMIA - DEPARTAMENTO DE SUELOS**  
 LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



**ANALISIS DE SUELOS : CARACTERIZACION**

Solicitante : GERALDYNE COLONIO CHUQUILLANQUI

Departamento : JUNÍN

Distrito : HUALAHOYO

Referencia : H.R. 56293-158C-16

Bolt.: 13642

Provincia : HUANCAYO

Predio :

Fecha : 21/10/16

Número de Muestra		pH (1:1)	C.E. (1:1) dS/m	CaCO <sub>3</sub> %	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico			Clase Textural	CIC	Cationes Cambiables					Suma de Cationes	Suma de Bases	% Sat. De Bases
Lab	Claves							Arena %	Limo %	Arcilla %			Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Al <sup>+3</sup> + H <sup>+</sup>			
13920		5.17	0.53	0.00	1.00	32.0	135	45	34	21	Fr.	9.60	6.05	1.03	0.43	0.04	0.40	7.96	7.56	79

A = Arena ; A.Fr. = Arena Franca ; Fr.A. = Franco Arenoso ; Fr. = Franco ; Fr.L. = Franco Limoso ; L = Limoso ; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso ; Fr.Ar. = Franco Arcilloso ; Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso ; Ar.A. = Arcillo Arenoso ; Ar.L. = Arcillo Limoso ; Ar. = Arcilloso

Número de Muestra		Cr ppm
Lab.	Claves	
13920		246.59



*Sady García Bendezú*  
 Dr. Sady García Bendezú  
 Jefe del Laboratorio



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
**FACULTAD DE AGRONOMIA - DEPARTAMENTO DE SUELOS**  
**LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES**



## ANALISIS DE SUELOS : CARACTERIZACION

Solicitante : GERALDYNE COLONIO CHUQUILLANQUI

Departamento : JUNÍN

Distrito : SINCOS

Referencia : H.R. 56293-158C-16

Bolt.: 13642

Provincia : JAUJA

Predio :

Fecha : 21/10/16

Número de Muestra		pH (1:1)	C. E. (1:1) dS/m	CaCO <sub>3</sub> %	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico			Clase Textural	CIC	Cationes Cambiables					Suma de Cationes	Suma de Bases	% Sat. De Bases
Lab	Claves							Arena %	Limo %	Arcilla %			Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Al <sup>+3</sup> + H <sup>+</sup>			
13923		7.68	0.93	4.30	1.48	9.5	283	37	40	23	Fr.	13.76	10.05	2.88	0.77	0.05	0.00	13.76	13.76	100

A = Arena ; A.Fr. = Arena Franca ; Fr.A. = Franco Arenoso ; Fr. = Franco ; Fr.L. = Franco Limoso ; L = Limoso ; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso ; Fr.Ar. = Franco Arcilloso ; Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso ; Ar.A. = Arcillo Arenoso ; Ar.L. = Arcillo Limoso ; Ar. = Arcilloso

Número de Muestra		Cr ppm
Lab	Claves	
13923		99.65



*Dr. Sady García Bendezú*  
**Dr. Sady García Bendezú**  
 Jefe del Laboratorio



# UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE AGRONOMIA - DEPARTAMENTO DE SUELOS  
LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



## ANALISIS DE SUELOS : CARACTERIZACION

Solicitante : GERALDYNE COLONIO CHUQUILLANQUI

Departamento : JUNÍN  
Distrito : SANTA ROSA DE OCOPA  
Referencia : H.R. 56293-158C-16

Bolt.: 13642

Provincia : CONCEPCIÓN  
Predio :  
Fecha : 21/10/16

Número de Muestra		pH (1:1)	C.E. (1:1) dS/m	CaCO <sub>3</sub> %	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico			Clase Textural	CIC	Cationes Cambiables					Suma de Cationes	Suma de Bases	% Sat. De Bases
Lab	Claves							Arena %	Limo %	Arcilla %			Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Al <sup>3+</sup> + H <sup>+</sup>			
13924		7.23	0.81	0.00	1.57	23.2	195	31	46	23	Fr.	12.80	10.29	1.92	0.52	0.08	0.00	12.80	12.80	100

A = Arena ; A.Fr. = Arena Franca ; Fr.A. = Franco Arenoso ; Fr. = Franco ; Fr.L. = Franco Limoso ; L = Limoso ; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso ; Fr.Ar. = Franco Arcilloso ; Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso ; Ar.A. = Arcillo Arenoso ; Ar.L. = Arcillo Limoso ; Ar. = Arcilloso

Número de Muestra		Cr ppm
Lab	Claves	
13924		104.14



*Sady García Bendezú*  
Dr. Sady García Bendezú  
Jefe del Laboratorio



**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**  
**FACULTAD DE AGRONOMIA - DEPARTAMENTO DE SUELOS**  
**LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES**



**ANALISIS DE SUELOS : CARACTERIZACION**

Solicitante : GERALDYNE COLONIO CHUQUILLANQUI

Departamento : JUNÍN  
 Distrito : HUAYUCACHI  
 Referencia : H.R. 56293-158C-16

Bolt.: 13642

Provincia : HUANCAYO  
 Predio :  
 Fecha : 21/10/16

Número de Muestra		pH (1:1)	C.E. (1:1) dS/m	CaCO <sub>3</sub> %	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico			Clase Textural	CIC	Cationes Cambiables					Suma de Cationes	Suma de Bases	% Sat. De Bases
Lab	Claves							Arena %	Limo %	Arcilla %			Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Al <sup>+3</sup> + H <sup>+</sup>			
13921		7.60	1.08	2.80	2.88	5.3	329	45	28	27	Fr.Ar.	28.32	23.25	4.42	0.61	0.04	0.00	28.32	28.32	100

A = Arena ; A.Fr. = Arena Franca ; Fr.A. = Franco Arenoso ; Fr. = Franco ; Fr.L. = Franco Limoso ; L = Limoso ; Fr.Ar.A. = Franco Arcillo Arenoso ; Fr.Ar. = Franco Arcilloso ; Fr.Ar.L. = Franco Arcillo Limoso ; Ar.A. = Arcillo Arenoso ; Ar.L. = Arcillo Limoso ; Ar. = Arcilloso

Número de Muestra		Cr ppm
Lab	Claves	
13921		243.74



*Sady García Bendezú*  
 Sady García Bendezú  
 Jefe del Laboratorio

## METODOS SEGUIDOS EN EL ANALISIS DE SUELOS

1. Textura de suelo: % de arena, limo y arcilla; método del hidrómetro.
2. Salinidad: medida de la conductividad eléctrica (CE) del extracto acuoso en la relación suelo: agua 1:1 o en el extracto de la pasta de saturación(es).
3. PH: medida en el potenciómetro de la suspensión suelo: agua relación 1:1 ó en suspensión suelo: KCl N, relación 1:2.5.
4. Calcareo total (CaCO<sub>3</sub>): método gaso-volumétrico utilizando un calcímetro.
5. Materia orgánica: método de Walkley y Black, oxidación del carbono Orgánico con dicromato de potasio. %M.O.=%Cx1.724.
6. Nitrógeno total: método del micro-Kjeldahl.
7. Fósforo disponible: método del Olsen modificado, extracción con NaHCO<sub>3</sub>=0.5M, pH 8.5
8. Potasio disponible: extracción con acetato de amonio (CH<sub>3</sub> - COONH<sub>4</sub>)N, pH 7.0
9. Capacidad de intercambio catiónico (CIC): saturación con acetato de amonio (CH<sub>3</sub>- COOCH<sub>3</sub>)N; pH 7.0
10. Ca<sup>+2</sup>, Mg<sup>+2</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> cambiables: reemplazamiento con acetato de amonio

(CH<sub>3</sub>-COONH<sub>4</sub>)N; pH 7.0 cuantificación por fotometría de llama y/o absorción atómica.

11. Al<sup>+3</sup>+ H<sup>+</sup>: método de Yuan. Extracción con KCl, N

12. Iones solubles:

- a) Ca<sup>+2</sup>, Mg<sup>+2</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> solubles: fotometría de llama y/o absorción atómica.
- b) Cl, CO<sub>3</sub>, HCO<sub>3</sub>, NO<sub>3</sub> solubles: volumetría y colorimetría. SO<sub>4</sub> turbidimetría con cloruro de Bario.
- c) Boro soluble: extracción con agua, cuantificación con curcumina.
- d) Yeso soluble: solubilización con agua y precipitación con acetona.

Equivalencias:

1 ppm=1 mg/kilogramo

1 millimho (mmho/cm) = 1 deciSiemens/metro

1 miliequivalente / 100 g = 1 cmol(+)/kg

Sales solubles totales (TDS) en ppm ó mg/kg = 640 x CEes

CE (1 : 1) mmho/cm x 2 = CE(es) mmho/cm

## TABLA DE INTERPRETACION

Salinidad		Materia Orgánica	Fósforo disponible	Potasio disponible	Relaciones Catiónicas			
Clasificación del Suelo	CE(es)	CLASIFICACIÓN	%	ppm P	ppm K	Clasificación	K/Mg	Ca/Mg
*muy ligeramente salino	<2	*bajo	<2.0	<7.0	<100	*Normal	0.2 - 0.3	5 - 9
*ligeramente salino	2 - 4	*medio	2 - 4	7.0 - 14.0	100 - 240	*defc. Mg	>0.5	
*moderadamente salino	4 - 8	*alto	>4.0	>14.0	>240	*defc. K	>0.2	
*fuertemente salino	>8					*defc. Mg		>10

Reacción o pH		CLASES TEXTURALES				Distribución de Cationes %				
Clasificación del Suelo	pH	A	=	arena	Fr.Ar.A	=	franco arcillo arenoso	Ca <sup>+2</sup>	=	60 - 75
*fuertemente ácido	<5.5	A.Fr	=	arena franca	Fr.Ar	=	franco arcilloso	mg <sup>+2</sup>	=	15 - 20
*moderadamente ácido	5.6 - 6.0	Fr.A	=	franco arenoso	Fr.Ar.L	=	franco arcilloso limoso	K <sup>+</sup>	=	3 - 7
*ligeramente ácido	6.1 - 6.5	Fr.	=	franco	Ar.A	=	arcilloso arenoso	Na <sup>+</sup>	=	<15
*neutro	6.6 - 7.0	Fr.L.	=	franco limoso	Ar.L.	=	arcilloso limoso			
*ligeramente alcalino	7.1 - 7.8	L	=	limoso	Ar.	=	arcilloso			
*moderadamente alcalino	7.9 - 8.4									
*fuertemente alcalino	>8.5									

## Guía de Clasificación para Interpretación de Análisis de Suelos

### 1. Textura del suelo<sup>1</sup>

Grupo Textural	Clase Textural
Gruesa	Arena Arena Franca
Moderadamente Gruesa	Franco Arenoso
Media	Franco Franco Limoso Limoso
Moderadamente Fina	Franco Arcilloso Franco Arcillo Limoso Franco Arcillo Arenoso
Fina	Arcillo Arenoso Arcillo Limoso Arcilloso

### 2. Reacción del suelo (pH)<sup>1</sup>

Rangos	Clases
< 3.5	Ultra ácido
3.6 - 4.4	Extremadamente ácido
4.5 – 5.0	Muy fuertemente ácido
5.1 – 5.5	Fuertemente ácido
5.6 – 6.0	Moderadamente ácido
6.1 – 6.5	Ligeramente ácido
6.6 – 7.3	Neutro
7.4 – 7.8	Ligeramente alcalino
7.9 – 8.4	Moderadamente alcalino
8.5 – 9.0	Fuertemente alcalino
> 9.0	Muy fuertemente alcalino

### 3. Salinidad y/o sodicidad<sup>1</sup>

Símbolo	Descripción
0	<p><b>Libres a muy ligeramente afectados de exceso de sales y sodio</b></p> <p>Prácticamente ningún cultivo se encuentra inhibido en su crecimiento o muestra daños provocados por exceso de sales o sodio.</p> <p>Los suelos muestran conductividad eléctrica inferior a 4 dS/m. El porcentaje de sodio es menor del 4%.</p>
1	<p><b>Ligeramente afectados por sales y sodio</b></p> <p>El crecimiento de las especies sensibles está inhibido, pero las plantas tolerantes pueden subsistir.</p> <p>La conductividad eléctrica varía de 4 a 8 dS/m. El porcentaje de sodio es de 4 a 8%</p>
2	<p><b>Moderadamente afectados por sales y sodio</b></p> <p>El crecimiento de los cultivos está inhibido y muy pocas plantas pueden desarrollar adecuadamente.</p> <p>La conductividad eléctrica varía de 8 a 16 dS/m. El porcentaje de sodio está entre 8 y 15%.</p>
3	<p><b>Fuertemente afectados por sales y sodio</b></p> <p>No se puede cultivar económicamente.</p> <p>La conductividad eléctrica es mayor de 16 dS/m. El porcentaje de sodio sobrepasa el 15%.</p>

### 4. Materia orgánica<sup>1</sup>

Nivel	Materia Orgánica (%)
Bajo	< 2
Medio	2 a 4
<b>Alto</b>	<b>&gt; 4</b>

### 5. Fósforo Disponible<sup>1</sup>

Nivel	P disponible (mg/kg)
Bajo	< 7
Medio	7 a 14
Alto	> 14

### 6. Potasio disponible<sup>1</sup>

Nivel	K disponible (mg/kg)
Bajo	< 100
Medio	100 a 240
Alto	> 240

### 7. Carbonato de Calcio<sup>2</sup>

Nivel	CaCO <sub>3</sub> (%)
Bajo	< 1
Medio	1 a 5
Alto	5 -15
Muy Alto	> 15

## 8. Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)<sup>2</sup>

Nivel	CIC (cmol/kg)
Muy Baja	< 4
Moderadamente Baja	4 – 8
Baja	8 – 12
Moderadamente Alta	12 - 20
Alta	> 20

<sup>1</sup> MINAGRI-DGAAA. (2009). Reglamento de Clasificación de Tierras Según su Capacidad de Uso Mayor. Lima, Perú.

<sup>2</sup> Departamento de Suelos y Fertilizantes de la Universidad Nacional Agraria La Molina, 2002.