



**UTMACH**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**

**CARRERA DE AGRONOMÍA**

**Propiedades físico-químicas y variabilidad espacial de un suelo afectado por el vertido minero, finca Pagua, Parroquia Río Bonito.**

**MORA ENCALADA CRISTHEL PAULETTE  
INGENIERA AGRONOMA**

**MACHALA  
2022**



**UTMACH**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**

**CARRERA DE AGRONOMÍA**

**Propiedades físico-químicas y variabilidad espacial de un suelo  
afectado por el vertido minero, finca Pagua, Parroquia Río Bonito.**

**MORA ENCALADA CRISTHEL PAULETTE  
INGENIERA AGRONOMA**

**MACHALA  
2022**



**UTMACH**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**

**CARRERA DE AGRONOMÍA**

**TRABAJOS EXPERIMENTALES**

**Propiedades físico-químicas y variabilidad espacial de un suelo  
afectado por el vertido minero, finca Pagua, Parroquia Río Bonito.**

**MORA ENCALADA CRISTHEL PAULETTE  
INGENIERA AGRONOMA**

**CHABLA CARRILLO JULIO ENRIQUE**

**MACHALA  
2022**

# PROPIEDADES FÍSICO – QUÍMICAS Y VARIABILIDAD ESPACIAL DE SUELO AFECTADO POR EL VERTIDO MINERO, EN LA FINCA "PAGUA", PARROQUIA RÍO BONITO, CANTÓN EL GUABO, PROVINCIA DEL ORO

## INFORME DE ORIGINALIDAD

2%

INDICE DE SIMILITUD

3%

FUENTES DE INTERNET

1%

PUBLICACIONES

1%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1

[repository.lasallista.edu.co](https://repository.lasallista.edu.co)

Fuente de Internet

1%

2

[www.redalyc.org](http://www.redalyc.org)

Fuente de Internet

1%

3

Francisco De la Cueva, Alexandra Naranjo, Byron Humberto Puga Torres, Eduardo Aragón. "Presencia de metales pesados en leche cruda bovina de Machachi, Ecuador", La Granja, 2021

Publicación

1%

4

[repositorio.unfv.edu.pe](https://repositorio.unfv.edu.pe)

Fuente de Internet

1%

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 1%

Excluir bibliografía

Activo

## CLÁUSULA DE CESIÓN DE DERECHO DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL


El que suscribe, CRISTHEL PAULETTE MORA ENCALADA, en calidad de autor del siguiente trabajo escrito titulado Variabilidad espacial del contenido de materia orgánica en suelos bananeros mediante manejo de arvenses con control químico y mecánico, otorga a la Universidad Técnica de Machala, de forma gratuita y no exclusiva, los derechos de reproducción, distribución y comunicación pública de la obra, que constituye un trabajo de autoría propia, sobre la cual tiene potestad para otorgar los derechos contenidos en esta licencia.

El autor declara que el contenido que se publicará es de carácter académico y se enmarca en las disposiciones definidas por la Universidad Técnica de Machala.

Se autoriza a transformar la obra, únicamente cuando sea necesario, y a realizar las adaptaciones pertinentes para permitir su preservación, distribución y publicación en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad Técnica de Machala.

El autor como garante de la autoría de la obra y en relación a la misma, declara que la universidad se encuentra libre de todo tipo de responsabilidad sobre el contenido de la obra y que asume la responsabilidad frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros de manera exclusiva.

Aceptando esta licencia, se cede a la Universidad Técnica de Machala el derecho exclusivo de archivar, reproducir, convertir, comunicar y/o distribuir la obra mundialmente en formato electrónico y digital a través de su Repositorio Digital Institucional, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico.



MORA ENCALADA CRISTHEL PAULETTE

0705579803

## **DEDICATORIA**

A Dios por permitirme cumplir esta anhelada meta, darme la capacidad de realizar cada una de mis expectativas exitosamente y sobre todo no desmayar ante los problemas que se presentaban, enseñándome a encarar las adversidades sin desfallecer.

Con mucho cariño a mis padres Paola Pilar Encalada Meza y Jhonny Patricio Mora Naula por ser mi pilar y darme su más incondicional apoyo, dedicándome su esfuerzo porque siempre creyeron en mí, los amo.

A mis hermanos, que son el motivo de mi esfuerzo, superación y felicidad, siempre apoyándome en las buenas y las malas.

Para mi tía Maritza Mora y abuelos, personas importantes en mi vida que me han enseñado a mantener mis metas establecidas con valores, principios y carácter.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Técnica de Machala, Facultad de Ciencias Agropecuarias por haberme abierto sus puertas y brindarme la oportunidad de formarme como profesional.

Al Ing. Julio Enrique Chabla Carillo, PhD y asesores por ser guías y apoyo durante el desarrollo de esta investigación.

Ing. Edison Cueva por brindarme los conocimientos e implementos necesarios para poder llevar a cabo el trabajo de investigación.

A mis grandes amigos Anthony Patricio Morocho Castillo y Mathew Alexander Mora Coello, con quién he compartido toda experiencia de una forma más cercana, siempre apoyándome y alentándome para seguir adelante, los quiero.

A mis compañeros de curso que de alguna forma u otra nos hemos apoyado mutuamente, gracias a su colaboración y compañía he culminado con éxito este proceso de formación.

A mis amadas amigas, Ericka Paulette Aguilar Sagbay y Maria Fernanda Ordoñez Peñaloza, a pesar no compartir este proceso conmigo siempre me demostraron su apoyo y cariño para no desistir.

## RESUMEN

Los problemas que presentan la agricultura son la pérdida de fertilidad de los suelos, ocasionados por las malas prácticas agrícolas, además de las fuentes antropogénicas, aquellos químicos subproductos de las actividades industriales. Dada la necesidad de conocer el comportamiento de variación de algunas propiedades físicas y variabilidad espacial del suelo de la finca Pagua afectada por el vertido minero del Río 7, la presente investigación se llevó a cabo, en el cantón El Guabo, parroquia Río Bonito, finca "Pagua". Para el diseño, se realizó un estudio observacional descriptivo, donde se establecieron 18 puntos de muestreo, cada uno con dos profundidades (0 – 15 cm, 15 -30 cm), procesando un total 36 muestras en 20.1 ha. Las propiedades físicas y químicas fueron determinadas en el laboratorio de la Universidad Técnica de Machala y para el contenido de metales pesados las muestras fueron enviadas al laboratorio TerraProductos S.A. ubicado en Cayambe, provincia de Pichincha. El análisis de datos se realizó en diversos enfoques, univariado (estadística descriptiva) haciendo uso del software IBM SPSS Estadistic 25 y Microsoft Excel 2019, se emplearon gráficos exploratorios como diagramas caja y bigote permitiendo apreciar de manera visual el comportamiento de cada variable. En el análisis geoestadístico se usó el software ArcMap 10.3 para la determinación de semivariogramas, para la selección de un modelo (esférico, gaussiano y exponencial), el coeficiente de Nash y el coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>) fue cercano o igual a 1, y obtener los valores más bajo del error medio cuadrático (RMSE), siendo los más precisos y eficientes el modelo esférico y exponencial. Los parámetros obtenidos del semivariograma se utilizaron para la interpolación por el método de kriging con la finalidad de diseñar mapas de variabilidad espacial sobre el contenido de metales pesados. Los resultados evidenciaron una dependencia espacial moderada para Cd, As y Hg, una dependencia espacial fuerte para Ni y Pb, por otro lado, no se presentó en ningún metal pesado con una dependencia espacial débil para los primeros 15 cm del suelo. Los niveles de As y Pb encontrados varían entre 0,013 a 0,022 mg.kg<sup>-1</sup> y 0,40 a 0,49 mg.kg<sup>-1</sup> respectivamente, indicando que el contenido de estos metales es más alto al rango óptimo para no considerarlos contaminantes.

**Palabras claves:** Minería, metales pesados, geoestadística, semivariogramas.



## ABSTRACT

The problems in agriculture are the loss of soil fertility caused by poor agricultural practices, in addition to anthropogenic sources, those chemical by-products of industrial activities. Given the need to know the variation behavior of some physical properties and spatial variability of the soil of the Pagua farm affected by the Rio 7 mining spill, the present investigation was carried out in El Guabo, Rio Bonito, "Pagua" property. For the design, a descriptive observational study was carried out, where 18 sampling points were established, each with two depths (0 - 15 cm, 15 - 30 cm), processing a total of 36 samples in 20.1 ha. The physical and chemical properties were determined in the laboratory of the Technical University of Machala and the heavy metal content of the samples were sent to the TerraProductos S.A. laboratory located in Cayambe, province of Pichincha. The data analysis was performed in different approaches, univariate (descriptive statistics) using IBM SPSS Statistical 25 and Microsoft Excel 2019 software, exploratory graphs such as box and whisker diagrams were used to visually appreciate the behavior of each variable. In the geostatistical analysis, ArcMap 10.3 software was used for the determination of semivariograms, for the selection of a model (spherical, Gaussian and exponential), the Nash coefficient and the coefficient of determination ( $R^2$ ) was close or equal to 1, and to obtain the lowest values of the root mean square error (RMSE), being the most accurate and efficient the spherical and exponential model. The parameters obtained from the semivariogram were used for interpolation by the kriging method in order to design spatial variability maps of heavy metal content. The results showed a moderate spatial dependence for Cd, As and Hg, a strong spatial dependence for Ni and Pb, and no heavy metals with a weak spatial dependence for the first 15 cm of the soil. The levels of As and Pb found varied between 0.013 to 0.022 mg.kg<sup>-1</sup> and 0.40 to 0.49 mg.kg<sup>-1</sup> respectively, indicating that the content of these metals is higher than the optimal range to not consider them contaminants.

**Key words:** Mining, heavy-metals, geostatistics, semivariograms.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

	<b>Pág.</b>
CAPITULO I .....	10
I. INTRODUCCIÓN.....	10
CAPITULO II.....	12
II. REVISIÓN DE LITERATURA .....	12
2.1. Funciones del suelo en los ecosistemas .....	12
2.2. Propiedades fisicoquímicas del suelo.....	12
2.2.1. Propiedades físicas de un suelo .....	13
2.2.1.1. Textura.....	13
2.2.1.2. Densidad real .....	14
2.2.1.3. Densidad aparente .....	13
2.2.2. Propiedades químicas del suelo .....	15
2.2.2.1. pH .....	15
2.2.2.3. Conductividad eléctrica .....	16
2.3. Variabilidad espacial.....	16
2.4. Geoestadística .....	16
2.4.1. Etapas de análisis geoestadístico .....	17
2.5. Semivarianza .....	17
2.6. Semivariograma .....	18
2.7. Método de interpolación .....	19
2.7.1. Kriging.....	19
2.8. Minerales.....	20
2.9. Minería .....	20
2.10. Vertido minero.....	22
2.11. Metales pesados.....	23
2.11.1. Cadmio.....	23
2.11.2. Mercurio.....	24
2.11.3. Níquel (Ni).....	24
2.11.4. Plomo (Pb).....	24
2.12. Contaminación puntual.....	25
2.13. Contaminación difusa .....	25
2.14. Fuentes de contaminación del suelo .....	25
2.15. Fuentes geogénicas naturales .....	26

2.16.	Fuentes antropogénicas .....	27
CAPITULO III.....		27
III.	MATERIALES Y MÉTODOS .....	27
3.1	Localización y caracterización del área de estudio .....	27
3.2	Ubicación geográfica de la zona de estudio .....	27
3.3	Características del suelo .....	28
3.4	Diseño de estudio .....	29
3.5	Croquis del experimento .....	30
3.6	Manejo del experimento.....	30
3.7	Materiales y herramientas .....	30
3.7.1	Materiales de campo: .....	30
3.7.2	Materiales de laboratorio. ....	31
3.7.3	Materiales de oficina.....	31
3.8	VARIABLES ESTUDIADAS.....	31
3.8.1	Densidad Real (dr) .....	31
3.8.2	Textura y clase textural.....	32
3.8.3	Densidad Aparente del suelo (da).....	35
3.8.4	Materia orgánica, Método por pérdida de ignición (LOI) o gravimétrico	36
3.8.5	Potencial de hidrógeno (pH) .....	37
3.8.6	Conductividad eléctrica (C.E.).....	38
CAPITULO IV .....		39
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIONES .....	39
4.1	Análisis exploratorio de las propiedades físicas y químicas del suelo.....	39
4.2	Análisis de variabilidad espacial de suelos. ....	55
4.2.1	Análisis estructural de metales pesados del suelo. ....	55
4.2.1.1	Cadmio (Cd) .....	55
4.2.1.2	Arsénico (As) .....	55
4.2.1.3	Mercurio (Hg) .....	55
4.2.1.4	Níquel (Ni) .....	56
4.2.1.5	Plomo (Pb) .....	56
4.2.2	Creación de mapas temáticos de metales pesados en el suelo.....	57

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Densidad Real según el tipo de suelo .....	14
<b>Tabla 4.</b> Clases texturales predominantes de la zona de estudio .....	29
<b>Tabla 5.</b> Variables a utilizar dentro del estudio .....	31
<b>Tabla 6.</b> Estadística descriptiva de las propiedades físicas y químicas de suelo. ....	51
<b>Tabla 7.</b> Prueba de normalidad para cada profundidad.....	54
<b>Tabla 8.</b> Parámetros del variograma aplicando kriging ordinario para las variables de estudio.....	57

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Diagrama triangular de las clases texturales .....	14
<b>Figura 2.</b> Principales elementos de semivariograma .....	18
<b>Figura 3.</b> Ubicación de la zona de estudio .....	28
<b>Figura 4.</b> Croquis del experimento .....	30
<b>Figura 5.</b> Determinación de Densidad Real .....	32
<b>Figura 6.</b> Determinación de Textura y Clase Textural .....	35
<b>Figura 7.</b> Toma de muestras para determinar Densidad Aparente.....	36
<b>Figura 8.</b> Determinación de Densidad Aparente.....	36
<b>Figura 9.</b> Muflado de muestras para determinar Materia orgánica.....	37
<b>Figura 10.</b> Diagrama de caja y bigote de Densidad Real en dos profundidades de estudio. .....	43
<b>Figura 11.</b> Diagrama de caja y bigote de Densidad Aparente en dos profundidades de estudio.....	42
<b>Figura 12.</b> Diagrama de caja y bigote de Materia Orgánica en dos profundidades de estudio.....	44
<b>Figura 13.</b> Diagrama de caja y bigote de Reacción de suelo (pH) en dos profundidades de estudio. ....	45
<b>Figura 14.</b> Diagrama de caja y bigote de Conductividad Eléctrica en dos profundidades de estudio. ....	46
<b>Figura 15.</b> Diagrama de caja y bigote de Cadmio (Cd). ....	47
<b>Figura 16.</b> Diagrama de caja y bigote de Arsénico (As).....	48
<b>Figura 17.</b> Diagrama de caja y bigote de Mercurio (Hg).....	49
<b>Figura 18.</b> Diagrama de caja y bigote de Níquel (Ni).....	49
<b>Figura 19.</b> Diagrama de caja y bigote de Plomo (Pb).....	50
<b>Figura 20.</b> Semivariograma del Cadmio .....	55
<b>Figura 21.</b> Semivariograma del Arsénico .....	55
<b>Figura 22.</b> Semivariograma del Mercurio.....	55
<b>Figura 23.</b> Semivariograma del Níquel.....	56
<b>Figura 24.</b> Semivariograma del Plomo .....	56
<b>Figura 25.</b> Distribución espacial de metales pesados: Cadmio y Arsénico .....	58
<b>Figura 26.</b> Distribución espacial de metales pesados: Mercurio, Níquel y Plomo.....	59

## ÍNDICE DE ECUACIONES

	<b>Pág.</b>
<b>Ecuación 1.</b> Ecuación para estimar la semivarianza. ....	17
<b>Ecuación 2.</b> Ecuación de Kriging.....	20
<b>Ecuación 3.</b> Ecuación para determinar Densidad Real .....	32
<b>Ecuación 4.</b> Ecuación para determinar el % de Limo + Arcilla.....	33
<b>Ecuación 5.</b> Ecuación para determinar el % de Arcilla .....	34
<b>Ecuación 6.</b> Ecuación para determinar el % de Limo.....	34
<b>Ecuación 7.</b> Ecuación para determinar el % de arena.....	34
<b>Ecuación 8.</b> Ecuación para determinar Densidad Aparente.....	35
<b>Ecuación 9.</b> Ecuación para determinar el % de Materia Orgánica .....	37

## **CAPITULO I**

### **I. INTRODUCCIÓN**

La minería es una actividad apoyada por organismos de cooperación internacional e instituciones estatales. Dentro de Ecuador la pequeña minería tiene escasa asistencia técnica debido a que no es financiada por ninguna institución dentro del sector, por ello se encuentran en posiciones informales e ilegales en ciertos casos. En este sentido, se han formulado leyes y reglamentos orientados a ejecutar acciones ante esta situación, por ejemplo, se debe exigir un plan de manejo ambiental en donde participan diferentes organizaciones como SENAGUA, que en conjunto con autoridades locales ayuden a evitar que esta actividad de siga realizando de manera ilegal.

La contaminación del suelo hace referencia a que dentro de él existe la presencia de algún químico o una sustancia que se encuentra fuera de sitio, con una concentración más alta de lo normal, que trae consigo efectos desfavorables sobre los organismos para los que no hayan sido destinados; frecuentemente esta problemática no es evaluada directamente lo que la convierte en un peligro oculto (Rodríguez et al., 2019).

En la contaminación del suelo, las fuentes antropogénicas son aquellos químicos subproductos de las actividades industriales, la ganadería, residuos domésticos, municipales, derivados del petróleo, los agroquímicos, entre otros; además, muchas de estas sustancias presentes en el ambiente son producto de derrames accidentales; asimismo se habla de contaminación del suelo a la originada por la deposición húmeda de contaminantes atmosféricos transferidos a través de la lluvia. Por otra parte, han nacido preocupaciones debido a la poca regulación de contaminantes emergentes como por ejemplo los de la industria farmacéutica, así como residuos biológicos hospitalarios los cuales incluyen virus y bacterias (Rodríguez et al., 2019).

El ascenso de la minería artesanal e ilegal en Ecuador, ha causado un incremento de contaminación por metales pesados en la provincia de El Oro, siendo este un agente causal de severos daños en sectores próximos a ríos o efluentes, siendo las zonas más afectadas hasta el momento los cantones de Zaruma y Portovelo, debido a que la actividad minera se centra en las proximidades del río Puyango. Los principales metales extraídos en bruto de las plantas de procesamiento son oro y plata. (Oviedo, Moina, Naranjo, & Barcos, 2017).

La ubicación de las plantas de procesamiento ocurre en las riberas de los ríos, en donde se llevan procesos para el enriquecimiento del mineral, procesos que van desde la reducción del mineral en bruto hasta finalizar en la fase de lixiviación. Para el proceso de extracción que ocurre en las piscinas de lixiviación se utiliza cianuro (CN<sup>-</sup>), al finalizar los residuos son desechados a los ríos, lo que causa un gran impacto ambiental debido a su alto nivel de toxicidad, varios estudios demuestran que las concentraciones de metales pesados en los suelos de Ecuador superan los límites de acuerdo a las normativas establecidas dentro del país. (Oviedo et al. 2017).

En este contexto, es importante efectuar un estudio orientado a analizar los suelos de la finca “Pagua”, ubicada en el cantón El Guabo, a fin de conocer la incidencia de la actividad minera en la zona; por tanto, se plantea como problema de investigación:

- ¿Cuáles son las propiedades físico – químicas y de variabilidad espacial de suelo afectado por el vertido minero en la finca “Pagua”?

#### **Objetivo General:**

- Determinar las propiedades físico-químicas en la superficie de la finca “Pagua”, evaluando la variabilidad espacial de los elementos más contaminantes del vertido minero.

#### **Objetivos específicos:**

- Analizar las propiedades físico-químicas y variabilidad espacial correspondientes a la superficie de la finca.
- Establecer el comportamiento del contenido de metales pesados empleando el krigiado con el propósito de desarrollar mapas que permitan una mejor comprensión sobre la distribución de los mismos.



## CAPITULO II

### II. REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1. Funciones del suelo en los ecosistemas

El suelo constituye el lugar de mayor importancia para los ecosistemas, ya que en este se establecen los seres vivos para el desenvolvimiento de sus actividades fundamentales para la subsistencia de las especies. El cumplimiento de las funciones edáficas dentro del ecosistema depende de su calidad, esto es, que tenga la capacidad para proteger y conservar la productividad biológica, la calidad del entorno, así como la salud de la vegetación y los animales (Tello, 2018).

La alteración de la composición y las características del suelo incidirá directamente en sus funciones de producción y sostenibilidad de la vida. Entre las principales amenazas a la calidad del suelo están:

- ✓ Erosión.
- ✓ Disminución de los niveles de carbono orgánico (CO).
- ✓ Procesos de acidificación de los terrenos.
- ✓ Contaminación.
- ✓ Inundación de regiones.
- ✓ Aumento de la compactación.
- ✓ Sellamiento superficial.
- ✓ Degradación del suelo por salinización.
- ✓ Desequilibrio de nutrientes.
- ✓ Disminución de la biodiversidad (Aguirre et al., 2019).

El contrarrestar las situaciones antes citadas mediante un control y manejo adecuado de los suelos permitirá reducir los riesgos de vulnerabilidad, y por el contrario mantendrá la funcionalidad de un terreno para sostener la flora y fauna, conservar el agua y aire, así como brindar salud al ser humano en un hábitat seguro.

#### 2.2. Propiedades fisicoquímicas del suelo

Conforme a la función o sistema de producción para el cual esté destinado el uso de un suelo, se debe establecer la calidad del mismo. De esta forma, se requiere medir determinados parámetros denominados indicadores; que tiene por finalidad resumir o simplificar datos importantes respecto a la composición o condición de interés que se quiere conocer, cuantificar, medir y comunicar de manera comprensible. En el ámbito del

estudio de los suelos se pretende valorar las características físicas y químicas en un determinado tiempo y espacio específico, permitiendo identificar el nivel de calidad del mismo (Calderón, Bautista & Rojas, 2018).

La utilización de una serie mínima de características contribuye a conseguir datos en un menor tiempo y costo, en comparación con grades bases de datos, que por lo general no se encuentran disponible o actualizadas, por tanto, los indicadores sobre de calidad de los suelos deben abarca los siguientes aspectos:

- ✓ Las características físicas, químicas y biológicas del suelo.
- ✓ Exponer los procesos del ecosistema.
- ✓ Describir las condiciones de sostenibilidad.
- ✓ Aspectos climáticos.
- ✓ El uso del suelo y sus variaciones por acción antropogénica (Castillo, Etchevers, Hidalgo & Aguirre, 2021).

Esta información, debe ser presentada de forma comprensible y estar disponible a los distintos usuarios, formando parte de bases de datos ya existentes.

### **2.2.1. Propiedades físicas de un suelo**

Las propiedades físicas del suelo comprenden un conjunto de parámetros relacionados con la textura, densidad real y densidad aparente.

#### **2.2.1.1. Textura**

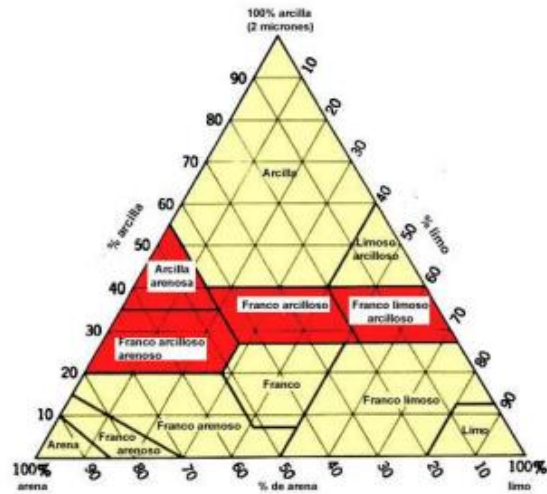
La textura es una propiedad que describe la composición de los elementos inorgánicos del suelo, tales como: arena, arcilla y limo. Estos aspectos hacen referencia al nivel de fertilidad del suelo, así como, indica la capacidad del suelo para retener agua, aire y materia orgánica (Novillo et al., 2018).

#### **2.2.1.2. Densidad aparente**

La densidad aparente del suelo es la relación entre la masa y el volumen de las partículas del suelo, siendo un indicador importante para determinar la calidad de un terreno (Novillo et al., 2018), permitiendo la valoración del grado de porosidad, compactación, aireación, drenaje, adición de materiales y capacidad de crecimiento de las raíces, debido a sus relaciones con estos aspectos (Lozano, 2018; Salazar-Calvo et al., 2020).

Asimismo, la densidad aparente cambia en función de la textura como

consecuencia de las actividades de labranzas, tipo de cultivo, cantidad de materia orgánica y humedad del suelo (Rasche Alvarez et al., 2020).



**Figura 1.** Diagrama triangular de las clases texturales

**Fuente.** FAO, (2021)

### 2.2.1.3. Densidad real

La densidad real, también llamada peso específico o gravedad específica, hace referencia al cociente entre el peso de las partículas y el volumen ocupado por éstas, la cual se expresa en términos de gramos por centímetro cúbico ( $\text{g cm}^{-3}$ ) (Lozano, 2018). La densidad real es definida por la mineralogía y composición química del suelo en su estado sólido (Novillo et al., 2018)

Las variaciones que haya en ella van en dependencia del contenido de materia orgánica y la composición de minerales influyentes, es decir, de su composición mineralógica (Villaseñor, 2016).

**Tabla 1.** Densidad Real según el tipo de suelo

Tipo de suelo	Rango de Densidad Real ( $\text{g cm}^{-3}$ )
Arcilloso	2.67 – 2.90
Limoso	2.65 – 2.70
Arenoso	2.63 – 2.67
Orgánico	<2

**Fuente:** (Das, 1997).

#### **2.2.1.4. Porosidad total (Pt)**

El factor físico de porosidad en el suelo conlleva al ordenamiento característico de espacios vacíos para el transporte de agua y disponibilidad de nutrientes para las plantas, la infiltración de agua se obtiene mediante la cantidad relativa y distribución de espacios porosos a partir de criterios morfológicos como tamaño y forma de los poros, y sus cambios en el perfil del suelo (González et al., 2004).

Es una de los principales factores físicos, ya que son indispensables para evaluar la calidad de un suelo dado, debido a que sus elementos no pueden ser modificados fácilmente, los valores críticos de las propiedades físicas, son utilizados y validados para condiciones específicas ya que son características importantes de la estructura y sus funciones (Ingaramo, 2003). La porosidad del suelo es el resultado de la relación matemática entre la densidad aparente y real del suelo, y puede ser calculada mediante la siguiente ecuación:

$$Pt = \left(1 - \frac{da}{dr}\right) \times 100$$

**Ecuación 1.** Ecuación para determinar la porosidad total del suelo

#### **2.2.2. Propiedades químicas del suelo**

Las propiedades químicas del suelo están relacionadas con el estudio de aspectos como: pH y conductividad eléctrica.

##### **2.2.2.1. pH**

El potencial de hidrógeno (pH) permite definir el nivel de acidez o alcalinidad del suelo, en función a una escala que varía entre el 0 al 14, dividida en:

- ✓ Del 0 al 6 la sustancia es ácida al disolverse en agua.
- ✓ El 7 la sustancia es neutra al disolverse en agua.
- ✓ Del 8 al 14 la sustancia es alcalina o base (Ramos & Pérez, 2021).

El pH del suelo es un indicador relevante de su salud, ya que tiene incidencia en la cantidad de nutrientes y el mantenimiento del ecosistema; en este sentido, un pH entre 6 y 7, corresponde generalmente a un suelo fértil; por tanto, el pH es un factor determinante del tipo de flora y fauna de una región (FAO, 2017).

### 2.2.2.2. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) del suelo hace referencia a la capacidad de este para conducir o transmitir corriente eléctrica, que dependiendo de la saturación del mismo es un parámetro que mide la cantidad de sales disueltas (Machado, 2009). Esta propiedad se mide en deci Siemens por metro cuadrado ( $\text{dS m}^{-1}$ ), donde un  $1 \text{ dS m}^{-1}$  es igual a  $0.64 \text{ g l}^{-1}$  de sales disueltas (Salazar, 2018).

En base a la conductividad eléctrica es posible determinar la salinidad del suelo, por ende, clasificarlo en tres grupos:

- ✓ **Suelos salinos:** cuando la CE es mayor a  $4 \text{ dS m}^{-1}$ , la adsorción de sodio mayor del 13% y el sodio intercambiable es menor del 15%.
- ✓ **Suelos sódicos:** cuando el CE es menor al  $4 \text{ dS m}^{-1}$ , la adsorción es menor al 13% y el sodio intercambiable es menor al 15%.
- ✓ **Suelos salinos – sódicos:** cuando el CE es mayor a  $4 \text{ dS m}^{-1}$ , adsorción mayor al 13% y el sodio intercambiable mayor al 15% (Delgado et al., 2022)

### 2.3. Variabilidad espacial

El estudio de la variabilidad es importante para el tratamiento eficaz y mejora de la calidad del suelo, con la ayuda de mapas digitales es posible conocer la heterogeneidad espacial de las propiedades de un terreno (Santiago et al., 2018).

El suelo está conformado por diversos componentes geológicos, físicos, químicos y ambientales, en este sentido, el análisis de la variabilidad de las propiedades del mismo permitirá determinar perfiles del suelo, los cuales viabilizan el desarrollo de estructuras geotécnicas y/o para usos agrícolas (Molina et al., 2018). Por tanto, la variabilidad espacial se emplea para el análisis general de las propiedades químicas, biológicas y físicas de un determinado suelo; este tipo de estudios debe contemplar también la variabilidad temporal de un campo, siendo de gran ayuda para un adecuado uso de los suelos (Villazón et al., 2022).

### 2.4. Geoestadística

La geoestadística es una rama de la estadística aplicada, especializada en modelación y análisis de la variabilidad espacial en ciencias del suelo (Pacheco et al., 2016). En los últimos años se ha transformado en una útil herramienta, usado para demostrar cuál es la variación de propiedades en el espacio, con la finalidad de conocer el rango de influencia

y estimar los valores dónde no existe información, además de calcular el error de estimación efectuada (González et al., 2007).

#### 2.4.1 Etapas de análisis geoestadístico

Según Dörner et al., (2016), un análisis geoestadístico se debe realizar en tres etapas:

- ✓ Predicción espacial.
- ✓ Análisis exploratorio de datos.
- ✓ Análisis estructural.

#### 2.5. Semivarianza

La semivarianza es una medida de similitud entre dos sitios de muestreo a una distancia controlada para determinar la variabilidad espacial del suelo. Para este tipo de análisis se utiliza un diseño anidado en una parte del área experimental, con el fin de determinar las distancias de muestreo más idóneas, en caso de no cubrir en totalidad el área estudiada se realiza otro anidado igual al anterior (Jaramillo, 2012).

La semivarianza se estima por medio de la siguiente ecuación:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2,$$

**Ecuación 2.** Ecuación para estimar la semivarianza.

**Fuente:** (Jaramillo, 2012).

#### Donde:

$\gamma(h)$  : Semivarianza.

$N(h)$ : Número de pares de observaciones comparadas cada distancia (debe ser > 50)

$Z(x_i)$ : Valor de la variable en el sitio x.

$Z(x_i + h)$ : Valor que toma la variable en otro sitio ubicado a una distancia h del sitio x.

El procedimiento básico para llevar a cabo el análisis de semivarianza es el siguiente:

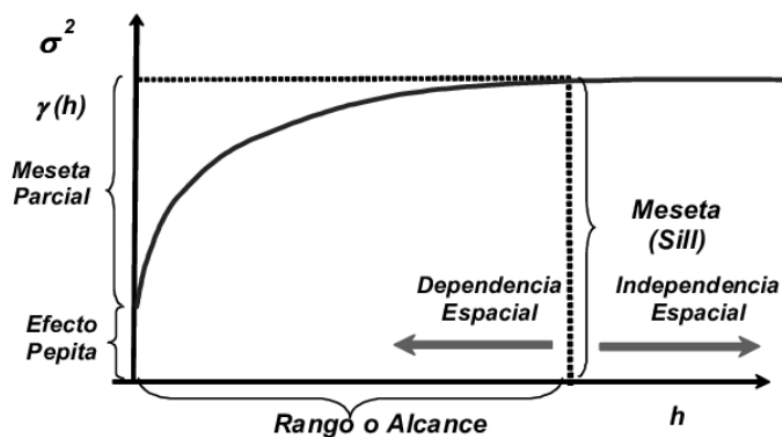
- ✓ Definir distancias de muestreo.
- ✓ Ubicar puntos de muestreo en campo y georreferenciar en coordenadas (x, y) o en tres (x, y, z), verdaderas o artificiales.
- ✓ Realizar el muestreo cuidadosamente para no confundir muestras.
- ✓ Se debe tener sumo cuidado en la elaboración de la base de datos con los resultados de la evaluación de las variables que se estudian.

- ✓ Una vez realizada la base de datos completa se debe hacer un análisis exploratorio de los mismos con el fin de comprobar que la distribución es normal o, por lo menos, que no hay asimetría. Detectar valores anómalos o extremos. Comprobar que no hay tendencia espacial.
- ✓ Se obtiene el semivariograma y se analizan sus características.
- ✓ Se hacen los análisis complementarios, según las aplicaciones que se hayan definido para el estudio (Jaramillo, 2012).

## 2.6. Semivariograma

Es una gráfica que relaciona la semivarianza de puntos de muestreo que analiza el comportamiento espacial de una variable sobre un área determinada conforme se incrementa la distancia de separación entre ambas, se utiliza un semivariograma no transicional cuando la semivarianza aumenta monótonamente con la distancia y no llega a estabilizarse dentro del rango de distancias que se utilizan para el muestreo, en cambio, se obtiene un semivariograma limitado cuando la semivarianza llega a estabilizarse a una determinada distancia (Oliver, 2010).

Se obtiene un gráfico de puntos (semivariograma experimental) cuando se presentan los valores de la semivarianza correspondientes a cada intervalo de distancia (lag en inglés). A este semivariograma se le ajusta un modelo matemático denominado semivariograma teórico (Figura 2)



**Figura 2.** Principales elementos de semivariograma

**Fuente:** (Rica, 2007)

- ✓ **Nugget, efecto pepita o variabilidad aleatoria (Co):** es la ordenada de origen del semivariograma, representando la suma de los errores no espaciales, aleatorios o asociados. Al obtener un elevado valor en el nugget, indica que la variación ocurre en menores distancias a comparación con la mínima distancia que separa dos observaciones en la grilla de estudio (Cisneros et al., 2016).
- ✓ **Variabilidad estructural (C1):** También conocido como partial sill, es la línea recta que se prolonga indefinidamente (asíntota) (Cisneros et al., 2016).
- ✓ **Varianza Umbral o Sill:** También se conoce como meceta, se obtiene sumando las varianzas anteriores ( $Co + C1$ ) y es la varianza de observaciones independientes (Cisneros et al., 2016). Cuando el sill no se vuelve constante con ninguna distancia utilizada en el muestreo, indica que la zona estudiada no presenta variabilidad espacial, entonces, el modelo más simple a adaptarse a los datos, es lineal (Jaramillo et al., 2008).
- ✓ **Rango o alcance (a):** Se define como la distancia hasta la cual hay dependencia espacial entre las muestras, las relacionadas espacialmente son aquellas que son tomadas a una distancia menor al rango, en cambio, espacialmente independiente, aquellas que se toman a una mayor distancia al rango (Jaramillo, 2012).

Según Jaramillo (2012), el grado de dependencia espacial de las propiedades del suelo es muy variable. Si se establece el porcentaje que le corresponde a la variabilidad aleatoria (nugget) de una propiedad dentro de la variabilidad total (sill), puede estimarse el grado de dependencia espacial que tiene. (Cambardella et al., 1994), establecieron tres categorías para agrupar la importancia de la variabilidad espacial de acuerdo con dichos porcentajes:

- ✓ Fuerte dependencia espacial nugget < 25 % del sill
- ✓ Moderada dependencia espacial nugget entre 25 y 75 % del sill
- ✓ Débil dependencia espacial nugget > 75 % del sill.

## 2.7. Método de interpolación

### 2.7.1. Kriging

Es una técnica que permite hacer interpolaciones óptimas y no sesgadas de variables regionalizadas en sitios no muestreados, utiliza un grupo de datos iniciales y las propiedades de un semivariograma. Presenta ventaja ante los demás métodos debido a que cada valor interpolado se le calcula el error con que ha sido estimado, lo que lo hace más preciso (Webster & Oliver, 2007).



$$\mathbf{W} = \mathbf{C}^{-1} * \mathbf{d}$$

### **Ecuación 3.** Ecuación de Kriging

**Fuente:** (Villatoro et al., 2008).

#### **Dónde:**

**C<sup>-1</sup>:** Inversa de la semivarianza para un punto conocido.

**d:** semivarianza de la distancia del punto desconocido al punto conocido.

Díaz, (2002); agrupa a los diversos grupos de kriging de la siguiente manera:

- ✓ Con estimadores lineales (Simple, ordinario, universal, residual).
- ✓ Con estimadores no lineales (Indicador, disjunto, probabilístico).
- ✓ Paramétricos (Logarítmico, disjunto, multigaussiano).
- ✓ No paramétricos (Simple, ordinario, universal, residual, indicador, probabilístico).
- ✓ Sin estacionaridad (Universal, indicador, disjunto, probabilístico, multigaussiano).

## **2.8. Minerales**

Los minerales son sustancias sólidas (excepto el mercurio) de origen natural, con una composición generalmente definida, con una estructura de ordenación de átomos cristalina (aunque existen mineraloides con un bajo grado de ordenación cristalina) (Porta et al., 2019).

Los minerales pueden componerse de un solo elemento químico, como por ejemplo el Carbono, dos elementos como la Pirita, que está formado por Hierro y Azufre, o de tres elementos como el feldespato o los piroxenos. Los elementos químicos como el oro, plata, cobre, etc., también se los considera minerales o elementos nativos (Vallejo, 2014).

## **2.9. Minería**

La minería se la define como el proceso físico y selectivo de obtener minerales presentes en la corteza terrestre, que tienen una composición y propiedades químicas específicas y constantes (Vilela et al., 2020). Es una ciencia que engloba una serie de técnicas y operaciones que tienen el propósito de identificar y explotar yacimientos de minerales para posteriormente procesarlos; esta actividad incluye minería a cielo abierto,

canteras, combinación de operaciones, y dragado aluvial (Gómez, 2018).

La actividad minera en el Ecuador es muy reconocida entre los países de Latinoamérica debido a su riqueza en recursos naturales, destacándose en petróleo y minerales. En los años 70, la extracción y explotación minera, fundamentalmente crudo, constituyó un factor clave para el desarrollo del país. La normativa vigente para su regulación es la Ley de Minería del año 2009, cuyo propósito es reglamentar las operaciones de minería de gran escala, obtener recursos para el Estado y que esta actividad forme parte importante en el modelo económico del país (Tapia, 2018).

Asimismo, la Constitución de la República del 2008, establece los límites para el desarrollo sostenible de la minería, tales como:

- ✓ **Art. 14:** las operaciones mineras deben desarrollarse bajo principios de sostenibilidad.
- ✓ **Art. 72:** la naturaleza tiene derechos, por tanto, se debe considerar su restauración luego del proceso de explotación, además de indemnizar de ser el caso a las comunidades afectadas.
- ✓ **Art. 313:** la explotación de los recursos (entre ellos minería) pertenece a los sectores estratégicos del país, por lo que sus actividades deben orientarse al interés social y cumplimiento de derechos.
- ✓ **Art. 319:** el Estado desincentivará las operaciones de explotación de recursos que incumplan los derechos de la naturaleza (Constitución de la República del Ecuador, 2008).

En el Ecuador, se desarrollan los siguientes tipos de minería: artesanal, pequeña y mediana.

- ✓ **Minería artesanal:** tipo de minería que se práctica en gran parte del país, para la obtención de metales preciosos, ya sea de los ríos, a cielo abierto o por túneles. Las personas que laboran de forma artesanal obtienen al menos 3 gramos de minerales al día. Sus operaciones son contaminantes, debido al uso de cianuro y mercurio, siendo un grave problema de salud para los propios mineros que manipulan estas sustancias sin medidas de protección, en este sentido, estas actividades carecen de conocimientos técnicos-científicos.
- ✓ **Pequeña minería:** sus labores se desarrollan por medio de organizaciones conformadas por accionistas, pertenecientes generalmente a grupos familiares, quienes aportan efectivo y maquinarias. Entre las formas de organización están el

condómino minero y la cooperativa minera, las cuales deben estar registradas en la Subsecretaría de Minas y en la Agencia de Regulación y Control Minero, ARCOM.

- ✓ **Mediana minería:** sus operaciones requieren mayor esfuerzo de hasta tres turnos por día, en la cual se utilizan maquinarias de mayor tecnología, así como un personal más amplio.
- ✓ De acuerdo a información del SRI de año 2017, el sector minero contribuyó con USD 717 millones por concepto de impuestos (Vásconez & Torres, 2018).

## 2.10. Vertido minero

Las operaciones mineras generan complejos de Pb-Ag-Zn en el mundo, que por su bajo valor e interés económico son almacenados en botadores o mantenidos en diques de colas. Los sitios antes mencionados comprenden residuos acumulados de las operaciones mineras, las cuales deben ser objeto de cierre ambiental, principalmente si no son químicamente estables, ya que pueden generar drenajes de ácido hacia el interior de las rocas. Es fundamental que los residuos mineros provenientes de la operación minera, sean tratados, a fin de evitar que éstos entren en contacto con el agua, por medio de la lluvia y/o afluentes, así como por el oxígeno del aire, es decir, una vez finalizada de las operaciones mineras, se deben emprender acciones ambientales orientadas a cerrar estos sitios de residuos mineros (Zamora et al., 2019).

Los vertidos mineros, pueden ocasionar problemas ambientales respecto a la formación de las denominadas “aguas de contacto mineras”, cuyos efectos se reflejan en el ambiente y el ser humano, como resultado de la contaminación química del agua, la cual puede tomar contacto directo con los ríos o ser filtradas a los cauces de agua natural. Entre las afectaciones de este tipo de aguas contaminadas por vertidos mineros se encuentran:

- ✓ En la **agricultura**, las aguas contaminadas afectan los terrenos agrícolas, al modificar su composición, haciendo perder cosechas e inutilizando los suelos agrícolas.
- ✓ En la **ganadería**, las aguas contaminadas son fatales para los animales, que en ocasiones se puede expandir esta contaminación por medio de la ingesta de esta ganadería afectada.
- ✓ En la **filtración de pozos**, tomando en cuenta que aun existen localidades que extraen agua de pozos para su uso y consumo diario. Las filtraciones de los

residuos mineros pueden afectar las aguas subterráneas, poniendo en peligro la salud de las personas en el largo plazo.

- ✓ En los **ecosistemas** (flora y fauna), las aguas contaminadas por vertidos mineros tienen un impacto ambiental en la vegetación por la exposición a sustancias contaminantes, modificando el relieve y la dinámica del entorno natural, respecto a la fauna, esta puede ocasionar la muerte de animales e incluso la extinción de especies de una región específica (Peña & Araya, 2021).

## **2.11. Metales pesados**

Los metales pesados están presentes de manera natural en el suelo, generalmente en cantidades no perjudiciales para los seres vivos. No obstante, la actividad antrópica o intervención humana mediante la explotación de los recursos naturales puede modificar la concentración de estos elementos, tales como la minería, la eliminación de residuos sólidos domésticos e industriales o por infiltración por aguas contaminadas, lo cual puede ocasionar riesgos en la salud de la población (Sánchez et al., 2020).

Algunos metales pesados son el cobre, zinc y manganeso, que en bajas concentraciones son esenciales para el metabolismo y crecimiento microbiano del suelo. Mientras que, otros metales pesados como la plata, oro, plomo y cadmio no son requeridos, por ende, son tóxicos para el suelo y los ecosistemas (Aguirre et al., 2022). Siendo la minería unas de las fuentes generadoras de riqueza más importantes, su desarrollo tiene un gran impacto en el ambiente, ocasionado la destrucción de hábitats y generando grandes cantidades de residuos, lo que eleva las concentraciones de metales pesados, entre otros elementos como sulfuros metálicos, materiales son perjudiciales para el desarrollo de la vida en general (Mendoza-Jiménez et al., 2021).

### **2.11.1. Cadmio (Cd)**

Es un elemento que no se obtiene como mineral específico, más bien, es un coproducto de la metalurgia extractiva del zinc, cobre y plomo, por ser un elemento bastante móvil

se encuentra en proporciones 0,3 a 0,5% en diferentes perfiles del suelo y profundidades.

La aplicación de fertilizantes de fosfato son la principal entrada de cadmio a las plantas, ejerciendo su acción tóxica y causando desordenes fisiológicos (Domènech et al., 2012; IGME, 2002).

### **2.11.2. Arsénico (As)**

El Arsénico se encuentra en la atmósfera, rocas, cuerpos de agua, minerales, suelo y organismos de formas inorgánica, orgánica y metilada (Basu et al., 2014; Tsai et al., 2009; Valenzuela et al., 2009). La acumulación y presencia de este elemento en el suelo procede de procesos geoquímicos y de actividades antropogénicas como la minería (fundición de minerales que contienen arsénico), el estudio del arsénico en el suelo es importante, debido a que la ingestión accidental de suelo es una forma de exposición de los seres humanos a este metaloide, el cual va a depender de la disponibilidad del mismo (Alam et al., 2007; Bosso & Enzweiler, 2008).

### **2.11.3. Mercurio (Hg)**

Es uno de los metales pesados que mayor alarma genera debido a su toxicidad. La contaminación de mercurio en medios acuáticos es causada por procesos industriales. Mientras que, en el suelo, el mercurio genera compuestos metilados debido a la acción de bacterias anaeróbicas. Esto suele ocurrir con mayor frecuencia en los horizontes superficiales a causa de la retención de materiales arcillosos y sustancias húmicas. Por otro lado, en la naturaleza, el mercurio tiene un efecto nocivo al transformarse en metilmercurio, molécula que se acumula en el sistema nervioso, atravesando fácilmente las membranas biológicas (Domènech et al., 2012; Posada & del Pilar, 2006).

### **2.11.4. Níquel (Ni)**

El contenido de Ni en el suelo depende en gran parte de su contenido en el material parental del que proviene, además de diversas fuentes de contaminación como: minería, residuos industriales, agroquímicos, etc. Sin embargo, como metal pesado es un caso atípico, por ser a su vez, un microelemento que cumple funciones esenciales, mientras exista una deficiencia del mismo hay un retraso en el metabolismo y crecimiento de la planta, en cambio, un exceso provocaría desórdenes fisiológicos y un desequilibrio nutricional (Carrillo et al., 2018; Muñiz et al., 2015).

### **2.11.5. Plomo (Pb)**

La distribución química del plomo en el suelo depende de diversos factores como: pH, mineralogía, textura, materia orgánica y naturaleza de los compuestos de plomo contaminantes (Cala & Kunimine, 2003).

La disponibilidad de plomo en el suelo puede estar afectada, ya sea por la presencia de

grupos -SH, o por las fases solidas arcillosas, donde se absorbe químicamente. Es así que, al originarse complejos solubles e hidroxicomplejos, aumenta la solubilidad en pH alcalinos. Además, existe una relación entre las sustancias húmicas y el plomo, al igual que el mercurio al acumularse en los horizontes superficiales por la retención de arcillas (Domènech et al., 2012).

### **2.12. Contaminación puntual**

La contaminación puntual, también llamada local o edáfica, es aquella que proviene de fuentes específicas como la actividad minera, industrial o vertederos, por tanto, una contaminación puntual es identificable ya sea en el aire, agua o suelo (Ortiz & Fuentes, 2020).

La actividad minera dentro de sus etapas de exploración geológica, explotación de yacimientos y procesamientos, se identifican impactos directos de daños graves sobre el entorno, desde la deforestación de localizaciones, hasta la emisión de altas concentraciones de polvo y gases en el aire que afectan a los propios mineros ocasionando por ejemplo enfermedades respiratorias (Lima, 2021).

### **2.13. Contaminación difusa**

En la contaminación difusa no se identifica o localiza un punto determinado de polución, por tanto, existen diversos puntos dispersos en grandes zonas que impactan aire, agua y suelos. Los contaminantes de fuentes difusas son: sedimentos, metales pesados, pesticidas, patógenos, productos farmacéuticos y otros elementos químicos antropogénicos (Ortiz & Fuentes, 2020).

Respecto a la actividad minera, en sus zonas de explotación requieren por lo general grandes cantidades de agua puede ocasionar daños en la calidad del agua, asimismo se produce un incremento de metales pesados que al ser drenados, afectan a las aguas subterráneas y superficiales, lo que conlleva a la contaminación de los suelos de lugares próximos a poblaciones o impactar en cultivos, perjudicando la salud humana (Lima Arteaga, 2021).

### **2.14. Fuentes de contaminación del suelo**

La contaminación del suelo se caracteriza por tener un impacto en la salud de las personas y animales de largo plazo, en función al tiempo de exposición del suelo contaminado, las concentraciones, las vías de exposición; que pueden ser inhalación,

absorción dérmica o ingesta indirecta, así como las fuentes de exposición, por medio del polvo, agua o alimentos. Las fuentes contaminantes del suelo pueden ser: a) de origen inorgánico y orgánico.

- ✓ **Contaminantes inorgánicos:** comprende compuestos o sustancias que pueden originarse de forma natural o antropogénica, entre ellos se encuentran:
  - **Oligoelementos:** elementos tóxicos para el ser humano, que se encuentran en niveles muy bajos en el ambiente, entre ellos están los metales pesados como: el plomo, el cadmio, cobalto, cobre, cromo, níquel y zinc; mientras que en los no metales se tiene al arsénico, antimonio y selenio. Los oligoelementos tienen un origen geogénico, es decir, natural, ya que están presentes en las rocas en forma de sales, óxidos, sulfuros, entre otros, las cuales son liberados al ambiente por la acción antropogénica, por tanto, la contaminación de estos elementos a partir de fuentes puntuales, provienen de la actividad industrial, minería, vertederos sanitarios y/o vertidos petroquímicos; y, de fuentes difusas, por medio de la utilización de fertilizantes y plaguicidas (FAO & PUMNA, 2022).
  - **Radionúclidos:** hace referencia a los elementos contaminantes que generan radiaciones por la desintegración atómica, siendo considerados de alto riesgo. Su origen se en procesos naturales como la erupción volcánica o antropogénicas por la utilización del uranio o cobalto en pruebas nucleares (FAO & PUMNA, 2022)
  - **Amianto:** son fibras de silicato mineral presente en las rocas, su inhalación accidental en emplazamientos mineros puede afectar a los pulmones y laringe (FAO & PUMNA, 2022)
- ✓ **Contaminantes orgánicos:** lo constituyen aquellos compuestos que consumen oxígeno, entre ellos se encuentra los hidrocarburos clorados y los hidrocarburos aromáticos. Por su fuente de origen están los derivados del petróleo, y en menor medida la descomposición incompleta de materia orgánica en los procesos de incendios forestales. Respecto a contaminantes orgánicos sintéticos están los pesticidas, surfactantes, disolventes y pigmentos (Muñoz et al., 2019).

### 2.15. Fuentes geogénicas naturales

Las fuentes geogénicas naturales son las concentraciones existentes en el fondo de los suelos de una determinada región. Comprende el contenido natural de ciertos

elementos como los metales pesados y los radionúclidos, además de la presencia de arsénico, los cuales constituyen un alto riesgo para el entorno y la salud de las personas. Por otra parte, las erupciones volcánicas o los incendios forestales, son fenómenos naturales que pueden ocasionar contaminación. Asimismo, los hidrocarburos presentes naturalmente en el suelo pueden afectar la materia orgánica de un terreno (Rodríguez et al., 2019).

### **2.16. Fuentes antropogénicas**

Los contaminantes de fuentes antropogénicas son aquellos productos y subproductos de origen químico que son usados en operaciones industriales; comprende además los desechos domésticos, las aguas residuales, los derivados de los combustibles y los agroquímicos. La liberación de estos contaminantes se produce por medio de derrames de hidrocarburos, lixiviación de vertederos, la utilización de pesticidas y fertilizantes, así como la aplicación de aguas no tratadas o residuales en el suelo (Chacón, 2021).

## **CAPITULO III**

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1 Localización y caracterización del área de estudio**

El presente trabajo se realizó en la Finca “Pagua”, situada en la parroquia Rio Bonito del cantón El Guabo, Troncal de la Costa/E25 y vía a la Liga de Oro.

#### **3.2 Ubicación geográfica de la zona de estudio**

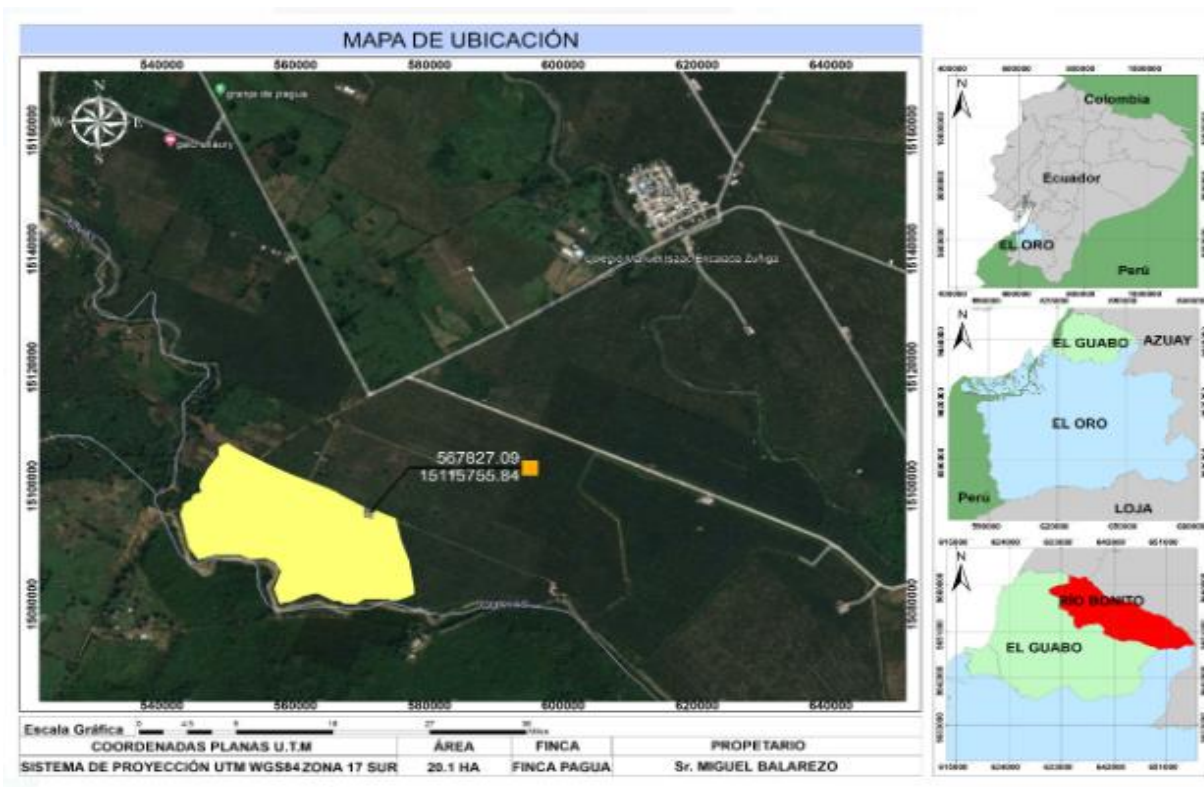
Este trabajo experimental está situado en las siguientes coordenadas:

**Latitud:** 3°3'43.63128" S

**Longitud:** 79°46'12.59148' W'

**Altitud:** 12 msnm.





**Figura 3.** Ubicación de la zona de estudio

El sitio de estudio corresponde a un bosque primario, con una precipitación promedio anual de 912,73 mm, temperatura promedio anual que oscila entre 22 – 24°C y una humedad relativa del 87% (Guerrero, 2016).

Esta zona perteneciente al cantón El Guabo, se caracteriza por ser de pendientes muy suaves, idóneas para el cultivo de banano, además presenta rasgos de región interandina (Bravo & Ricardo, 2020).

### 3.3 Características del suelo

El tipo de suelo predominante es arcilloso en un 62,80% y suelo arcilloso – limoso en un 0,90% (Bravo & Ricardo, 2020). Según (GAD Parroquial Río Bonito, 2014) dentro de los principales usos estos suelos están destinados a la ganadería y a cultivos que generan grandes ingresos económicos como el banano y cacao CCN51.

**Tabla 2.** Clases texturales predominantes de la zona de estudio

<b>Clase Textural</b>	<b>Porcentaje</b>	<b>Área (Ha)</b>
<b>Franca</b>	2,00	346,54
<b>Arcillosa</b>	22,82	3945,74
<b>Franco Limosa</b>	14,52	2511,38
<b>Franco Arenosa</b>	1,92	332,23
<b>Arcillo – limosa</b>	5,34	924,33
<b>Franco arcillo-arenosa</b>	8,68	1500,48
<b>Franco arcillo – limosa</b>	17,24	2981,79

**Fuente:** GAD Parroquial Río Bonito, (2014)

### **3.4 Diseño de estudio**

Se realizó un estudio observacional descriptivo que consiste, por un corto periodo de tiempo describir y medir un grupo de variables, en dónde no es necesario que exista un grupo control, el investigador no controla la asignación de un determinado tratamiento, únicamente observa y describe lo ocurrido (Manterola & Otzen, 2014).

En el presente trabajo se establecieron 18 puntos de muestreo, cada uno con dos profundidades (0 – 15 cm, 15 -30 cm).

- ✓ Profundidad 0 – 15 cm: Efecto de acumulación de materia orgánica y pH, teniendo en cuenta que la mayoría de compuestos como metales pesados se retienen en la capa superficial del suelo.
- ✓ Profundidad 15 – 30 cm: Contenido bajo de materia orgánica, permeabilidad moderada.

La recolección de muestras se realizó por puntos de muestreo que se ubicaron a lo largo de las líneas de funiculares dentro de la finca. Se muestreo un área total de 20,1 ha; para un total de 18 puntos muestreados, los cuales fueron georreferenciados con la aplicación Handy GPS. Para la toma de muestras superficiales (profundidad máxima de 30 cm) se utilizó un palín “recto”, finalidad obtener hasta 1 kg de suelo.

La determinación de clases texturales y propiedades físicas-química del suelo se realizaron dentro del laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Agropecuarias, utilizando el modelo explicado por Sandoval , Dörner, Seguel, Cuevas, & Rivera, (2017).

### 3.5 Croquis del experimento

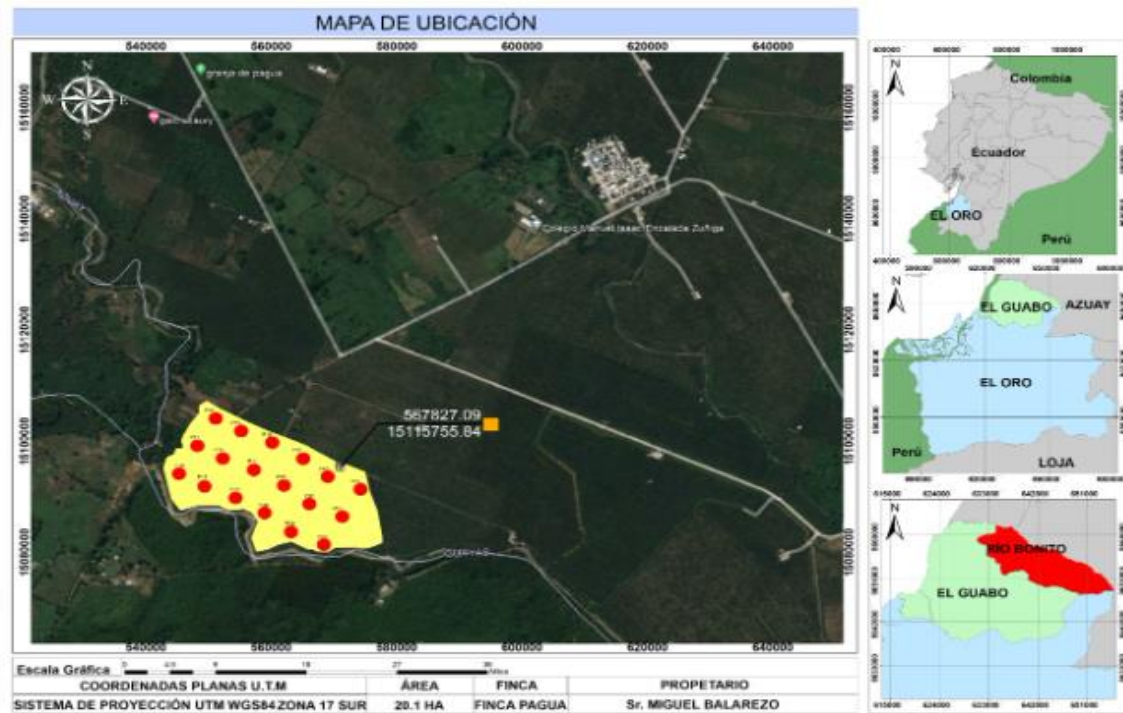


Figura 4. Croquis del experimento

### 3.6 Manejo del experimento

Para este experimento se realizó los posteriores estudios:

- ✓ Análisis de metales pesados.
- ✓ Determinación de materia orgánica
- ✓ Determinación de pH y conductividad eléctrica.
- ✓ Determinación de densidad aparente y densidad real.

### 3.7 Materiales y herramientas

#### 3.7.1 Materiales de campo:

- ✓ Cuaderno de apuntes
- ✓ Lápiz
- ✓ Cinta métrica
- ✓ Fundas negras
- ✓ Palín
- ✓ Señaladores

### 3.7.2 Materiales de laboratorio.

- ✓ Balanza de precisión
- ✓ Mufla
- ✓ Desecador.
- ✓ Crisoles
- ✓ Bandejas plásticas.

### 3.7.3 Materiales de oficina.

- ✓ Software AutoCAD 2016
- ✓ ArcGis 10.8
- ✓ Programa SPSS versión 26 (IBM, 2013)

## 3.8 Variables estudiadas

**Tabla 3.** Variables a utilizar dentro del estudio

Variable	Método a utilizar
Textura (%)	Bouyoucos
Densidad Aparente ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Cilindro metálico
Densidad Real ( $\text{g cm}^{-3}$ )	Picnómetro
Porosidad Total (%)	Relación de densidades
Materia Orgánica (%)	Método de ignición (LOI)
Potencial de hidrógeno (pH)	Potenciómetro
Conductividad Eléctrica ( $\text{dS m}^{-1}$ )	Potenciómetro
Cadmio ( $\text{mg Kg}^{-1}$ )	Absorción Atómica
Arsénico ( $\text{mg Kg}^{-1}$ )	Absorción Atómica
Mercurio ( $\text{mg Kg}^{-1}$ )	Absorción Atómica
Níquel ( $\text{mg Kg}^{-1}$ )	Absorción Atómica
Plomo ( $\text{mg Kg}^{-1}$ )	Absorción Atómica

**Fuente:** El autor.

### 3.8.1 Densidad Real (Dr)

- ✓ Secar y tamizar (2 mm).
- ✓ Pesar el balón aforado de 50 ml seco.
- ✓ Pesar el balón con agua hasta el aforo.

- ✓ Desechar el agua.
- ✓ Colocar en el balón 5 g de muestra de suelo tamizado.
- ✓ Agregar agua en el balón hasta la línea de aforo.
- ✓ Pesar nuevamente el balón con la muestra y agua.
- ✓ Determinar densidad real con la siguiente ecuación:

$$D_r = \frac{b-a}{(d-a)-(c-b)}$$

**Ecuación 4.** Ecuación para determinar Densidad Real

**Fuente:** Sandoval et al., (2017)

**Dónde:**

**a** = Peso del balón vacío.

**b** = Peso del balón + muestra de suelo.

**c** = Peso del balón + suelo + agua aforado

**d** = Peso del balón aforado con agua.



**Figura 5.** Determinación de Densidad Real

### 3.8.2 Textura y clase textural

- ✓ Se pesan 40 g de muestra de suelo seco y tamizado ( 2mm).
- ✓ Colocar la muestra de suelo ( pesado ) en un vaso de vidrio de 400-600 ml, luego agregar agua hasta la mitad del vaso.

- ✓ Adicionar 25 ml de oxalato de sodio saturado, posteriormente agitar con una varilla de vidrio y dejar reposar durante 24 horas.
- ✓ Colocar la muestra en el vaso agitador durante 3 min.
- ✓ Después de la agitación, pasar la suspensión al cilindro de sedimentación y remover todas las partículas utilizando una piceta.
- ✓ Agregar agua hasta la línea de aforo (1000 ml).
- ✓ Agitar el cilindro, hasta lograr la remoción de todo el suelo sedimentado en el fondo.
- ✓ Colocar el cilindro sobre la mesa e introducir lentamente el hidrómetro en la suspensión.
- ✓ Hacer la primera lectura del hidrómetro a los 40 segundos de iniciada la sedimentación, luego se mide con el termómetro la temperatura de suspensión.
- ✓ Realizar una segunda lectura de la densidad marcada por el hidrómetro a las 2 horas de iniciada la sedimentación, registrando también la temperatura.
- ✓ Calcular el contenido de limo + arcilla, en %, según:

$$(\text{lmo}+\text{arcilla})\% = \frac{[L_{a40s} - ((20 - t_{a40s}) \times 0,35)] - [L_{b40s} - ((20 - t_{b40s}) \times 0,35)]}{m} \times 100$$

**Ecuación 5.** Ecuación para determinar el % de Limo + Arcilla

**Fuente:** Sandoval et al., (2017)

**Donde:**

$L_{a40s}$  = lectura en  $g L^{-1}$  de muestra a los 40 s.

$L_{b40s}$  = lectura en  $g L^{-1}$  del blanco a los 40 s.

$t_{a40s}$  = temperatura en  $^{\circ}C$  de la muestra a los 40 s.

$t_{b40s}$  = temperatura en  $^{\circ}C$  del blanco a los 40 s.

**0,35** = factor de corrección por temperatura.

**M** = masa en g de muestra.

- ✓ Calcular el contenido de arcilla, en % según:

$$(\text{arcilla})\% = \frac{[L_{a_{2h}} - ((20 - t_{a_{2h}}) \times 0,35)] - [L_{b_{7h}} - ((20 - t_{b_{2h}}) \times 0,35)]}{m} \times 100$$

**Ecuación 6.** Ecuación para determinar el % de Arcilla

**Fuente:** Sandoval et al., (2017)

**Donde:**

$L_{a_{2h}}$  = lectura en g L<sup>-1</sup> de muestra a los 2h.

$L_{b_{2h}}$  = lectura en g L<sup>-1</sup> del blanco a las 2h.

$t_{a_{2h}}$  = temperatura en °C de la muestra a las 2h.

$t_{b_{2h}}$  = temperatura en °C del blanco a las 2h.

**0,35** = factor de corrección por temperatura.

**m** = masa en g de muestra

✓ Calcular el contenido de limo en % según:

$$(\text{limo})\% = (\text{limo} + \text{arcilla}) - (\text{arcilla})$$

**Ecuación 7.** Ecuación para determinar el % de Limo

**Fuente:** Sandoval et al., (2017)

**Donde:**

**(Limo + Arcilla)** = (limo + arcilla) % calculado

**(Arcilla)** = arcilla % calculado

✓ Calcular el contenido de arena, en %, según:

$$(\text{arena})\% = 100 - (\text{limo} + \text{arcilla})$$

**Ecuación 8.** Ecuación para determinar el % de arena

**Fuente:** Sandoval et al., (2017)

**Donde:**

**(Limo + Arcilla)** = (limo + arcilla) % calculado



**Figura 6.** Determinación de Textura y Clase Textural

### 3.8.3 Densidad Aparente del suelo ( $d_a$ )

- ✓ Se tomó un volumen fijo de suelo mediante un cilindro metálico.
- ✓ En el laboratorio se realizó el pesaje de la muestra húmeda con el cilindro y se lleva a una estufa a  $105^{\circ}\text{C}$  por 24 horas.
- ✓ Peso de la muestra en seco, peso del cilindro.
- ✓ Para determinar densidad aparente, se utilizó la siguiente fórmula:

$$d_a = \frac{m}{v}$$

**Ecuación 9.** Ecuación para determinar Densidad Aparente.

**Fuente:** Sandoval et al., (2017)





**Figura 7.** Toma de muestras para determinar Densidad Aparente.



**Figura 8.** Determinación de Densidad Aparente.

#### **3.8.4 Materia orgánica, Método por pérdida de ignición (LOI) o gravimétrico**

- ✓ Tomadas las muestras de suelo, se llevan al laboratorio para ser colocadas en un recipiente plástico y etiquetadas.
- ✓ Secadas y tamizadas.
- ✓ Identificar el crisol.
- ✓ Pesar el crisol limpio y seco
- ✓ Tarar la b

- ✓ alanza con el crisol y colocar en él 10 gr de las muestras.
  - ✓ Encender la mufla y colocar a 600°C, durante 60 minutos.
  - ✓ Concluido el muflado se pasan los crisoles al desecador hasta que se enfríe.
  - ✓ Pesar las muestras una vez más con la muestra.
  - ✓ Calcular el porcentaje de materia orgánica con la siguiente fórmula:
- % MO:**  $((\text{Peso del crisol} + \text{Peso de la muestra}) - (\text{P. muestra secado en la mufla})) * \% \text{ Carbono}$

**Ecuación 10.** Ecuación para determinar el % de Materia Orgánica

**Fuente:** Sandoval et al., (2017)



**Figura 9.** Muflado de muestras para determinar Materia orgánica

### 3.8.5 Potencial de hidrógeno (pH)

Para determinar el indicador de pH se utilizó el potenciómetro Hanna Instruments (HI98131):

- ✓ Solución saturada relación 1:2 de suelo y agua destilada.
- ✓ Se colocar la mezcla en un recipiente plástico.
- ✓ Agitar durante 3 minutos.
- ✓ Luego de agitar dejar reposar por 30 min.
- ✓ Luego tomar la lectura de pH.

### 3.8.6 Conductividad eléctrica (C.E.)

Los valores de conductividad eléctrica se obtuvieron de una muestra de solución relación 1:2 utilizando un potenciómetro Hanna Instruments (HI98131), unidad dS m<sup>-1</sup>.

#### Procedimiento estadístico

Las variables estudiadas en el laboratorio de suelos fueron sometidas al software IBM SPSS STATISTICS 25, donde se realizó un análisis descriptivo, y pruebas de normalidad para determinar si la distribución de los datos es normal y poder realizar una mejor predicción de los datos en el análisis geo estadístico para la creación de mapas, además se realizó un análisis de correlación lineal de Pearson con la finalidad de conocer cuán asociadas están las variables entre sí.

#### Análisis geoestadístico

Se realizó y subió una base de datos en el software ArcMap 10.3 para determinar los semivariogramas experimentales de las variables estudiadas, se obtuvo el error cuadrático medio de la variable y se validaron los métodos con los valores predichos por el software 10.3, con el que se establecieron los coeficientes de Pearson y Nash.

#### Coefficiente de Nash- Sutcliffe

Método de normalización de la función de mínimos cuadrados, que determina la magnitud relativa de la varianza residual con respecto a la varianza de los datos medidos. Según Albuja & Tenelanda, (2014), un ajuste negativo indica que el modelo es pobre y no se ajusta a los datos observados, en cambio, mientras más se acerque 1, mayor será el grado de cumplimiento.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{o_i} - Q_{s_i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{o_i} - \bar{Q})^2}$$

**Fuente:** (Albuja & Tenelanda, 2014)

## **Coefficiente de determinación ( $R^2$ )**

Esta medida es el coeficiente de determinación, que es el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson, que da la proporción de la varianza de una variable (Y) que es explicada por una variable (X); estos valores explican si el modelo tiene un ajuste perfecto cuando es igual o cercano a 1, cuanto más se desvía de 1, más pierde su facultad predictiva (Martínez, 2005).

## **Error cuadrático medio (RMSE)**

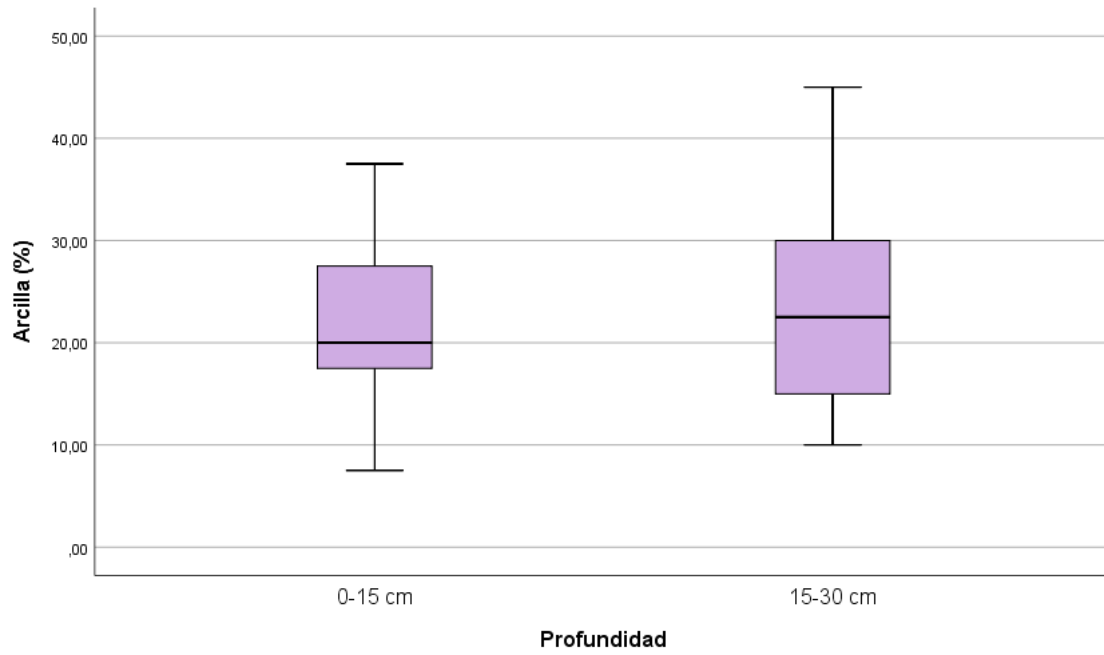
Efectúa la diferencia entre los valores calculados y reales, estas diferencias se elevan al cuadrado y se promedian. Como su nombre indica, se calcula la raíz cuadrada de esta media. El RMSE mide el tamaño del error (Negrón, 2014).

## **CAPITULO IV**

### **IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

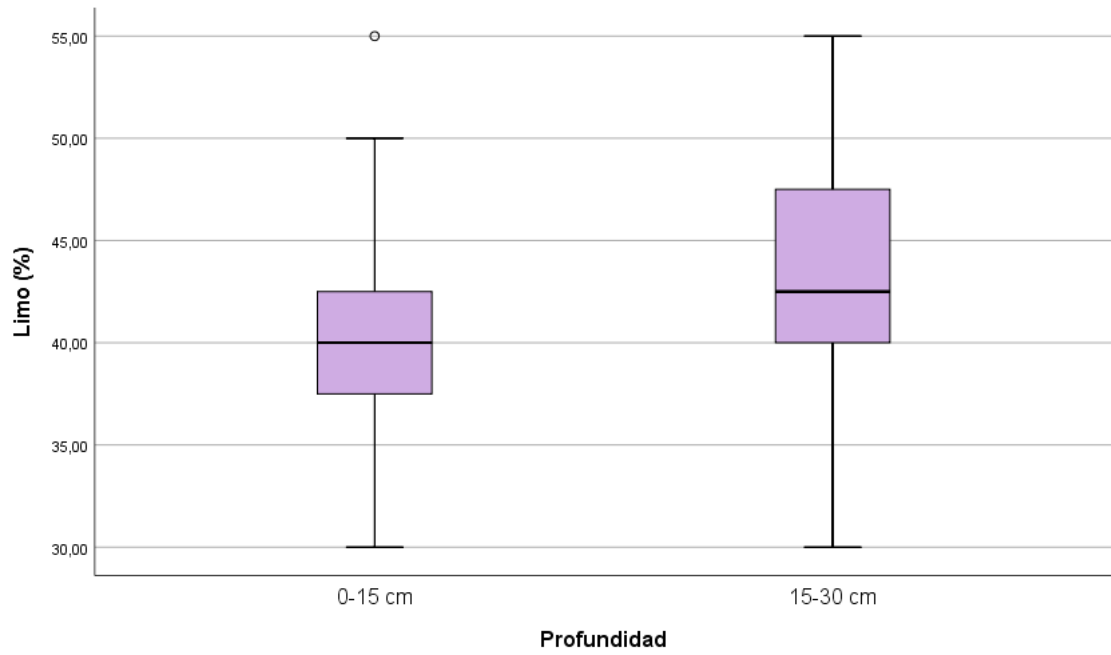
#### **4.1 Análisis exploratorio de las propiedades físicas y químicas del suelo**

El diagrama de caja y bigotes permite comparar de una manera más simple la dispersión y distribución del porcentaje de Arcilla (Figura 11) en dos profundidades, de acuerdo a esto el porcentaje más alto de arcilla (45%) se encuentra en el estrato de 15 – 30 cm y el más bajo es de (7,50%) en los primeros 15 cm, debido al origen aluvial de los mismos, la mayor variabilidad de datos se presenta en el segundo estrato.



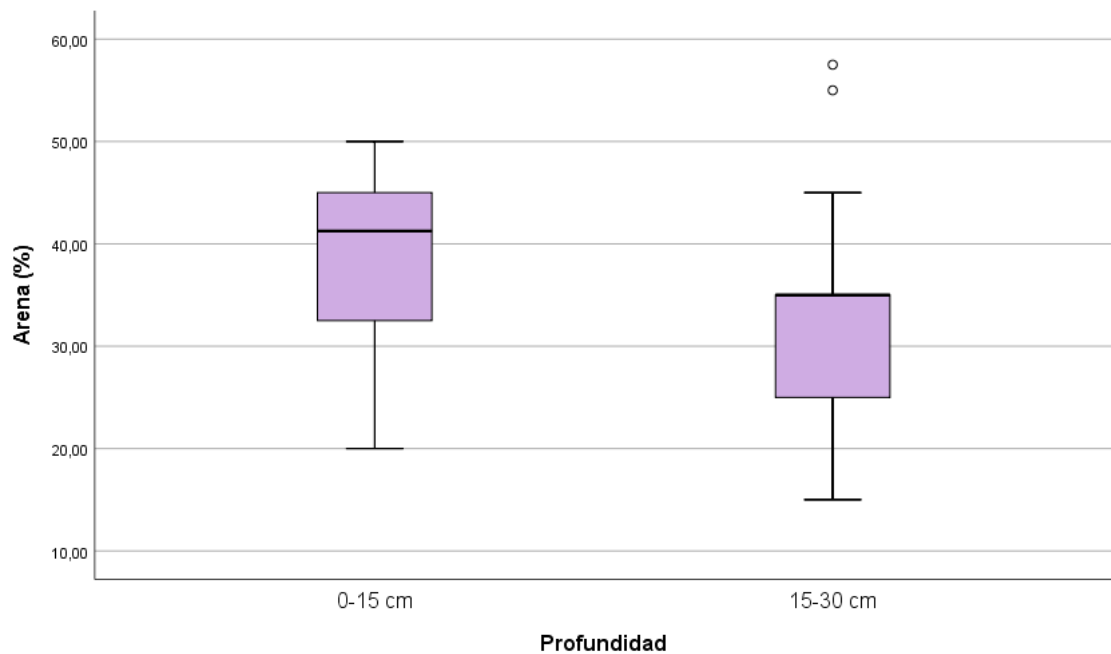
**Figura 10.** Diagrama de caja y bigote de porcentaje de Arcilla en 2 profundidades de estudio

Comparando las dos profundidades el mayor porcentaje de limo (55%) se encuentra en la profundidad de 15 – 30 cm debido probablemente a la eluviación de sus partículas a estratos inferiores y el mínimo (30%) en los primeros 15 cm, la mayor variabilidad se encuentra en el segundo estrato (Figura 11).



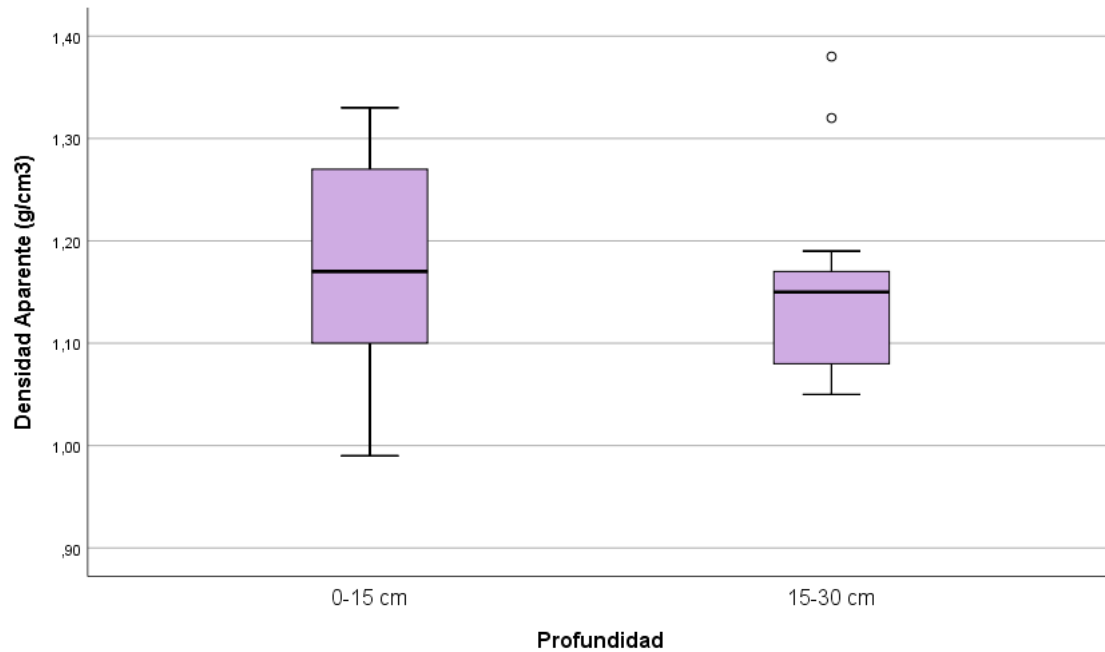
**Figura 11.** Diagrama de caja y bigote de porcentaje de Limo en 2 profundidades de estudio

En la Figura 12, el mayor porcentaje de arena (50%) se encuentra en los primeros 15 cm y el mínimo (15 %) en el estrato de 15 – 30 cm, la mayor variabilidad se encuentra en el primer estrato.



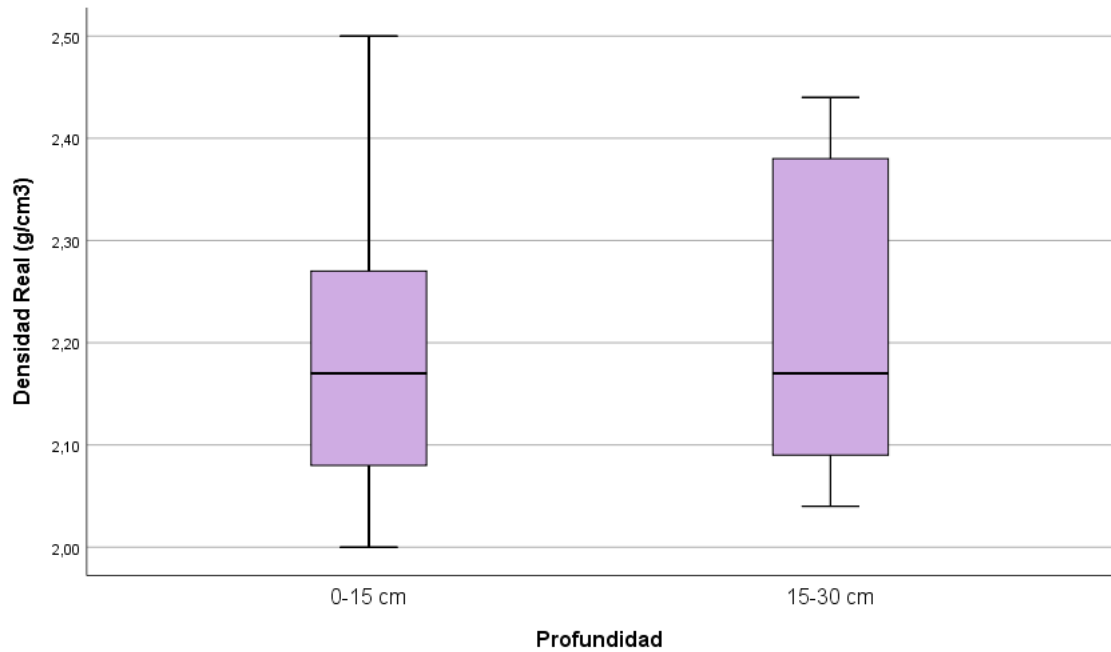
**Figura 12.** Diagrama de caja y bigote de porcentaje de Arena en 2 profundidades de estudio

En la Figura 13, la mayor variabilidad de Densidad Aparente en dos profundidades, se encuentra en la profundidad 0 -15 cm con un valor máximo de  $1,38 \text{ g. cm}^{-3}$  y mínimo de  $0,99 \text{ g. cm}^{-3}$ , de acuerdo con Salamanca & Siavosh, (2005), está relacionado con la humedad del suelo debido a la ausencia de coberturas.



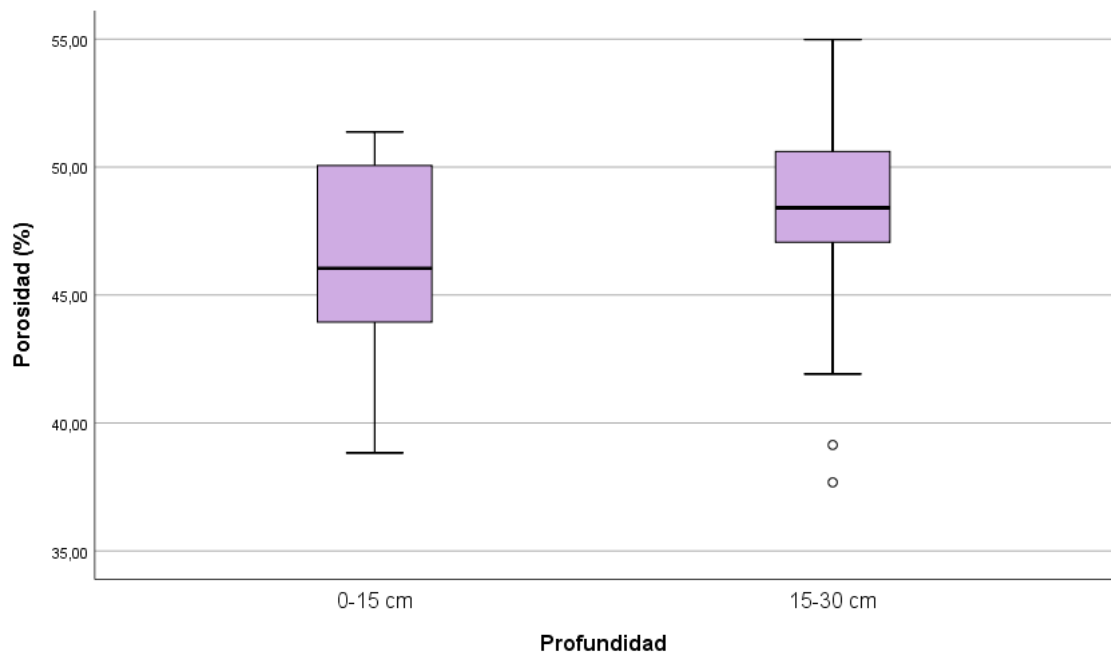
**Figura 13.** Diagrama de caja y bigote de Densidad Aparente en dos profundidades de estudio.

En la Figura 14, la mayor variabilidad de Densidad Real en dos profundidades, se encuentra en los primeros 15 cm, con un valor máximo de  $2,00 \text{ g. cm}^{-3}$  y mínimo de  $2,50 \text{ g cm}^{-3}$ .



**Figura 14.** Diagrama de caja y bigote de Densidad Real en dos profundidades de estudio.

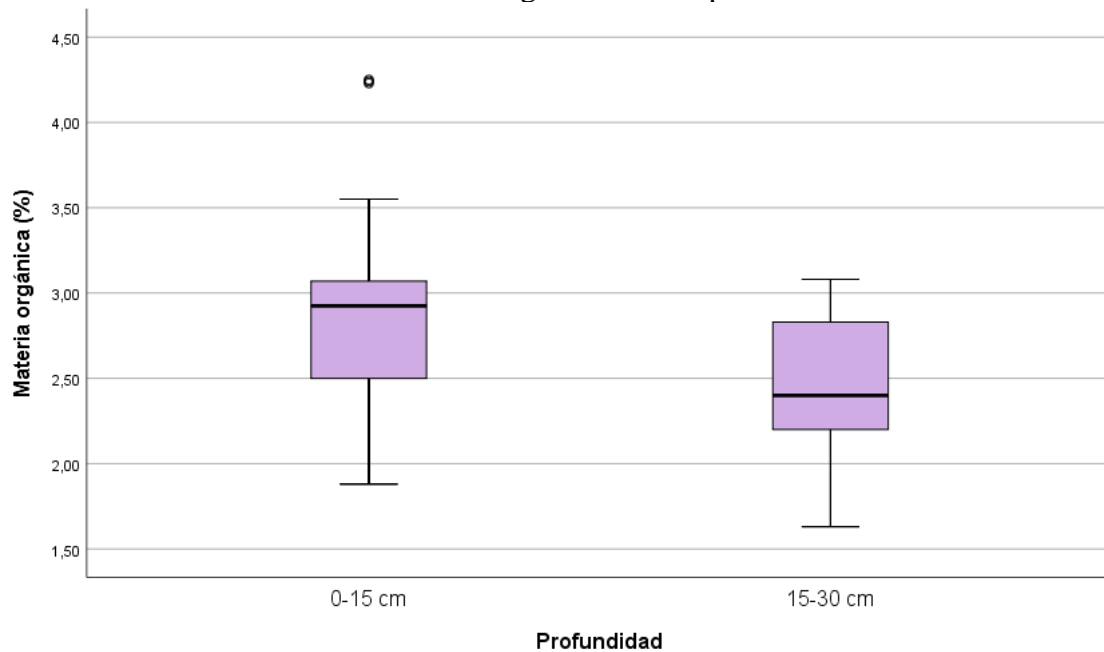
En la Figura 15, el mayor porcentaje de porosidad total (54,98%) se encuentra en el segundo estrato de 15 – 30 cm y el menor porcentaje (37,68%) en los primeros 15 cm, esto está relacionado a que cuando la densidad aparente aumenta la porosidad tiende a disminuir (Gutiérrez, 2017).



**Figura 15.** Diagrama de caja y bigote de Porosidad Total en 2 profundidades de estudio

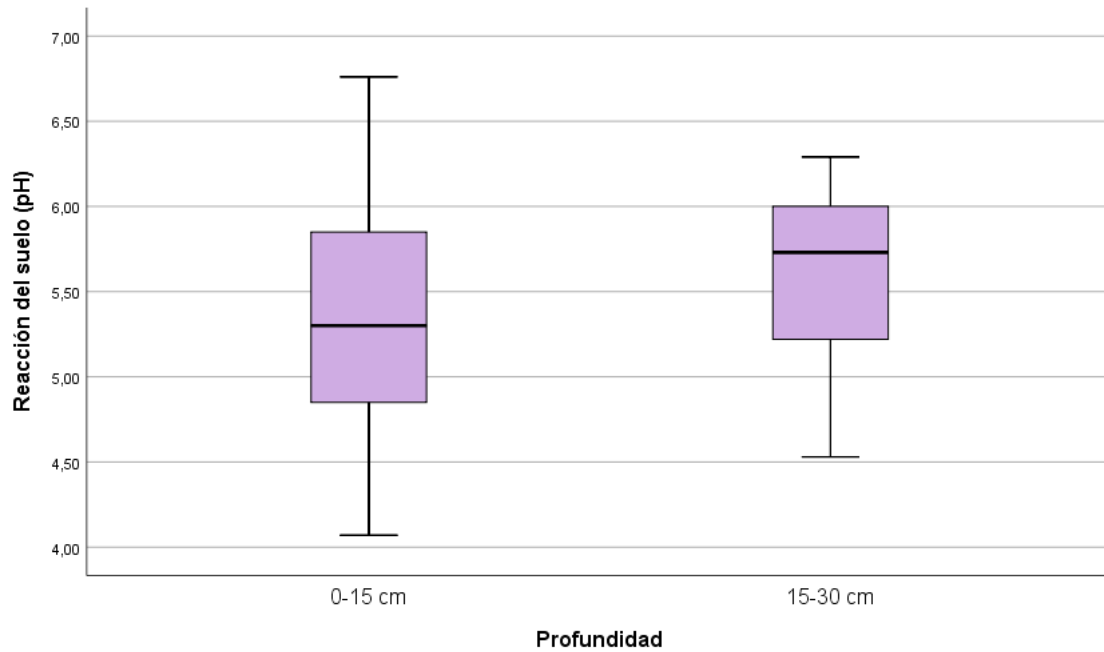


En la Figura 16, se presenta la dispersión y distribución de datos de Materia Orgánica en dos profundidades, con un valor máximo (4,25%) en los primeros 15 cm y un valor mínimo (1,63%) en la profundidad de 15-30 cm. De acuerdo a la FAO (2009) los resultados obtenidos se deben a que en los estratos estudiados la materia orgánica se encuentra inalterada debido a la falta de agentes descomponedores.



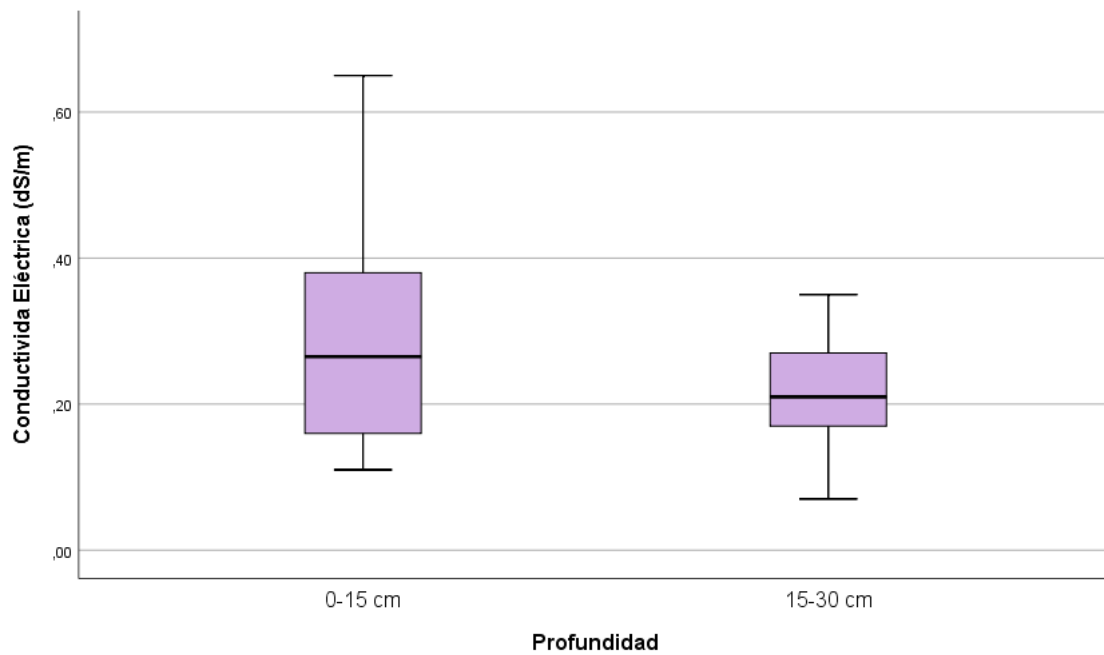
**Figura 16.** Diagrama de caja y bigote de Materia Orgánica en dos profundidades de estudio.

En la Figura 17, la mayor variabilidad de Reacción de suelo (pH) en dos profundidades, se encuentra en la profundidad 0 -15 cm con un valor máximo de 6,76 y mínimo de 4,07. Los rangos que se obtuvieron en la medición de pH concuerdan con los rangos óptimos descritos por Iñiguez (2007).



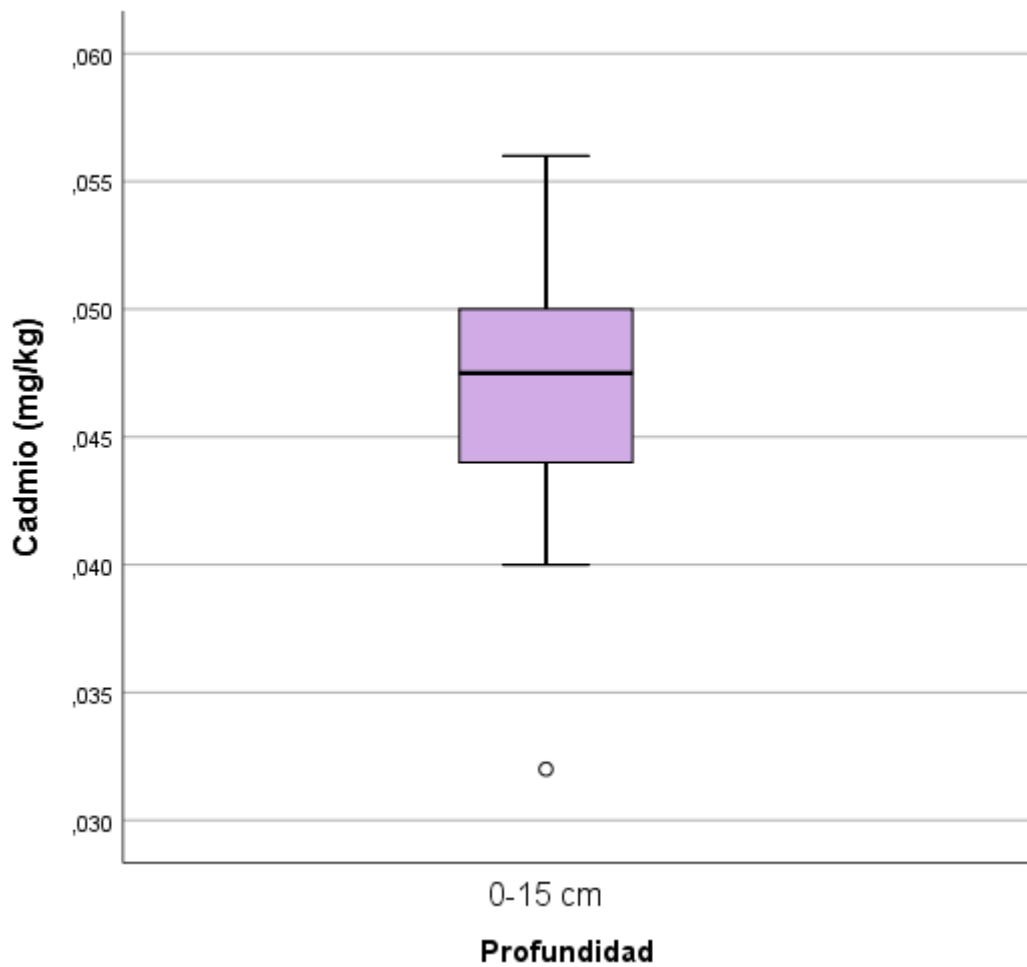
**Figura 17.** Diagrama de caja y bigote de Reacción de suelo (pH) en dos profundidades de estudio.

En la Figura 18, se presenta la dispersión y distribución de datos de Conductividad Eléctrica (C.E.) en dos profundidades, con un valor máximo (0,65)  $\text{dS m}^{-1}$  en los primeros 15 cm y un valor mínimo (0,07)  $\text{dS m}^{-1}$  en la profundidad de 15-30 cm. La conductividad eléctrica fue distinta para cada estrato de suelo, estos suelos están influenciados por el desbordamiento ocasional del Río 7 provocando cambios de pH, llegando a reducir los niveles de productividad de un suelo según lo descrito por De la Rosa et al. (2007).



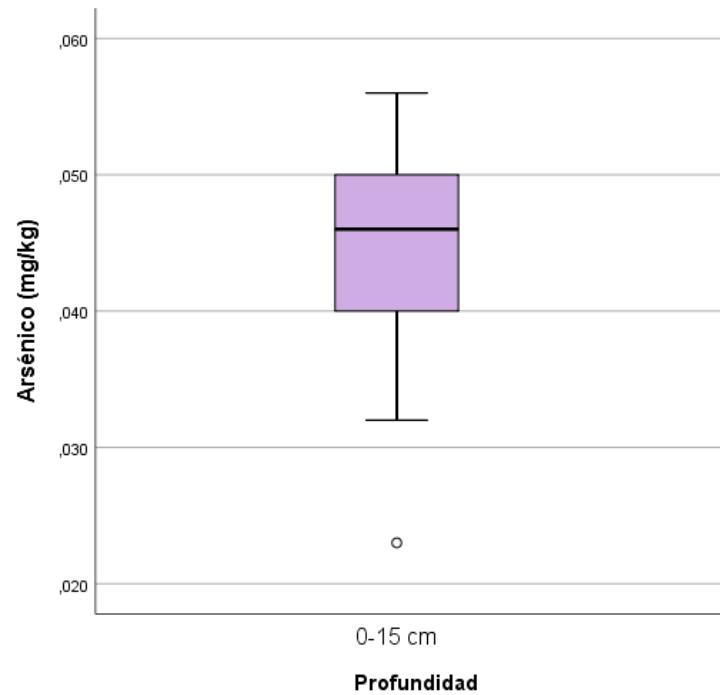
**Figura 18.** Diagrama de caja y bigote de Conductividad Eléctrica en dos profundidades de estudio.

En la Figura 19, se presenta la dispersión y distribución de datos de Cadmio (Cd) en la primera profundidad (0 -15 cm), con un valor máximo (0,056) mg/kg y un valor mínimo (0,032) **mg/kg**. Estos niveles se deben a que el Cadmio al ser un elemento bastante móvil se lo puede encontrar en diferentes perfiles del suelo y profundidades (Domènech et al., 2012).



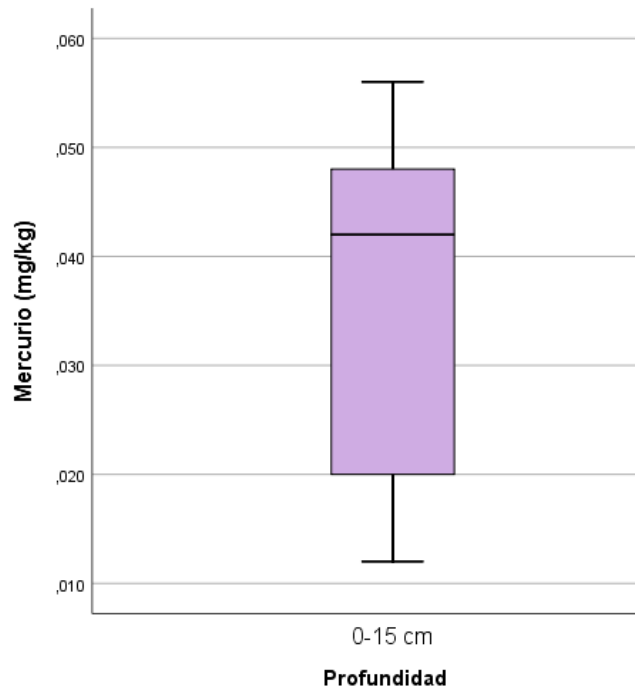
**Figura 19.** Diagrama de caja y bigote de Cadmio (Cd).

En la figura 20, se presenta la dispersión y distribución de datos de Arsénico (As) en la primera profundidad (0 -15 cm), con un valor máximo (0,056) mg/kg y un valor mínimo (0,023) **mg/kg**. La acumulación y presencia de este elemento en el suelo procede de procesos geoquímicos y de actividades antropogénicas como la **minería** (Alam et al., 2007; Bosso & Enzweiler, 2008).



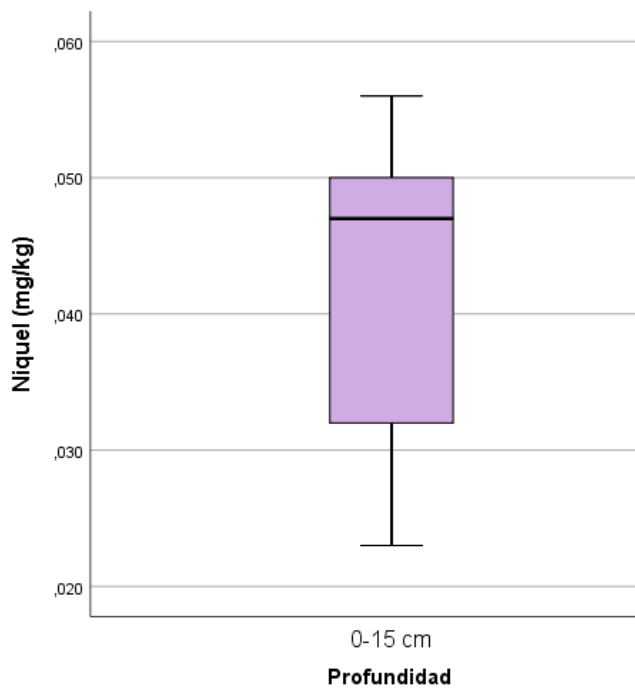
**Figura 20.** Diagrama de caja y bigote de Arsénico (As).

En la Figura 21, se presenta la dispersión y distribución de datos de Mercurio (Hg) en la primera profundidad (0 -15 cm), con un valor máximo (0,056)  $\text{mg kg}^{-1}$  y un valor mínimo (0,12)  $\text{mg kg}^{-1}$ . Esto suele ocurrir con mayor frecuencia en los horizontes superficiales a causa de la retención de materiales arcillosos y sustancias húmicas debido a las bacterias anaeróbicas o procesos **industriales** (Domènech et al., 2012; Posada & del Pilar, 2006).



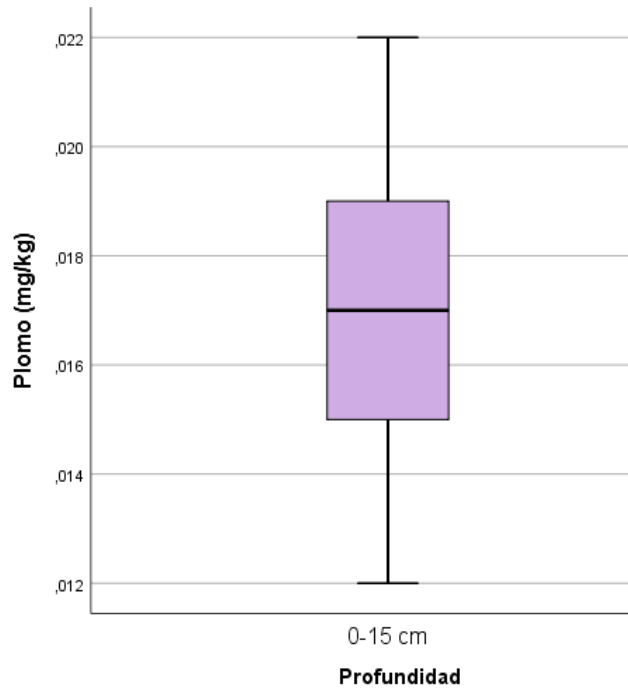
**Figura 21.** Diagrama de caja y bigote de Mercurio (Hg).

En la Figura 22, se presenta la dispersión y distribución de datos de Níquel (Ni) en la primera profundidad (0 -15 cm), con un valor máximo (0,056) mg/kg y un valor mínimo (0,023) mg/kg. El contenido va a depender en gran cantidad del material parental del que proviene, además de diversas fuentes de contaminación (Carrillo et al., 2018; Muñiz et al., 2015).



**Figura 22.** Diagrama de caja y bigote de Níquel (Ni).

En la Figura 23, se presenta la dispersión y distribución de datos de Plomo (Pb) en la primera profundidad (0 -15 cm), con un valor máximo (0,022) mg/kg y un valor mínimo (0,012) mg/kg. Su contenido en el suelo depende de diversos factores como: pH, mineralogía, textura, materia orgánica y naturaleza de los compuestos de plomo **contaminantes** (Cala & Kunimine, 2003).



**Figura 23.** Diagrama de caja y bigote de Plomo (Pb).

**Tabla 4.** Estadística descriptiva de las propiedades físicas y químicas de suelo.

Estadísticos descriptivos							
	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Desviación	Coef. Variación	Asimetría	Curtosis
<b>Arcilla (%)</b>	7,5	45	22,77	8,69	38,18	0,60	0,36
<b>Limo (%)</b>	30	55	41,73	6,26	15,01	0,08	-0,09
<b>Arena (%)</b>	15	57,5	35,48	10,77	30,35	-0,12	-0,46
<b>Densidad Aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0,99	1,38	1,16	0,09	7,83	0,58	0,03
<b>Densidad Real (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2,00	2,50	2,19	0,13	6,15	0,52	-0,84
<b>Porosidad (%)</b>	37,68	54,98	47,07	4,27	9,09	-0,54	-0,39
<b>Materia orgánica (%)</b>	1,63	4,25	2,69	0,64	24,01	0,81	0,87
<b>Reacción del suelo (pH)</b>	4,07	6,76	5,47	0,65	11,96	-0,21	-0,51
<b>Conductividad Eléctrica (dS/m)</b>	0,07	0,65	0,24	0,11	47,42	1,33	2,62
<b>Cadmio (mg/kg)</b>	0,03	0,05	0,04	0,005	10,91	-1,10	2,40
<b>Arsénico (mg/kg)</b>	0,02	0,05	0,04	0,009	21,44	-0,66	-0,32
<b>Mercurio (mg/kg)</b>	0,01	0,05	0,03	0,014	40,59	-0,26	-1,46
<b>Níquel (mg/kg)</b>	0,02	0,05	0,04	0,009	21,42	-0,63	-0,32
<b>Plomo (mg/kg)</b>	0,01	0,02	0,01	0,002	17,14	-0,21	-0,66

La tabla 4, muestra un resumen de la estadística descriptiva de 504 datos de 14 variables estudiadas, dentro de textura, la variable Arcilla, con una media 22,77, varía de 7,5 a 45 %, un coeficiente de variación de 38,18, una desviación de la media de 8,69, una asimetría de 0,60, indicando que los datos son asimétricamente positivos y una curtosis de 0,36 entendiendo que según la forma de distribución, es leptocúrtica, dado que los datos están muy concentrados en la media. Limo, con una media 41,73, varía de 30 a 55%, un coeficiente de variación de 15,01, una desviación de la media de 6,26, una asimetría de 0,08, que indica que los datos son asimétricamente positivos y una curtosis de -0,09, entiendo que según la forma de distribución es platicúrtica, dado que los datos están muy poco concentrados en la media. Arena, con una media 35,48, varía de 15 a 57,5%, con un coeficiente de variación de 30,35, una desviación de la media de 10,77, una simetría de -0,12, indicando que los datos son asimétricamente



negativos y una curtosis de -0,46, indicando según la forma de distribución de datos es platicúrtica, dado que los datos están muy poco concentrados en la media. Densidad aparente, con una media 1,16, varía de 0,99 a 1,38 g. cm<sup>-3</sup>, este aumento según Molina-Gómez et al., (2018), se debe a que hay un mayor porcentaje de arcilla, un coeficiente de variación de 7,83, una desviación de la media de 0,09, una asimetría de 0,58, que indica que los datos son asimétricamente positivos y una curtosis de 0,03, entendiendo según la forma de distribución de datos es leptocúrtica, dado que, los datos están muy concentrados en la media. Densidad real, con una media 2,19, varía de 2 a 2,5 g. cm<sup>-3</sup>, un coeficiente de variación de 6,15, una desviación de la media de 0,13, una asimetría de 0,52, que indica que los datos son asimétricamente positivos y una curtosis de -0,84, entendiendo que según la forma de distribución es platicúrtica, dado que, los datos están muy poco concentrados en la media. Porosidad, con una media de 47,07, varía de 37,68 a 54,98 %, un coeficiente de variación de 9,09, una desviación de la media de 4,27, una asimetría de -0,54, que indica que los datos son asimétricamente negativos y una curtosis de -0,39, entendiendo según la forma de distribución de datos es platicúrtica, dado que, los datos están muy poco concentrados en la media. Materia orgánica, con una media de 2,69, varía de 1,63 a 4,25 %, un coeficiente de variación de 24,01, una desviación de la media de 0,64, una asimetría de 0,81, que indica que los datos son asimétricamente positivos y una curtosis de 0,87, entendiendo según la forma de distribución de datos es leptocúrtica, dado que, los datos están muy concentrados en la media. Reacción del suelo (pH), con una media 5,47, varía de 4,07 a 6,76, un coeficiente de variación de 11,96, una desviación de la media de 0,65, una asimetría de -0,21, que indica que los datos son asimétricamente negativos y una curtosis de -0,51, entendiendo según la forma de distribución de datos es platicúrtica, dado que, los datos están muy poco concentrados en la media. Conductividad Eléctrica, con una media 0,24, varía de 0,07 a 0,65 dS m<sup>-1</sup>, un coeficiente de variación de 47,42, una desviación de la media de 0,11, una asimetría de 1,33, que indica que los datos son asimétricamente positivos y una curtosis de 2,62, entendiendo según la forma de distribución de datos es leptocúrtica, dado que, los datos están muy concentrados en la media. Cadmio, con una media de 0,046, varía de 0,032 a 0,056 mg kg<sup>-1</sup>, un coeficiente de variación de 10,91, una desviación de la media de 0,005, una asimetría de -1,10, que indica que los datos son asimétricamente negativos y una curtosis de 2,40, entendiendo según la forma de distribución de datos es leptocúrtica, dado que, los datos están muy concentrados en la media. Arsénico, con una media de 0,044, varía de 0,023 a 0,056 mg

kg<sup>-1</sup>, un coeficiente de variación de 21,44, una desviación de la media de 0,009, una asimetría de -0,66, que indica que los datos son asimétricamente negativos y una curtosis de -0,32, entendiéndose según la forma de distribución de datos es platicúrtica, dado que los datos están muy poco concentrados en la media. Mercurio, con una media de 0,036, varía de 0,012 a 0,056 mg kg<sup>-1</sup>, un coeficiente de variación de 40,59, una desviación de la media de 0,01, una asimetría de -0,26, que indica que los datos son asimétricamente negativos y una curtosis de -1,46 entendiéndose según la forma de distribución de datos es platicúrtica, dado que los datos están muy poco concentrados en la media. Níquel, con una media de 0,044, varía de 0,023 a 0,056 mg kg<sup>-1</sup>, un coeficiente de variación de 21,42, una desviación de la media de 0,009, una asimetría de -0,63, que indica que los datos son asimétricamente negativos y una curtosis de -0,32, entendiéndose según la forma de distribución de datos es platicúrtica, dado que los datos están muy poco concentrados en la media. Plomo, con una media de 0,016, varía de 0,012 a 0,022 mg kg<sup>-1</sup>, un coeficiente de variación de 17,14, una desviación de la media de 0,002, una asimetría de -0,21, que indica que los datos son asimétricamente negativos y una curtosis de -0,66, entendiéndose según la forma de distribución de datos es platicúrtica, dado que los datos están muy poco concentrados en la media.

**Tabla 5.** Prueba de normalidad para cada profundidad.

<b>Pruebas de normalidad</b>				
	<b>Profundidad del suelo</b>	<b>Shapiro-Wilk</b>		
		<b>Estadístico</b>	<b>gl</b>	<b>Sig.</b>
<b>Arcilla (%)</b>	0-15 cm	0,965	18	0,692
	15-30 cm	0,946	18	0,369
<b>Limo (%)</b>	0-15 cm	0,947	18	0,381
	15-30 cm	0,946	18	0,372
<b>Arena (%)</b>	0-15 cm	0,915	18	0,104
	15-30 cm	0,912	18	0,092
<b>Densidad Aparente (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0-15 cm	0,968	18	0,75
	15-30 cm	0,845	18	0,37
<b>Densidad Real (g/cm<sup>3</sup>)</b>	0-15 cm	0,94	18	0,29
	15-30 cm	0,889	18	0,06
<b>Porosidad (%)</b>	0-15 cm	0,926	18	0,16
	15-30 cm	0,927	18	0,16
<b>Materia orgánica (%)</b>	0-15 cm	0,905	18	0,07
	15-30 cm	0,935	18	0,23
<b>Reacción del suelo (pH)</b>	0-15 cm	0,975	18	0,88
	15-30 cm	0,92	18	0,13
<b>Conductividad Eléctrica (dS/m)</b>	0-15 cm	0,911	18	0,09
	15-30 cm	0,965	18	0,69
<b>Cadmio (mg/kg)</b>	0-15 cm	0,897	18	0,052
	15-30 cm	0,897	18	0,052
<b>Arsénico (mg/kg)</b>	0-15 cm	0,913	18	0,09
	15-30 cm	0,913	18	0,09
<b>Mercurio (mg/kg)</b>	0-15 cm	0,897	18	0,051
	15-30 cm	0,897	18	0,051
<b>Niquel (mg/kg)</b>	0-15 cm	0,914	18	0,10
	15-30 cm	0,914	18	0,10
<b>Plomo (mg/kg)</b>	0-15 cm	0,942	18	0,31
	15-30 cm	0,942	18	0,31

Por profundidad se analizó cada variable y se determinó la normalidad de los datos por la prueba de Shapiro-Wilk por el tamaño de las muestras que son menores a 50, ya que los valores de la significancia (sig) fueron mayores a 0,05, Correa et al., (2014) afirma que los datos siguen una distribución normal, permitiendo así hacer una mejor predicción de los datos en el análisis geoestadístico para la creación de mapas.

## 4.2 Análisis de variabilidad espacial de suelos.

### 4.2.1 Análisis estructural de metales pesados del suelo.

#### 4.2.1.1 Cadmio (Cd)

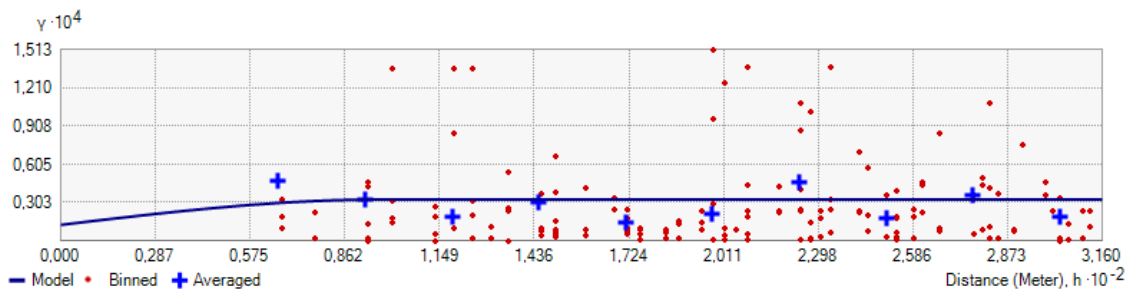


Figura 24. Semivariograma del Cadmio

#### 4.2.1.2 Arsénico (As)

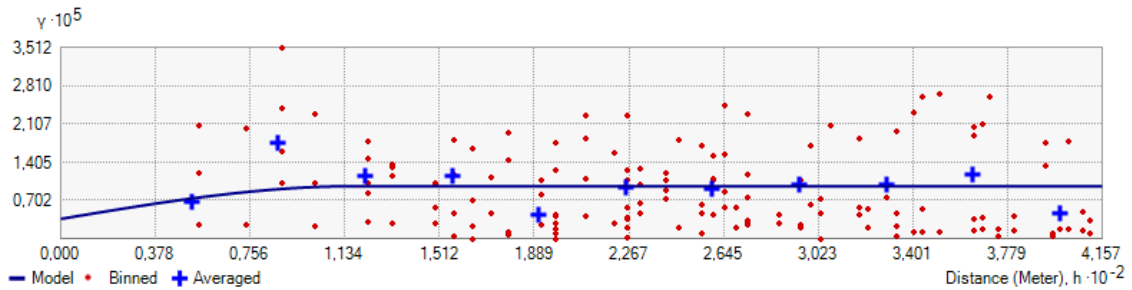


Figura 25. Semivariograma del Arsénico

#### 4.2.1.3 Mercurio (Hg)

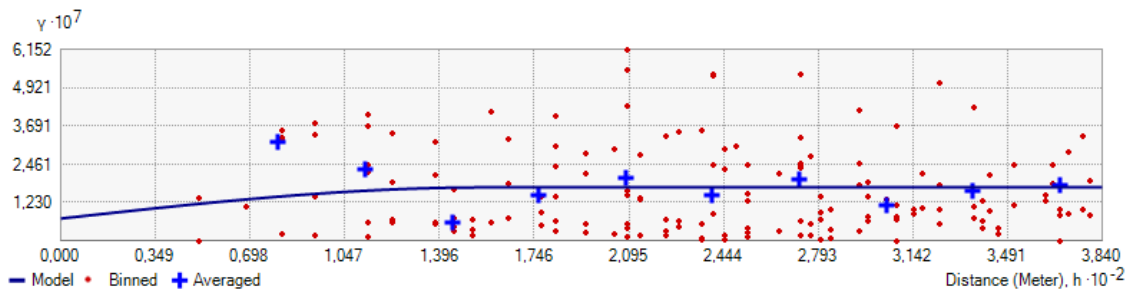


Figura 26. Semivariograma del Mercurio

#### 4.2.1.4 Níquel (Ni)

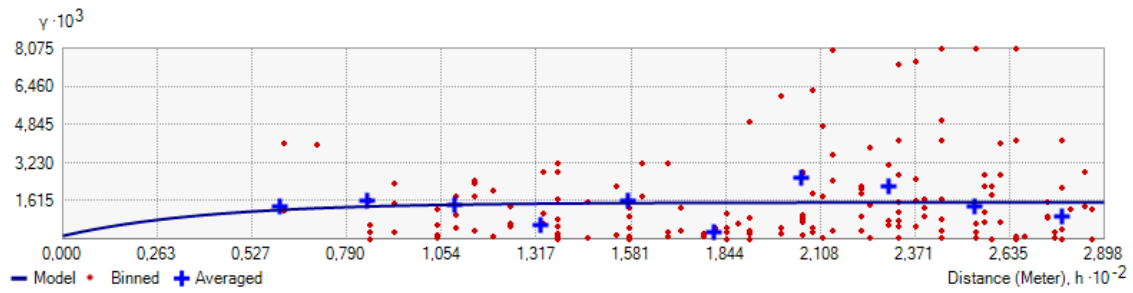


Figura 27. Semivariograma del Níquel

#### 4.2.1.5 Plomo (Pb)

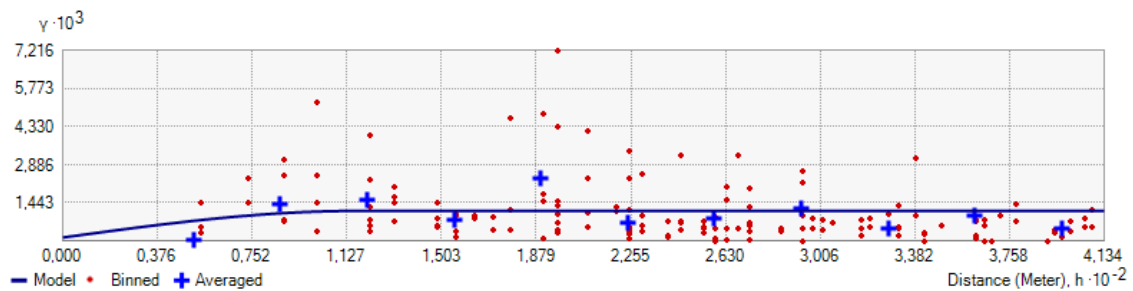


Figura 28. Semivariograma del Plomo

Se realizó la elaboración de semivariograma de los metales pesados (Cd, Ar, Hg, Ni, Pb) en el software ArcGis 10.8, es una gráfica que relaciona la semivarianza de los pares de puntos de muestreo en el eje de las (Y) que se encuentran separadas a una distancia determinada de los ejes de las (X). Se obtuvieron unos gráficos de puntos conocidos como semivariogramas experimentales, a estos semivariogramas se le ajusto un modelo matemático denominado semivariograma teórico, los modelos más ajustados para cada metal pesado fueron: esférico Figura 24, 25, 26, 28 y exponencial Figura 27. Los parámetros de los semivariogramas según Jaramillo (2012) que presentan cada uno de los metales pesados son, el sill que es el valor máximo de la semivarianza, el rango es la distancia hasta donde se estabiliza la semivarianza y también indica en todos los metales pesados la distancia hasta donde existe dependencia espacial fue para Cd de 96,6m , Ar de 117,1m, Hg de 156,02 m, Ni de 121,4m y Pb de 115,4m, los valores de semivarianza que no parten de cero se conocen como nugget, tal como se observa en la Figura 24, 25, 26 estos valores se pueden atribuir a errores de medición de la variable.

**Tabla 6.** Parámetros del variograma aplicando kriging ordinario para las variables de estudio.

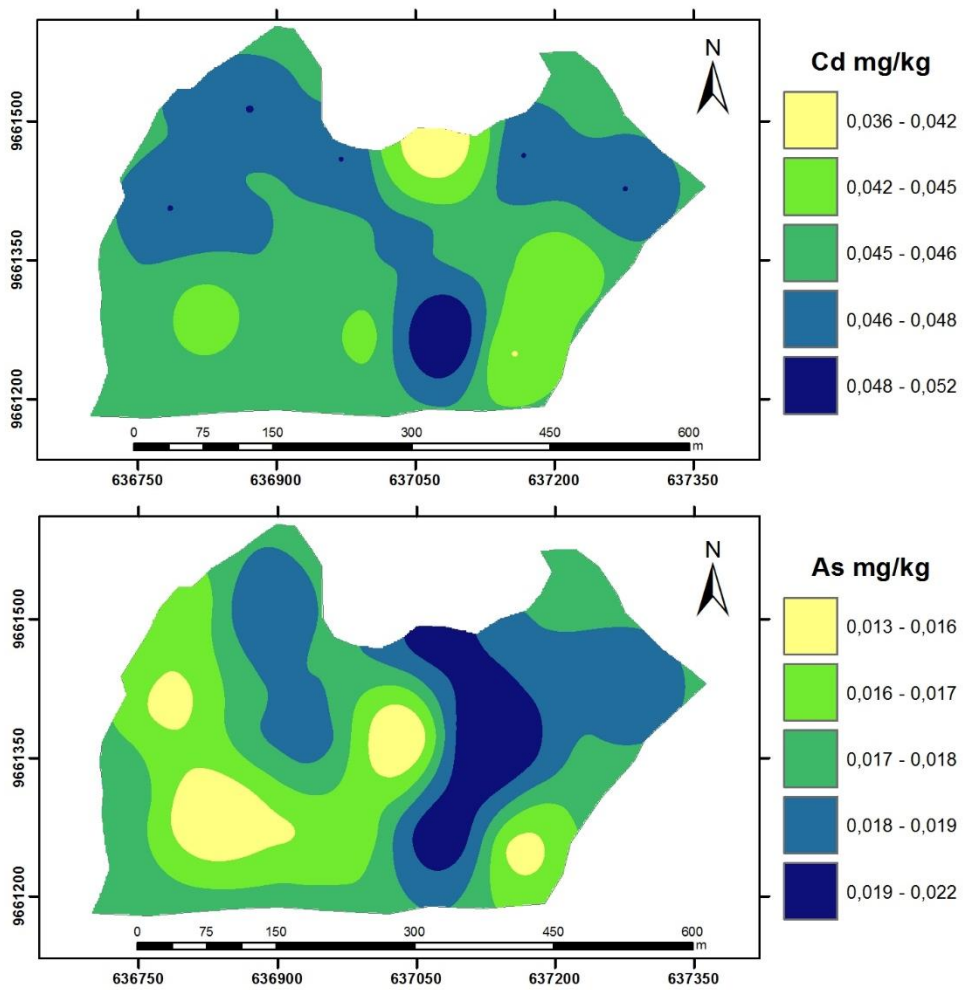
	Modelo	Nugget	Sill	Rango	R2	Nash	RMSE	De	
<b>Cd</b>	Esférico	0.00001	0.00002	96.6	0.998	0.983	0.022	50.00	Moderada
<b>As</b>	Esférico	0.000003	0.0000061	117.1	0.992	0.964	0.067	49.18	Moderada
<b>Hg</b>	Esférico	0.00000007	0.0000001	156.02	0.981	0.893	0.153	70.00	Moderada
<b>Ni</b>	Exponencial	0.0001	0.001	121.4	0.999	0.886	0.135	10.00	Fuerte
<b>Pb</b>	Esférico	0.0001	0.001	115.4	0.988	0.966	0.036	12.00	Fuerte

En la tabla 6, se presentan los resultados del análisis estructural de los metales pesados para la determinación de semivariogramas experimentales se utilizó el programa ArgGis 10.8 donde se ajustó modelos teóricos (esférico, gaussiano y exponencial) para cada metal pesado, siendo más precisos y eficientes los modelos esféricos y exponencial ya que presentaron un coeficiente de Nash y un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) cercano o igual a 1, así mismo se obtuvieron los valores más bajos del error medio cuadrático (RMSE).

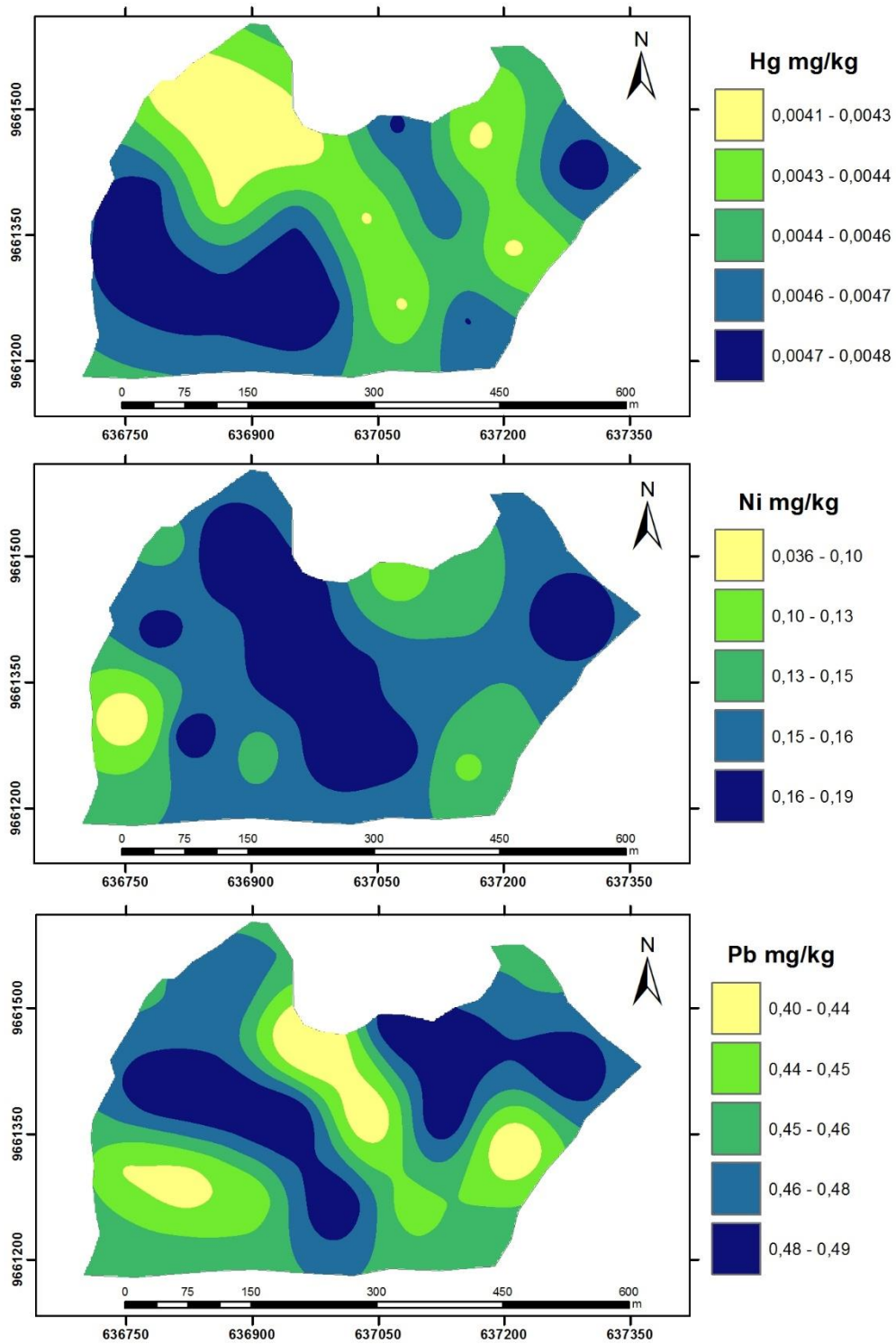
Los resultados evidenciaron la existencia de variabilidad espacial y el análisis estructural de acuerdo con Cambardella et al. (1994), se determinó una dependencia espacial moderada para Cd, As y Hg, una dependencia espacial fuerte para Ni y Pb, y no se presentó en ningún metal pesado una dependencia espacial débil.

#### **4.2.2 Creación de mapas temáticos de metales pesados en el suelo.**

Para determinar el comportamiento espacial de los metales pesados se realizó un ajuste de semivariograma, en el cual se determinó que el Cd varía de 0,036 a 0,052, valores que según Kabata (2010) están dentro del nivel óptimo ya que son inferior a (0,07 – 1,1 mg kg<sup>-1</sup>), el As varía de 0,013 a 0,022, de acuerdo con Berbetty (1992) para que la cantidades de As se consideren una impureza presente, los niveles deben ser mayores a 0,005, el Hg varía de 0,0041 a 0,0048, teniendo en cuenta a Acosta et al. (2011) que menciona valores entre 0,08 a 1,40 mg/kg, definidos como rangos estables para suelos agrícolas, el Ni varía de 0,036 a 0,19 y el Pb 0,40 a 0,49, que según Berbetty (1992), indica que para considerarse como impureza los valores deben superar los rango entre 0,01 y 0,015.



**Figura 29.** Distribución espacial de metales pesados: Cadmio y Arsénico



**Figura 30.** Distribución espacial de metales pesados: Mercurio, Níquel y Plomo



## CONCLUSIONES

A través de los análisis estadísticos la variable que más CV% presentó fue C.E con un 47,42%, con un máximo 0,65 dS/m y un mínimo de 0,07 dS/m por el gran contenido de arena en la zona de estudio con una media de 35,48%.

Los modelos de semivariograma que más se ajustaron a la variable estudiada fueron el esférico y exponencial ya que presentaron un coeficiente de Nash y un coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>) cercano o igual a 1, así mismo se obtuvieron los valores más bajos del error medio cuadrático (RMSE).

Los valores de As encontrados fueron de 0,013 a 0,022 mg.kg<sup>-1</sup>, lo que indica que este metal ya tiene implicaciones de toxicidad en el suelo, por tener valores que superan el 0,005 mg.kg<sup>-1</sup> donde se considera normales.

Los niveles de Ni encontrados oscilan entre 0,036 a 0,19 mg.kg<sup>-1</sup>, superando el valor de 0,125 mg.kg<sup>-1</sup> cantidad donde se lo considera normal.

Los niveles de Pb encontrados fueron de 0,40 a 0,49 mg.kg<sup>-1</sup>, indicando que el contenido de este metal es más alto al rango establecido superando valores de 0,01 y 0,015 mg.kg<sup>-1</sup>

## **RECOMENDACIONES**

Establecer un grillado que permita cubrir en totalidad la zona de estudio, así poder establecer más puntos de muestreo y tener menos error al realizar el análisis geoestadístico, que muestra la presencia de puntos contaminados en el suelo.

Que se efectúe un monitoreo permanente de la calidad de agua del Río 7, cuyas concentraciones de elementos como Pb y As sobrepasan los rangos establecidos, poniendo en riesgo a su población cercana y prácticas agrícolas.

## BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, J., Martínez S., Faz, A., Millán, R., Muñoz, M., Terán, T., & Vera, R. (2011). Caracterização da potencial contaminação por mercúrio na área mineira de Apolobamba, Bolívia. *Spanish Journal of Soil Science*, 1(1), 86-99. <https://doi.org/10.3232/SJSS.2011.V1.N1.06>
- Aguirre, S., Piraneque, N. v., & Díaz, C. (2019). Valuation of soil state in dry tropical forest zone by analytical techniques and chromatograms. *Informacion Tecnologica*, 30(6), 337-350. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000600337>
- Aguirre, S., Piraneque, N., & Mercado, T. (2022). *Suelo y cambio climático: Incluye estudio de casos* (Editorial Unimagdalena., Ed.).
- Alam, M., Tokunaga, S., & Stagnitti, F. (2007). Removal of arsenic from contaminated soils using different salt extractants. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 42(4), 447-451. <https://doi.org/10.1080/10934520601187641>
- Basu, A., Saha, D., Saha, R., Ghosh, T., & Saha, B. (2014). A review on sources, toxicity and remediation technologies for removing arsenic from drinking water. *Research on Chemical Intermediates*, 40(2), 447-485. <https://doi.org/10.1007/s11164-012-1000-4>
- Berbetty, J. (1992). Berbetty, J. Comportamiento del Plomo, Antimonio y Arsénico Durante la Refinación Electrolítica del Estaño en Medio Alcalino usando como electrolito Estannato de sodio (EMV). Universidad Técnica de Oruro, Facultad Nacional de Ingeniería, Carrera de Ingeniería Metalúrgica. .
- Bosso, S., & Enzweiler, J. (2008). Bioaccessible lead in soils, slag, and mine wastes from an abandoned mining district in Brazil. *Environmental Geochemistry and Health*, 30(3), 219-229. <https://doi.org/10.1007/s10653-007-9110-4>
- Bravo, A., & Ricardo, B. (2020). «Determinación de factores ambientales que afectan la microcuenca Rio Bonito y planteamiento de políticas ambientales para conservar el recurso agua» [Facultad de Ciencias Sociales, Universidad Técnica de Machala]. <http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/16168/1/TTFCS-2021-GEA-DE00001.pdf>
- Cala, V., & Kunimine, Y. (2003). Distribución de plomo en suelos contaminados en el entorno de una planta de reciclaje de baterías ácidas. *Rev. Int. Contam. Ambient.*, 19(3). <http://www.fcb.uanl.mx/IDCyTA/files/volume3/4/10/116.pdf>
- Calderón, C., Bautista, G., & Rojas, S. (2018). Propiedades químicas, físicas y biológicas del suelo, indicadores del estado de diferentes ecosistemas en una terraza alta del departamento del Meta. *Orinoquia*, 22(2), 141-157. <https://doi.org/10.22579/20112629.524>
- Cambardella, C., Moorman, T., Novak, J, Parkin, T., Karlen, D., Turco, R. F., & Konopka, A. E. (1994). Field-Scale Variability of Soil Properties in Central Iowa Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58(5), 1501-1511. <https://doi.org/https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>

- Carrillo, G., la Fuente, S., & Castro, V. (2018). Estudio de absorción, acumulación y potencial para la remediación de suelo contaminado por níquel usando *Ambrosia ambrosioides*. 3, 708-713.  
<http://www.fcb.uanl.mx/IDCyTA/files/volume3/4/10/116.pdf>
- Castillo, X., Etchevers, J., Hidalgo, C., & Aguirre, A. (2021). Soil quality evaluation: Generation and interpretation of indicators. *Terra Latinoamericana*, 39.  
<https://doi.org/10.28940/TERRA.V39I0.698>
- Chacón, L. (2021). Las agrociencias como soporte a una producción agropecuaria sostenible: visión ecosistémica (Ediciones Unisalle).  
<https://ediciones.lasalle.edu.co/>
- Cisneros, M., Godoy, R., Quintero, D., & Pañart Santiago. (2016). Métodos cuantitativos para la investigación agropecuaria mapas de rendimiento.  
<https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/4739/Efecto%20de%20la%20definici%C3%B3n%20de%20vecindario%20en%20la...%20Cisneros,%20M.,%20Godoy,%20R.,%20Quintero,%20D.,%20Pa%C3%B1art,%20S..pdf?sequence=1>
- Cohen, P., West, S., & Aiken, L. (2014). *Applied Multiple Regression/Correlation Analysis for the Behavioral Sciences*. Psychology Press.  
<https://doi.org/10.4324/9781410606266>
- Correa, J., Iral, R., & Rojas, L. (2014). Experimental Investigation on the Elicitation of Subjective Distributions View project diseños óptimos View project.  
<https://www.researchgate.net/publication/4830223>
- De la Rosa, L., Maura, M., Teutli, M., & Ramírez, M. (2007). Electrorremediación de suelos contaminados, una revisión técnica para su aplicación en campo. En *Rev. Int. Contam. Ambient* (Vol. 23, Issue 3).
- Díaz, M. (2002). *Geoestadística Aplicada* (C. Instituto de Geofísica y Astronomía, Ed.).  
<http://www.esmg-mx.org/media/courses/geoestadistica/GeoEstadistica.pdf>
- Domènech, X., Peral, J., Bogotá, B., Aires, B., & México, C. (2012). *Química Ambiental de sistemas terrestres* (Reverté, Ed.).
- Dörner, J., Salas, R., Ordóñez, I., & Valle, S. (2016). Variación espacial de propiedades físicas de un suelo derivado de cenizas volcánicas sometido a distintas estrategias de mejoramiento de una pradera degradada. *Agro Sur*, 44(3), 29-40.  
<https://doi.org/10.4206/agrosur.2016.v44n3-04>
- Enrique Ingaramo, O. (2003). *Indicadores físicos de la degradación del suelo*.
- FAO. (2009). *Guía para la descripción de suelos*.
- FAO. (2017). *Propiedades químicas*.
- FAO. (2021). El método del triángulo textural para determinar las clases texturales básicas. *Textura Del Suelo*. .  
[https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO\\_Training/FAO\\_Training/General/x6706s/x6706s06.htm](https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm)

- FAO, & PUMNA. (2022). Evaluación mundial de la contaminación del suelo – Resumen para los formuladores de política (FAO, Ed.).  
<https://www.fao.org/3/cb4827es/cb4827es.pdf>
- GAD Parroquial Río Bonito. (2014). Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de la parroquia tendales fase: diagnostico. [http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL\\_SNI/data\\_sigad\\_plus/sigadplusdiagnostico/0760028270001\\_Diagn%C3%B3stico\\_28-10-2015\\_17-24-08.pdf](http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdiagnostico/0760028270001_Diagn%C3%B3stico_28-10-2015_17-24-08.pdf)
- Gómez, A. (2018). Caja de herramientas del sector minero: Formas de legislar. (Universidad del Rosario., Ed.).
- González, J., Guerra, F., & Resumen, H. (2007). conceptos básicos de geoestadística en geografía y ciencias de la tierra: manejo y aplicación.  
[file:///D:/Respaldo%20de%20Usuario/Nueva%20carpeta%20\(2\)/TESIS/DOCUMENTOS%20TESIS/GEOESTADISICA%20PARTE%20II.pdf](file:///D:/Respaldo%20de%20Usuario/Nueva%20carpeta%20(2)/TESIS/DOCUMENTOS%20TESIS/GEOESTADISICA%20PARTE%20II.pdf)
- González, G., Sánchez, I., & García, D. (2004). Relaciones entre el manejo del huerto de nogal y la porosidad del suelo Management of Pecan Orchards as Related to Soil Porosity.
- Guerrero, M. (2016). «Gestión Ambiental de la microcuenca del Río Margarita, Cantón El Guabo, Provincia El Oro» [Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Guayaquil].  
<http://repositorio.ug.edu.ec/bitstream/redug/15878/1/GESTION%20AMBIENTAL%20DE%20LA%20MICROCUCENCA%20DEL%20RIO%20MARGARITA%20CANTON%20GUABO.pdf>
- Gutierrez, G. (2017). Efecto del cultivo de palma de aceite sobre las propiedades físicas del suelo y su relación con la producción y la pudrición de cogollo. Lámpsakos, 1(17), 20. <https://doi.org/10.21501/21454086.2390>
- IGME. (2002). Cadmio.  
<https://www.igme.es/PanoramaMinero/Historico/2002/Cadmio02.pdf>
- Iñiguez, M. (2007). Fertilidad, Fertilizantes y Fertilización del suelo.
- Jaramillo, D. (2012). Variabilidad espacial del suelo: bases para su estudio soil spatial variability: bases for study Páginas 73 a 87. Revista de La Facultad de Ciencias, 1(1), 25. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rfc/article/view/49004/50077>
- Jaramillo, D., González Hugo, & Álvarez, F. (2008). Variabilidad espacial de algunas propiedades físico - mecánicas de suelos de textura pesada. Revista CES Medicina Veterinaria y Zootecnia, 3(2), 10-19.
- Kabata, A. (2010). Trace Elements in Soils and Plants. CRC Press.  
<https://doi.org/10.1201/b10158>
- Lima Arteaga, G. (2021). Impactos causados por actividades mineras. Ciencia & Futuro, 11(2).
- Lozano, W. (2018). Suelos: Guía de prácticas simplificadas en campo y laboratorio. Universidad Piloto de Colombia.

- Manterola, C., & Otzen, T. (2014). Estudios Observacionales. Los Diseños Utilizados con Mayor Frecuencia en Investigación Clínica Observational Studies. The Most Commonly Used Designs in Clinical Research. En *Int. J. Morphol* (Vol. 32, Issue 2).
- Mendoza, M., Quintero, R., Duarte, V., & Carrasco, V. (2021). Efecto de la aplicación de estiércoles composteados en la movilidad de las fracciones químicas del Cu en un suelo contaminado con residuos mineros. *TIP Revista Especializada En Ciencias Químico-Biológicas*, 24.  
<https://doi.org/10.22201/fesz.23958723e.2021.301>
- Molina-Gómez, F. A., Ruge, J. C., & Camacho-Tauta, J. (2018). Variabilidad espacial del suelo arcilloso de la Sabana de Bogotá en la confiabilidad de asentamientos por consolidación primaria. *Ingeniería y Ciencia*, 14(27), 179-205.  
<https://doi.org/10.17230/ingciencia.14.27.8>
- Muñiz, O., Montero, A., de Aguiar, A., Rodríguez, M., Estévez, J., & Clístenes, A. (2015). El Níquel en suelos y plantas de Cuba. *INCA*, 36.  
<http://scielo.sld.cu/pdf/ctr/v36s1/ctr03s115.pdf>
- Muñoz, A., Asedegbega, E., Álvarez, J., & Pérez, M. (2019). Gestión y conservación de aguas y suelos. (Editorial uned, ed.).
- Novillo, I., Carrillo, D., Cargua, J., Moreira, V. N., Albán, K., & Morales, F. (2018). Advantages of incorporating new varieties in the cultivation of cotton in the Sinú Valley. *Revista Temas Agrarios*, 23(2).  
<https://revistas.unicordoba.edu.co/index.php/temasagrarios/article/view/1301>
- Oliver, M. (2010). *Geostatistical Applications for Precision Agriculture*. Springer Science+Business Media B.V. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9133-8>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2022). Caracterización fisicoquímica de suelos salinos agrícolas, en la localidad de Chicavasco, estado de Hidalgo, México. *South Florida Journal of Development*, 3(1), 335-344. <https://doi.org/10.46932/sfjdv3n1-026>
- Ortiz, A., & Fuentes, J (2020). Estimación del impacto potencial de la contaminación difusa por métodos simplificados en el Área de Protección de Flora y Fauna, Pico de Tancítaro, Michoacán, México. *Revista Geográfica de América Central*, 2(65), 207-238. <https://doi.org/10.15359/rgac.65-2.8>
- Pacheco, J., Avilés, A., & Delgado, O. (2016). Bosques Latitud Cero Geostatistical interpolation methods analysis for estimating spatial precipitation in the paute river basin. *Bosques Latitud Cero*, 6(2), 142-159. [www.bosqueslatitudcero.com](http://www.bosqueslatitudcero.com)
- Peña Neira, S., & Araya Meza, P. (2021). Aguas de contacto, efectos en la minería y el medioambiente. *Revista de La Facultad de Derecho*, 50.  
<https://doi.org/10.22187/rfd2021n50a6>
- Porta, J., Lopez, M., & Poch, R. (2019). *Edafología: uso y protección de suelos*. (Mundi-Prensa).

- Posada, M & del Pilar, M. (2006). Efectos del mercurio sobre algunas plantas acuáticas tropicales. *Revista EIA*, 6. <http://www.scielo.org.co/pdf/eia/n6/n6a06.pdf>
- Ramos, M. & Pérez, M. (2021). Characterization of mine tailings in their natural state and stabilized with cement, focused on construction. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 22(2), 1-9. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2021.22.2.010>
- Rasche, J., Gomez, E., Fatecha, D., & Leguizamón, C. (2020). Soil compaction and its effect on the vegetative growth of soybean, corn and pigeon pea. *Investigación Agraria*, 22(1), 13-21. <https://doi.org/10.18004/investig.agrar.2020.junio.13-21>
- Rica, C. (2007). Hidrogeología del bajo cauca antioqueño geostatistics techniques in bajo cauca antioqueño hydrogeology. *Año*, 74, 137-149. <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v74n152/a12v74n152.pdf>
- Rodríguez, E., McLaughlin, N., & Pennock, D. (2019). LA CONTAMINACIÓN DEL SUELO: UNA REALIDAD OCULTA (FAO).
- Salamanca Jiménez, A., & Siavosh Khalajabadi, S. (2005). La Densidad Aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la Zona Cafetera Colombiana.
- Salazar, J. (2018). Aprovechamiento de recursos y manejo de suelo ecológico. (IC Editorial).
- Salazar, C., González, J., Corrales, D., Lacayo, J., Carrillo, K., & Montero, H. (2020). Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria. *Alcances Tencológicos*, 13(1). <https://doi.org/10.11.2017>
- Sánchez, A., Bautista, F., Cejudo, R., Goguitchaichvili, A., & Cervantes, M. (2020). Los parámetros magnéticos como indicadores de contaminación por elementos mayores y plomo urbanos del Valle de Aburrá, Colombia. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 37(3). <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2020.3.1586>
- Sandoval, M., Dörner, J., Seguel, O., Cuevas, J., & Rivera, D. (2017). Métodos de análisis físico del suelo. <https://www.researchgate.net/publication/312453440>
- Santiago, B., Martínez, M., Rubio, E., Vaquera, H., & Sánchez, J. (2018). Variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas del suelo en un sistema Lama-Bordo en la Mixteca Alta de Oaxaca, México.
- Tapia, S. (2018). Productividad manufacturera y minera del Ecuador 2013 Manufacturing and mining productivity in Ecuador 2013. *X-Pendientes Económicos*, 2(4). <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/392/3921923007/index.html>
- Tello, M. (2018). Determinación de las concentraciones de plomo y cadmio en suelos de sectores aledaños al parque industrial de la ciudad de Cuenca. *RECIMUNDO*, 2(Esp), 560-577. <https://doi.org/10.26820/recimundo/2.esp.2018.560-577>
- Tsai, S., Singh, S., & Chen, W. (2009). Arsenic metabolism by microbes in nature and the impact on arsenic remediation. *Current Opinion in Biotechnology*, 20(6), 659-667. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2009.09.013>

- Valenzuela, C., Campos, V., Yañez, J., Zaror, C., & Mondaca, M. (2009). Isolation of Arsenite-Oxidizing Bacteria from Arsenic-Enriched Sediments from Camarones River, Northern Chile. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 82(5), 593-596. <https://doi.org/10.1007/s00128-009-9659-y>
- Vallejo, J. (2014). *Manual de geología*.
- Vásquez, M., & Torres, L. (2018). Estudios del Desarrollo Social: Cuba y América Latina. 2, 83-103. <http://scielo.sld.cu/pdf/reds/v6n2/reds06218.pdf>
- Vilela, W., Espinosa, M., & Bravo, A. (2020). La contaminación ambiental ocasionada por la minería en la provincia de El Oro. *Revista Internacional de Administración*, 8(8).
- Villaseñor, D. (2016). *Fundamentos y procedimientos para análisis físico morfológicos de suelo. (UTMACH)*.
- Villatoro, M., Henríquez, C., & Sancho, F. (2008). Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de pH, Ca, Cice y P del suelo. *Agronomía Costarricense*, 32(1). [www.cia.ucr.ac.cr](http://www.cia.ucr.ac.cr)
- Villazón, J., Martín Gutiérrez, G., Cobo Vidal, Y., Candelario, R., Tablada, N., Alejandro, R., & Reyes, G. (2022). Variabilidad espacial de la resistencia a la penetración en un haplustert crómico bajo pasto natural Spatial variability of soil resistance to penetration on a chromic haplustert under natural grassland. *Idesia*, 40(1), 7-14.
- Webster, R., & Oliver, M. (2007). *Geostatistics for Environmental Scientists*, 2nd Edition (Statistics in Practice) (John Wiley & Sons, Ed.; 2nd. ed.).
- Zamora, G., Blaco, W., & Hinojosa, O. (2019). Economía circular en minería: procesamiento de desmontes como alternativa de remediación ambiental. *Revista de Medio Ambiente Minero y Minería*, 4(2).