

**UNIVERSIDAD DE PANAMÁ**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS**

**ESCUELA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE METALES**

**PESADOS EN LA CUENCA DEL RÍO SANTA MARÍA**

**EFRAÍN OSES**

**CÉDULA: 2-740-2447**

**XAVIER NAVARRO**

**CÉDULA: 6-721-2468**

**DAVID, CHIRIQUÍ**

**REPÚBLICA DE PANAMÁ**

**2022**

**EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE METALES  
PESADOS EN LA CUENCA DEL RÍO SANTA MARÍA.**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN SOMETIDO PARA OPTAR POR EL TÍTULO  
DE INGENIERO AGRÓNOMO EN CULTIVOS TROPICALES**

**PERMISO PARA SU PUBLICACIÓN, REPRODUCCIÓN TOTAL O  
PARCIAL DEBE SER OBTENIDA EN LA FACULTAD DE CIENCIAS  
AGROPECUARIAS**

**APROBADO:**

DR. JOSÉ EZEQUIEL VILLARREAL

DIRECTOR

DR. JUAN M. OSORIO

---

ASESOR

M.Sc. ALEXIS SAMUDIO

---

ASESOR

---

DAVID, CHIRIQUÍ  
REPÚBLICA DE PANAMÁ

2022

## **AGRADECIMIENTOS**

Primero que todo, darle gracias a Dios por permitirme culminar este trabajo de tesis; por brindarme salud, fortalezas y capacidad en todo este tiempo. Agradezco a mis padres, Mauricio Navarro y María Marín por estar siempre ahí; apoyándome en cada momento del camino. A mis hermanos que han sido parte fundamental para culminar esta investigación.

De igual forma, al director de tesis el Doctor José Ezequiel Villareal, el Ingeniero Adolfo Santos y el Ingeniero John Villalaz por compartir sus conocimientos académicos, experiencias, profesionalismo y supervisión. También, agradecer al personal del Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá, especialmente al de área de suelo y agua que desde el principio de la investigación han brindado el apoyo en estos meses de trabajo.

Finalmente, a los profesores de la carrera de ingeniería en cultivos tropicales, por transmitir sus conocimientos en los cuatros años de carrera que me han ayudado a hacer un mejor profesional.

## DEDICATORIA

Primero que todo le dedico este trabajo a Dios, por darme la sabiduría necesaria para la culminación del proyecto. En segundo lugar, a mi padre, Mauricio Navarro que me ha inculcado desde pequeño los saberes empíricos de la agronomía. En tercer lugar, a mi madre, María Marín por darme ese apoyo incondicional y orientándome siempre por el buen camino. En cuarto lugar, a mis hermanos Mauricio Navarro y Einar Navarro que han estado conmigo en cada momento de este largo trayecto, ayudándome en lo que estuviera a su alcance. Por último, a mi hijo Eric Isaac Navarro que ha sido una fuente de inspiración y motivación en los cuatro años de estudios y sobre todo en el proceso de investigación.

## **AGRADECIMIENTO**

Primeramente, le agradezco a Dios por permitirme culminar esta etapa de mi vida. A mis padres por estar siempre apoyándome en todo el recorrido de mi carrera, por sus enseñanzas, consejos y regaños. También, por estar en todas mis decisiones, motivándome a seguir adelante y por enseñarme a mejorar y aprender de los errores para seguir con el objetivo principal que es optar por el título de Ingeniero Agrónomo en cultivos tropicales. De igual forma, a mi abuelo por enseñarme los primeros conocimientos en agropecuaria, lo cual fue de mucho beneficio; logrando poner en práctica en todos los años de estudio. Es necesario señalar, a mi abuela, Mariela Isidra Quijada Meneses por aconsejarme, regañarme y motivarme a seguir adelante. A mi hermana, Jenisell Marieth Oses Añino por brindarme su ayuda en todo este proceso e igualmente por todos sus aportes que contribuyeron en la culminación de mis estudios. También, a Yeniffer Patricia Caballero Valverde, por representar ese soporte y apoyo incondicional en las diferentes etapas del proyecto. Finalmente, agradecerles a todos los profesores, que de manera profesional brindaron todos sus saberes en estos años. Quiero resaltar, al Ingeniero Javier Urriola, quien siempre me motivó a seguir avanzando en mis estudios de ingeniería. Al Doctor José Villareal asesor del trabajo de grado final, al Ingeniero Adolfo Santo y John Villalaz por asistir técnicamente en todo el procedimiento y desarrollo de este trabajo de investigación.

## DEDICATORIA

Primero que todo, este trabajo y obtención futura del título de Ingeniería Agronómica en cultivos tropicales se lo dedico a mi familia, por su apoyo incondicional y por todos los consejos, regaños y aprendizajes que me han dado a lo largo de esta carrera, proceso que no ha sido fácil. Especialmente a mi madre, Jenia Yabel Añino Quijada que ha sido en gran parte el motivo, el apoyo moral y con todos los recursos necesarios para estudiar. A mi papá Efraín Oses Cisneros por sus regaños y conocimientos que me ha brindado desde niño. Igualmente, a mi abuelo Nicolas Antonio Añino Agrazal que fue uno de los motivos por los cuales estoy en esta rama de estudio, ya que me enseñó la mayor parte de los saberes empíricos y me mostró el trabajo en el campo, razón por la cual decidí involucrarme en la ciencia de la Agronomía.

## RESUMEN

Este trabajo tiene como finalidad la evaluación de la concentración de metales pesados en la cuenca del Río Santa María N°132 (Herrera). Establecidas en las diferentes partes (alta, media y baja); en la época seca (iniciando desde el mes de febrero del 2021). Se tomaron 117 muestras a 30 productores. Cuarenta muestras fueron de suelo, siete de agroquímicos (Herbicidas, fungicidas, insecticidas y fertilizantes). La selección se realizó mediante una encuesta de los más utilizados y con mayor frecuencia: 11 de cultivos (pasto, caña de azúcar, arroz, maíz, sandía, zapallo, café, limón), 30 de agua y 29 de sedimentos para ser analizadas en el laboratorio de suelos del IDIAP (Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá) en Divisa. Se caracterizaron todas las muestras en general y se determinaron los niveles de los metales. Para detectar los metales pesados (Cu, Zn, Cd, Ni y Pb) en las muestras, se preparó una solución de agua regia que consistía en mezclar ácido nítrico  $HNO_3$  con ácido clorhídrico  $HCL$ , para posteriormente leerlas en el espectrofotómetro de absorción atómica. Las muestras de suelos analizadas no presentaron contenido por encima de los niveles máximos permitidos en ninguno de los metales en esta investigación. En los cultivos se encontró que el Zn(zinc), Ni(níquel) y Pb(plomo) sobrepasaron los límites máximos permitidos en cultivos de caña de azúcar, arroz, sandía, zapallo y pasto. En cuanto a los agroquímicos seleccionados (insecticidas y herbicidas), no superaron los niveles máximos permitidos, solamente en el fungicida, el Zn(zinc). Este sobrepasó los límites, mientras que, en los fertilizantes, el Cu(cobre), Zn(zinc) y Ni(níquel) sobrepasaron los límites máximos permitidos en la urea. En

sedimentos hubo presencia de Cu(cobre) y Ni(níquel), con niveles por encima de los límites permitidos, mientras que en el agua solo sobrepasó los límites el Cu(cobre). Finalmente, en el análisis de regresión suelo – cultivo, se encontró que el Cu(cobre) tuvo una correlación positiva con Mg(magnesio) al igual que, el Zn(zinc) con Ca(calcio) y Mg(magnesio). El color y la textura presentaron diferencias altamente significativas entre sí en el análisis estadístico con respecto a la concentración de los metales pesados.

**Palabras claves:** metales pesados, agua regia, antropogénico, biodisponibilidad, movilidad, concentración, Cuenca, muestreo.

## ABSTRACT

The purpose of this work is to evaluate the concentration of heavy metals in the basin of the Santa María River N°132 (Herrera). Established in the different parts (high, medium and low); in the dry season (starting in February 2021). A total of 117 samples were taken from 30 producers. Forty samples were of soil, seven of agrochemicals (herbicides, fungicides, insecticides and fertilizers). The selection was made by means of a survey of the most frequently used: 11 of crops (grass, sugar cane, rice, rice, corn, watermelon, pumpkin, coffee, lemon), 30 of water and 29 of sediments to be analyzed in the soil laboratory of IDIAP (Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá) in Divisa. All samples were characterized in general and metal levels were determined. To detect heavy metals (Cu, Zn, Cd, Ni and Pb) in the samples, a solution of aqua regia was prepared consisting of mixing nitric acid  $HNO_3$  with hydrochloric acid  $HCL$ , and then reading them in the atomic absorption spectrophotometer. The soil samples analyzed did not present contents above the maximum levels allowed in any of the metals in this research. In the crops it was found that Zn(zinc), Ni(nickel) and Pb(lead) exceeded the maximum permissible limits in sugar cane, rice, watermelon, pumpkin and pasture crops. As for the selected agrochemicals (insecticides and herbicides), they did not exceed the maximum permitted levels, only in the fungicide, Zn(zinc). This exceeded the limits, while in fertilizers, Cu(copper), Zn(zinc) and Ni(nickel) exceeded the maximum permissible limits in urea. In sediments, Cu(copper) and Ni(nickel) were present, with levels above the permitted limits, while in water only Cu(copper) exceeded the limits. Finally, in the soil-crop regression analysis, it was found

that Cu(copper) had a positive correlation with Mg(magnesium), as did Zn(zinc) with Ca(calcium) and Mg(magnesium). Color and texture presented highly significant differences between them in the statistical analysis with respect to the concentration of heavy metals.

**Key words:** heavy metals, royal water, anthropogenic, bioavailability, mobility, concentration, basin, sampling.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	- 1 -
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	- 3 -
1.3. ANTECEDENTES.....	- 4 -
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	- 6 -
1.5. OBJETIVOS.....	- 7 -
1.5.1. GENERALES.....	- 7 -
1.5.1.1. ESPECÍFICOS.....	- 7 -
1.6. HIPÓTESIS.....	- 7 -
1.7. ALCANCES Y LIMITACIONES DEL ESTUDIO.....	- 9 -
1.7.1. Alcances.....	- 9 -
1.7.2. Limitaciones.....	- 9 -
2. REVISIÓN LITERARIA.....	- 10 -
2.1. Suelo.....	- 10 -
2.2. Agua.....	- 11 -
2.3. Origen de los metales pesados.....	- 11 -
2.4. Origen natural.....	- 11 -
2.5. Actividad antrópica: influencia en la contaminación por metales pesados.....	- 12 -
2.6. Origen agrícola o ganadero.....	- 12 -
2.7. Factores que afectan la disponibilidad de los metales pesados.....	- 13 -
2.8. Adsorción.....	- 16 -
2.9. Absorción de metales por las plantas.....	- 17 -
2.10. Los metales pesados en la planta.....	- 18 -
2.11. Metales pesados en el agua.....	- 18 -
2.12. Característica de los metales.....	- 19 -
Cadmio (Cd).....	- 20 -
Plomo (Pb).....	- 21 -
Arsénico (As).....	- 22 -
Níquel (Ni).....	- 23 -
El Cobre (Cu).....	- 24 -
Zinc (Zn).....	- 25 -
2.13. Contaminación por fertilizantes.....	- 26 -
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	- 29 -

3.1. Área de estudio.....	- 29 -
3.2. Toma de la muestra en campo .....	- 31 -
3.2.1. Diseño de muestreo .....	- 31 -
3.2.2. Muestreo de suelo.....	- 31 -
3.2.3. Muestreo de agua.....	- 34 -
3.2.4. Muestreo de sedimento .....	- 36 -
3.2.5. Muestreo de fertilizantes y agroquímicos .....	- 38 -
3.2.6. Muestreo de follajes .....	- 39 -
3.3. MÉTODO DE ANÁLISIS EN EL LABORATORIO .....	- 41 -
3.3.1. Caracterización de los análisis de laboratorio.....	- 41 -
3.3.2. Determinación de los metales pesados.....	- 41 -
3.3.3. Determinación de la concentración de metales pesados en suelo y sedimentos. ....	- 42 -
3.3.4. Determinación de la textura del suelo.....	- 43 -
3.3.5. Medición de pH del suelo.....	- 44 -
3.3.6. Condiciones instrumentales del método por espectrofotometría de absorción atómica con llama.....	- 44 -
3.3.7. Determinación de concentración de metales pesados en aguas.-	45
-	-
4. DISEÑO EXPERIMENTAL.....	- 46 -
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	- 47 -
5.1. Característica de los suelos muestreados dentro de la cuenca del Río Santa María.....	- 47 -
5.2. Evaluación del contenido de metales pesados en suelos en la cuenca alta, media y baja del Río Santa María.....	- 49 -
Cobre (Cu).....	52
Zinc (Zn).....	53
Cadmio (Cd).....	54
Níquel (Ni).....	54
Plomo (Pb) .....	55
5.3. Evaluación del contenido total de metales pesados en sedimentos ....	55
Cobre (Cu).....	56
Zinc (Zn).....	57
Níquel (Ni).....	58
5.4. Evaluación del contenido de metales pesados de agua .....	59

Cobre (Cu).....	60
Zinc (Zn).....	60
Plomo (Pb) .....	61
6. Evaluación del contenido de metales pesados en cultivos.....	63
7. Evaluación del contenido de metales pesados en agroquímicos .....	65
8. ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	68
8.1. Análisis de regresión de concentración de metales pesados sistema suelos – cultivos .....	68
8.2. Análisis de varianza suelo.....	70
Cobre total (Cu) .....	70
Zinc total (Zn) .....	71
Cadmio total (Cd) .....	72
Níquel total (Ni).....	73
Plomo total (Pb).....	74
8.3. Metales pesados en color y textura .....	75
8.4. Análisis de varianza textura - color.....	76
Cobre total (Cu) .....	76
Zinc total (Zn) .....	78
Níquel total (Ni).....	80
Plomo total (Pb).....	82
8.5. Análisis multivariado de componentes principales.....	84
CONCLUSIONES .....	89
REFERENCIAS CITADAS .....	91
ANEXOS.....	97
.....	101

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Ubicación de la Cuenca del Río Santa María. ....	30 -
<b>Figura 2</b> Toma de muestra de suelo en campo, 2021.....	32 -
<b>Figura 3</b> Toma de muestra de suelo en campo, 2021.....	32 -
<b>Figura 4.</b> Sitios de muestreo de suelos en las partes alta, media y baja de la cuenca del Río Santa María. 2021 .....	34 -
<b>Figura 5</b> Sitios de muestreo de suelos en las partes alta, media y baja de la cuenca del Río Santa María, 2021.....	35 -
<b>Figura 6.</b> Sitios de muestreo de agua y sedimentos en la parte alta, media y baja de la cuenca del Río Santa María, 2021.....	36 -
<b>Figura 7</b> Toma de muestras de sedimentos en la cuenca del Río Santa María ....	37 -
<b>Figura 8</b> Punto de muestreo de follaje, planta de limón persa, 2021.....	40 -
<b>Figura 9</b> Preparando la solución de agua regia, 2021. ....	42 -
<b>Figura 10</b> Preparando la solución de agua regia, 2021. ....	43 -
<b>Figura 11</b> Análisis de textura, 2021.....	43 -
<b>Figura 12</b> Análisis de textura, 2021.....	44 -
<b>Figura 13</b> Filtrado de muestra de agua, 2021.....	45 -
<b>Figura 14</b> Filtrado de muestras de agua, 2021.....	46 -
<b>Figura 15</b> Contenido de Cu(cobre) según la textura del suelo. ....	77
<b>Figura 16</b> Contenido de Cu(cobre) según el color del suelo. ....	78
<b>Figura 17</b> Gráfica del contenido de Zn(zinc) en relación con la textura del suelo. ....	79
<b>Figura 18</b> Gráfica del contenido de Ni(níquel) según el color del suelo. ....	81
<b>Figura 19</b> Gráfica del contenido de Ni(níquel) según la textura del suelo. ....	81
<b>Figura 20</b> contenido de Pb(plomo) según el color del suelo. ....	83
<b>Figura 21</b> Contenido de Pb(plomo) según la textura del suelo.....	83
<b>Figura 22</b> Gráfica de análisis multivariado de componentes principales de suelos y sedimentos. ....	87
<b>Figura 23</b> Gráfica de análisis multivariado de componentes principales de aguas y sedimentos. ....	88
<b>Figura 24</b> Gráfica de análisis multivariado de componentes principales de cultivos.....	88

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> Ubicación geográfica de muestreo de suelos en la cuenca del Río Santa María. ....	33 -
<b>Tabla 2</b> Ubicación geográfica de muestreo de agua en la cuenca del Río Santa María. ....	35 -
<b>Tabla 3</b> Ubicación geográfica de muestreo de sedimento en la cuenca del Río Santa María. ....	38 -
<b>Tabla 4</b> Lista de fertilizantes y agroquímicos analizados. ....	39 -
<b>Tabla 5</b> Coordenadas geográficas de los cultivos muestreados.....	40 -
<b>Tabla 6</b> Condiciones instrumentales del método por espectrofotometría de absorción atómica con llama continua. ....	44 -
<b>Tabla 7</b> Resumen de la caracterización de suelo en la cuenca del Río Santa María, 2021.....	48 -
<b>Tabla 8</b> Concentración de metales pesados en suelos de la Cuenca del Río Santa María, 2021. ....	51
<b>Tabla 9</b> Concentración total de metales pesados en sedimentos en la Cuenca del Río Santa María, 2021. ....	59
<b>Tabla 10</b> Concentración de metales pesados en aguas de la Cuenca del Río Santa María, 2021. ....	62
<b>Tabla 11</b> Concentración de metales pesados en cultivos dentro de la Cuenca del Río Santa María, 2021.....	63
<b>Tabla 12</b> Contenido de metales pesados en agroquímicos.....	66
<b>Tabla 13</b> Análisis de regresión de metales suelos – cultivos .....	69
<b>Tabla 14.</b> Análisis de correlación de características y minerales disponibles del suelo con minerales y metales pesados totales. ....	69
<b>Tabla 15</b> Análisis de varianza del contenido de cobre. ....	71
<b>Tabla 16</b> Análisis de varianza del contenido zinc.....	72
<b>Tabla 17</b> Análisis de varianza del contenido de Cd(cadmio).....	73
<b>Tabla 18</b> Análisis de varianza del contenido de Ni(níquel). ....	74
<b>Tabla 19</b> Análisis de varianza del contenido de Pb(plomo). ....	75
<b>Tabla 20</b> Análisis de varianza del contenido de Cu(cobre) en relación con la textura y color.....	77
<b>Tabla 21</b> Análisis de varianza del contenido de Zn (zinc en relación con el color y textura. ....	79
<b>Tabla 22</b> Análisis de varianza del contenido de Ni(níquel) según el color y textura..	80
<b>Tabla 23.</b> Análisis de varianza del contenido de Pb(plomo) según color y textura....	82

## ÍNDICE DE ANEXO

<b>Anexo 1</b>	Concentración de Zn en los diferentes tipos de muestreos, 2021.....	97
<b>Anexo 2</b>	Concentración de Cu(cobre) en los diferentes puntos de muestreo 2021..	97
<b>Anexo 3</b>	Concentración de Ni(níquel) en los diferentes puntos de muestreo, 2021.	98
<b>Anexo 4</b>	Concentración de Cd(cadmio) en los diferentes puntos de muestreos, 2021. .....	98
<b>Anexo 5</b>	Concentración de Pb(plomo) en los diferentes puntos de muestreo, 2021.	99
<b>Anexo 6.</b>	Caracterización química de los suelos muestreados.....	100
<b>Anexo 7</b>	Caracterización de suelos por cuenca alta, media y baja.....	101
<b>Anexo 8</b>	Análisis de correlación de sedimento – agua.....	101
<b>Anexo 9</b>	Medida de resumen de metales pesados por localidad .....	102
<b>Anexo 10</b>	Resumen de metales pesados por cuenca alta, media y baja.....	103
<b>Anexo 11</b>	Resumen de metales pesados por tipo de muestra. ....	103
<b>Anexo 12</b>	Medidas resumen metales pesados según su color.....	103
<b>Anexo 13</b>	Medidas de resumen de metales según la textura. ....	104
<b>Anexo 14</b>	Análisis de varianza en Cu(cobre) en la parte alta, media y baja. ....	104
<b>Anexo 15</b>	Análisis de varianza de Cu(cobre) según la localidad.....	105
<b>Anexo 16</b>	Análisis de varianza en Cu(cobre) en suelo y sedimento.....	105
<b>Anexo 17</b>	Análisis de varianza en Zn(zinc) según la localidad. ....	105
<b>Anexo 18</b>	Análisis de varianza en Zn(zinc) en la parte alta, media y baja.....	105
<b>Anexo 19</b>	Análisis de varianza de Cd(cadmio) según la localidad.....	105
<b>Anexo 20</b>	Análisis de varianza de Ni(níquel) según la localidad. ....	105
<b>Anexo 21</b>	Análisis de varianza en Pb(plomo) según la localidad.....	105
<b>Anexo 22</b>	Análisis de varianza en Pb(plomo) en la parte alta media y baja.....	105
<b>Anexo 23</b>	Análisis de varianza en Pb(plomo) en suelo y sedimento. ....	105

## 1. INTRODUCCIÓN

El término metal pesado se refiere a cualquier elemento químico metálico que tenga un peso específico superior a  $4,0 \text{ g/cm}^3$  y peso atómico comprendido entre  $55,85 \text{ g/mol}$  y  $200,59 \text{ g/mol}$ , siendo tóxico o venenoso en concentraciones incluso muy bajas. Ejemplos de metales pesados o algunos metaloides, incluyen: el mercurio (Hg), cadmio (Cd), arsénico (As), cromo (Cr), talio (Tl), y plomo (Pb), entre otros (Lucho et al. 2005).

Los metales pesados constituyen un serio problema ambiental debido a su toxicidad, a sus repercusiones fisiológicas tanto en los seres humanos como en animales y plantas; tal es el caso de los peces. La investigación de la presencia de metales pesados en agua, permite conocer las rutas de contaminantes y su interacción con otras sustancias presentes en el agua.

La presencia de metales pesados en el medio ambiente es una gran amenaza para los seres humanos (Zhang et al. 2012). La toxicidad de estos es un problema generalizado que aparte de afectar al medio ambiente; también lo hace a todos los seres vivos (Siddiqui et al. 2012). La concentración de estos metales en el ambiente se debe mayormente a las actividades antropogénicas (desarrolladas por el hombre). Cada día son más frecuentes y conllevan a una problemática debido a su potencial tóxico con efectos nocivos para la salud humana y el desequilibrio ecológico ambiental.

El estudio de la presencia de metales pesados en aguas de ríos y sedimentos de la Cuenca del Río Santa María (identificada como el número 132 en el sistema hidrológico de América Central, localizada en la vertiente del Pacífico en las provincias de Veraguas, Coclé y Herrera), constituye un aporte a la disposición de información de carácter ambiental de la ribera y contribuirá al diagnóstico y consiguiente a facilitar la toma de decisiones sobre todo de carácter gubernamental.

Los metales pesados se encuentran generalmente como componentes naturales de la corteza terrestre, en forma de minerales, sales u otros compuestos. No pueden ser degradados o destruidos fácilmente de forma natural o biológica ya que no tienen funciones metabólicas específicas para los seres vivos (Abollino et al. 2002). Los metales pesados de origen antropogénico derivan de residuos peligrosos, procedentes de actividades industriales, minería, actividades agrícolas (riego, fertilizantes inorgánicos, pesticidas, estiércol, enmiendas calizas y, sobre todo, el uso de los residuales de depuradoras urbanas).

La movilidad de un metal depende de una serie de parámetros del suelo tales como: pH, materia orgánica, carbonatos, minerales de la arcilla, entre otros. Así, no todos los cationes de cambio están igualmente disponibles, al contrario, depende del mineral o minerales de los que están formando parte como complejo de cambio (González et al. 2008).

## **1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La posible contaminación por metales pesados (Cd, Pb, entre otros) en la cuenca del Río Santa María producto de la acción antropogénica en las áreas de producción agrícola cercana puede causar un efecto adverso al ambiente y a los seres vivos. Debido a que, la cuenca del Río Santa María es una de las fuentes más importantes y caudalosas utilizada como fuente vital para el consumo de las personas, animales, incluso los cultivos. Estos pueden reaccionar o responder con una afectación producto del consumo del líquido natural contaminado.

Se observa desde puntos de vista distintos. Por un lado, están las plantas, ya que estas pueden sufrir una serie de efectos negativos (afecta sus actividades fisiológicas, bioquímicas, entre otras). La toxicidad, por la presencia de estos metales contaminantes, va a depender del tipo de planta y/o la especie, si es tolerante o presenta algunas características que le permitan bloquear, reducir la absorción o expulsar, estos contaminantes. De no presentar estos mecanismos de defensas se podría ver afectada la producción agrícola de diferentes especies de plantas, por ende, de la población.

Por otra parte, está el impacto al ambiente y sobre todo de la población en general. Las consecuencias pueden ser graves (intoxicaciones por el consumo de productos agrícolas que contiene metales pesados), provocando enfermedades en las personas, al igual que en los animales. Convirtiéndose en unos de los contaminantes más peligrosos (amenaza) entre todos los demás productos que afectan la salud y el ambiente.

### 1.3. ANTECEDENTES

A nivel nacional se ha realizado diversos estudios relacionados a la determinación de metales pesados en suelos, agua y sedimentos en las distintas cuencas donde se realizan actividades agropecuarias e industriales cercanas a la zona. Por ejemplo, Espinosa et al. (1987), determinaron la concentración de residuos cúpricos y de metales pesados en suelos agrícolas de Barú asociados con la producción de banano, encontrando niveles de cobre (Cu) superiores a 1000 mg/kg, limitando la siembra de hortalizas y granos en estos suelos. Igualmente, Espinosa (1990), durante el desarrollo de su tesis doctoral en suelos dedicados al cultivo de banano y palma aceitera en Barú, encontró elevados valores totales de cinc (Zn), manganeso (Mn), cobre (Cu), en el suelo, asociándolo con el uso de fungicidas. También alta concentración de plomo (Pb), proveniente de la gasolina y sobre todo altos niveles de níquel (Ni).

Villarreal-Núñez et al. (2018), determinaron la concentración de metales pesados en suelos, sedimentos, abonos orgánicos y agroquímicos que se utilizan comúnmente para la producción agropecuaria dentro de la cuenca del Río La Villa, provincias de Herrera y Los Santos. Posteriormente realizados los muestreos se encontraron elevados valores de Cu en el suelo, Cu, Mn, Cr y As en los sedimentos; en la mayoría de los casos se le atribuyó a la acción antropogénica. Los agroquímicos más utilizados arrojaron altas concentraciones en Cu, Zn, Cr y Ni. Especialmente los fungicidas presentaron niveles muy altos de Cu y Mn. Fertilizantes fosforados presentaron alta

concentración de Cr y en los fertilizantes nitrogenados se determinaron niveles elevados de Zn.

Villarreal et al. (2013) elaboraron mapas de fertilidad de suelos a nivel nacional tomando como base los análisis de suelos realizados en el Laboratorio de Suelos del IDIAP (Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá). Se generaron 15 mapas digitales resultado de la interpolación de datos de variables de suelo como: aluminio, materia orgánica, cobre, hierro, saturación de aluminio, pH, fósforo, potasio, calcio, magnesio, manganeso, zinc, contenido de bases cambiables, contenido de microelementos y textura. La clasificación de la leyenda para cada mapa está en función de los niveles críticos utilizados por el laboratorio. Posteriormente comprobaron que en general, los suelos presentan deficiencia en fósforo, zinc, calcio y materia orgánica; elevada acidez y alta saturación de aluminio.

Santo et al. (2019), determinaron los metales pesados en la cuenca N° 128 del Río la Villa de las provincias de Herrera y Los Santos en la cuenca alta, media y baja de actividad agrícola y ganadera durante los meses de octubre (época lluviosa) 2016 y marzo (época seca) 2017. Posteriormente realizados los muestreos en fincas de productores de los principales cultivos, leche, heces de bovino y productos fitosanitarios (herbicidas y fungicidas) dentro de la zona, todas las muestras de cultivos colectadas presentaron altos valores de Cu, Cr, Cd, As. En el agua había altas concentraciones de Cd, Cr, Mn, Zn y Pb. En leche muestreada los resultados arrojaron altas concentraciones de Arsénico en la cuenca media y baja. En los productos fitosanitarios como herbicidas y

fungicidas los valores de Cu, Zn, Ni y Cr sobrepasaron los límites permitidos (USEPA 1993).

#### **1.4. JUSTIFICACIÓN**

Aunque las cantidades obtenidas en investigaciones previas (Metales pesados) no son consideradas como altas para llegar a ser tóxicos, se busca determinar en esta investigación el nivel de concentración de metales pesados en la cuenca del Río Santa María (número 132 en el sistema hidrológico de América Central).

Es importante estimar el impacto ambiental de los niveles de ciertos compuestos (Metales pesados), que pueden llegar a ser altamente tóxicos para los cultivos, por ende, a la población.

Las escasas investigaciones referentes a los metales pesados en las cuencas de los ríos del país, pueden servir como referencia para futuros trabajos relacionados a este tema. Igualmente, es muy importante adquirir datos sobre las concentraciones de metales pesados en estas cuencas que le sirven a los especialistas para resolver problemas de contaminación, lo que, beneficiará a los productores y consumidores de productos agrícolas y pecuarios.

## 1.5. OBJETIVOS

### 1.5.1. GENERALES

- ❖ Evaluar la concentración total de metales pesados en suelos, agua, sedimentos, cultivos y agroquímicos en la cuenca del Río Santa María, en áreas de uso agropecuario.

#### 1.5.1.1. ESPECÍFICOS

- ❖ Determinar las concentraciones de metales pesados en agua, suelos y sedimentos de la Cuenca, si alcanzan los niveles para considerarse tóxicos para los cultivos.
- ❖ Determinar la concentración de metales pesados en los cultivos más importantes dentro de la Cuenca.
- ❖ Determinar la concentración de metales pesados en los principales agroquímicos utilizados por los productores dentro de la Cuenca.

## 1.6. HIPÓTESIS

### Hipótesis 1:

**Ho:** La concentración de metales pesados en suelo, agua y sedimentos en las áreas de producción agrícola, pecuarias e industriales intensivas, no sobrepasa los niveles críticos según las normas panameñas e

internacionales y valores de referencias de autores (CAPANIT, EPA, Aguilar et al., 1999 y Kabata-Pendias & Pendias, 1992), en la cuenca del Río Santa María.

**HA:** La concentración de metales pesados en suelo, agua y sedimentos en las áreas de producción agrícola, pecuarias e industriales intensivas, sobrepasa los niveles críticos según normas panameñas e internacionales y valores de referencias de autores (CAPANIT, EPA, Aguilar et al., 1999 y Kabata-Pendias & Pendias, 1992), en la Cuenca del Río Santa María.

### **Hipótesis 2:**

**Ho:** La concentración de metales pesados en cultivos dentro de la Cuenca 132, en zonas con importante producción agropecuaria, no sobrepasan los niveles críticos descrito por (Kabatas-Pendias y Pendias, 2001).

**HA:** La concentración de metales pesados en cultivos dentro de la Cuenca 132, en zonas con importante producción agropecuaria, sobrepasan los niveles críticos descrito por (Kabatas-Pendias y Pendias, 2001).

### **Hipótesis 3.**

**Ho:** El contenido de metales pesados en los fertilizantes y agroquímicos utilizados por los productores, no sobrepasan los niveles críticos con

valores de referencia según (Alloway, 1995, Kabatas - Pendias y Pendias, 1984 y Colmer y Sánchez, 2000).

**HA:** El contenido de metales pesados en los fertilizantes y agroquímicos utilizados por los productores, sobrepasan los niveles críticos con valores de referencias según (Alloway, 1995, Kabatas - Pendias y Pendias, 1984 y Colmer y Sánchez, 2000).

## **1.7. ALCANCES Y LIMITACIONES DEL ESTUDIO**

### **1.7.1. Alcances**

En esta investigación se evaluó la presencia de metales pesados en la cuenca del Río Santa María con el fin de determinar el nivel de contaminación en áreas de uso agropecuario intensivo en la ribera. Se logró en este estudio identificar zonas de riesgos que pueden causar daños a la producción y a la vez a las personas de esta área. Además, se determinó los principales metales pesados en esta área que podrán ser utilizadas como referencia de futuras investigaciones.

### **1.7.2. Limitaciones**

En esta investigación se evaluó suelo, agua y sedimentos, además de eso se estudió la presencia de metales pesados en las plantas (cultivos principales de esta cuenca) y agroquímicos más utilizados por el productor. No se logró

estudiar todos los cultivos y agroquímicos de la cuenca; ya que el tiempo de investigación no alcanzó. Igualmente, no se abarcó todas las fincas, industrias u otras áreas donde se realizan actividades agrícola o pecuaria cercanas a la Cuenca 132. Además de eso la falta de investigaciones dificultó la interpretación de los resultados puesto que, no se han realizado tantos estudios referentes a los metales pesados y sus concentraciones. Por esta razón, al no contar con datos de referencia, que colaboren en la determinación del resultado no se podrá obtener una estimación del impacto en sí de los metales pesado en dicha cuenca.

Una de las limitantes más importantes en esta investigación fue el presupuesto asignado que dificultó un estudio más detallado por el alto costo de insumos, reactivos, entre otros. Además, la dimensión de esta cuenca eleva los costos al realizar los muestreos y traslado a las diferentes fincas.

## **2. REVISIÓN LITERARIA**

### **2.1. Suelo**

El suelo puede definirse como un material de profundidad variable, con un contenido sustancial de sólidos en la superficie de la tierra que padecen cambios como consecuencia de procesos biológicos, físicos y químicos (Young et al. 1994).

El suelo se forma por la interacción de los sistemas atmósfera, hidrósfera y biósfera sobre la superficie de la geósfera. Ocupa la interfase entre la geósfera

y los demás sistemas, en la llamada Zona Crítica, la parte más dinámica de la superficie de la Tierra. La meteorización química y mecánica de las rocas y la influencia de ciertos procesos microbiológicos producen el suelo (National Research Council, 2001; Brantley et.al. 2007).

## **2.2. Agua**

El agua es un elemento de la naturaleza, integrante de los ecosistemas naturales, fundamental para el sostenimiento y la reproducción de la vida en el planeta ya que constituye un factor indispensable para el desarrollo de los procesos biológicos que la hacen posible (Paredes, 2013).

## **2.3. Origen de los metales pesados**

Por su origen los metales pesados y elementos traza son de importancia en el ambiente por su trascendencia en la contaminación de los suelos y, por tanto, de cultivos agrícolas. Pueden ser de naturaleza geogénica con origen natural o antropogénica. Se habla de origen natural cuando los contenidos de metales se atribuyen a la composición de los distintos minerales presentes en el suelo.

Los metales son de origen antrópico cuando sus concentraciones son mayores a las correspondientes a su composición geoquímica y son el resultado de las actividades del hombre por actividades industrial, en mineras y agropecuarias (USEPA, 1993).

## **2.4. Origen natural**

El contenido en elementos metálicos de un suelo libre de interferencias humanas depende en primer lugar de la descomposición de la roca madre

originaria y de los procesos erosivos sufridos por los materiales que conforman el mismo (Adriano, 1986).

En principio, los contenidos de metales en suelos son debidos a la meteorización del material originario. Además, la erosión de los minerales provocada por el viento y la lluvia, y la descomposición de las rocas, son los principales procesos naturales por los cuales los metales pueden incorporarse al ciclo hidrológico. La liberación de cationes de una roca por meteorización depende de diferentes parámetros como clima, topografía, permeabilidad, tiempo, y actividad biológica, particularmente de los microorganismos.

### **2.5. Actividad antrópica: influencia en la contaminación por metales pesados**

La contaminación de origen antropogénico es producto de la intervención humana en el ciclo biogeoquímico de los metales pesados. El uso de los metales pesados ha ido aumentando paralelamente al desarrollo industrial y tecnológico. Actualmente es difícil encontrar una actividad industrial o un producto manufacturado en los que no intervenga algún metal pesado. Si bien, la tendencia, aunque lenta, es sustituir progresivamente en la industria, algunos metales pesados potencialmente tóxicos por otros materiales más inocuos (Forstner y Wittmann, 1981).

### **2.6. Origen agrícola o ganadero**

Los orígenes agrícolas de metales pesados en las aguas continentales son causados por la lixiviación de los terrenos de los cultivos en los que se ha producido una acumulación previa de dichos elementos debido al uso o abuso de pesticidas, fertilizantes y desechos orgánicos susceptibles de ser utilizados

como abono. Los metales pesados presentes en los terrenos alcanzan los cursos de agua no sólo directamente al ser lixiviados por la escorrentía superficial (aguas de riego y de tormentas), sino también indirectamente al infiltrarse desde acuíferos previamente contaminados (Forstner y Wittmann et. al, 1981).

Los contaminantes de origen ganadero son los debidos a los desechos de los animales y a los que proceden del lavado de establos y granjas. La concentración de metales en dichos materiales es variable y depende del tipo de ganado del que se trate, de la edad del animal, tipo de establo e incluso del manejo de los desechos (Adriano, 1986).

De las altas dosis de microelementos, Cu y Zn principalmente, añadidas a determinadas dietas de porcino y aves de corral, los purines de estos animales pueden contener de diez a cuarenta veces más de Cu y cuatro a diez veces más de Zn que el de un estiércol normal (Adriano, 1986).

## **2.7. Factores que afectan la disponibilidad de los metales pesados**

El comportamiento y destino de los metales como contaminantes, se encuentra dirigido por una variedad de procesos fisicoquímicos que dictaminan su disponibilidad y movilidad en suelos o sedimentos. No obstante, en la fase acuosa, la forma química del metal determina la disponibilidad biológica y la reactividad química (sorción/desorción, precipitación, disolución) frente a otros componentes del suelo o los sedimentos (Tessier; Campbell; Bisson, 1979).

Los principales factores del suelo que controlan la solubilidad y potencial disponibilidad de los metales en el suelo son pH, potencial redox, textura,

contenido y tipo de arcilla, materia orgánica, óxidos de Fe y Mn, la presencia de cationes y aniones en solución (Rieuwerts et al. 1998; Reichman, 2002; Silveira et al. 2003; Basta, 2004).

- pH:

Es el principal factor de control de la disponibilidad de los metales para las plantas. La mayor parte de los metales tienden a estar más disponibles a pH ácido, ya que al producirse un descenso de este se mejora tanto la solubilidad de los metales como su absorción por las raíces de las plantas. En algunos casos, suele ocurrir que un incremento del pH del suelo no provoca necesariamente una disminución en la disponibilidad de los metales como ocurre con el As (arsénico), Mo(molibdeno), Se(selenio) y Cr(cromo). De manera que, el pH es un parámetro importante para definir la movilidad del catión, debido a que en medios de pH moderadamente alcalino se produce la precipitación como hidróxidos. Sin embargo, en medios muy alcalinos estos hidróxidos pueden pasar de nuevo a la solución como hidroxicomplejos. Por otra parte, algunos metales como Se (selenio), V (vanadio), As(arsénico) y Cr(cromo) pueden estar en la disolución del suelo en forma de aniones solubles.

- Textura:

Los suelos de textura fina proceden probablemente de minerales secundarios que se alteran con facilidad y que son generalmente la fuente principal de metales pesados. Los suelos de textura gruesa tienen minerales primarios como el cuarzo, con un bajo contenido en metales pesados.

- Potencial Redox:

Muchos metales forman sulfuros relativamente insolubles en condiciones fuertemente reductoras. Estos incluyen el Cd(cadmio), Zn(zinc), Ni(níquel), Co(cobalto), Cu(cobre) y Pb(plomo). Otros metales como: Fe(hierro) y Mn(manganeso) pueden volverse más solubles en estas condiciones.

- Materia orgánica:

La materia orgánica del suelo (MOS) se compone de sustancias húmicas y no húmicas, siendo las sustancias húmicas los compuestos más estables de suelos (ácidos húmicos, ácidos fúlvicos y huminas), además, tiene un número relativamente grande de grupos funcionales (CO<sub>2</sub>, OH, C=C, COOH, SH, CO<sub>2</sub>H) que tienen una alta afinidad por los iones metálicos, pudiendo formar complejos órgano-metálicos (Kabata-Pendias y Pendias, 2000).

La relación entre la materia orgánica y los metales es importante en la biodisponibilidad de éstos debido a su alta capacidad de formar complejos (Reichman, 2002). Los grupos carboxilatos (COO<sup>-</sup>) de la materia orgánica forman complejos estables con los metales, especialmente en ambientes alcalinos, donde la afinidad es mayor (González, 1993,1995; Baker y Senft, 1995; Yin et al., 1996). De esta forma los metales pesados quedan adsorbidos en la materia orgánica del suelo y en otras formas de materia orgánica humificada (Rieuwertts et al., 1998; Silveira et al., 2003; Basta, 2004). Por lo tanto, al aumentar la cantidad de materia orgánica en el suelo también aumenta la formación de complejos órgano-metálicos. En general,

las plantas no absorben complejos metálicos grandes por lo que su biodisponibilidad disminuye, sin embargo, también existen compuestos orgánicos solubles asociados a los metales pesados (Alloway, 1995b).

## **2.8. Adsorción**

La adsorción de metales por el suelo es un mecanismo importante que afecta el movimiento y destino del metal. Los metales pesados pueden ser adsorbidos por la superficie de los coloides del suelo a través de adsorción no específica y adsorción específica. La adsorción no específica es la adsorción de cationes por el suelo, que se caracteriza porque el ion es atraído electrostáticamente por las superficies cargadas de la fracción coloidal del suelo, sin que haya una dependencia de configuración electrónica con el grupo funcional de la superficie del suelo, formando complejos llamados de esfera externa (Sposito, 1989; Golberg, 2000; Silva, 2004).

La cantidad de iones que pueden ser adsorbidos de forma intercambiable en el suelo es función de la capacidad de intercambio catiónico. En la mayoría de los casos existe selectividad o preferencia de un catión por otro, siendo un proceso competitivo y reversible (Silva, 2004). Se produce una adsorción específica en que los metales son removidos de la solución del suelo y retenidos en la superficie de los coloides formando moléculas estables, llamadas complejos de esfera interna. Este mecanismo muchas veces no es reversible (Silveira et al. 2003; Santo, 2019).

## **2.9. Absorción de metales por las plantas**

Las plantas han desarrollado mecanismos altamente específicos para absorber, translocar y acumular nutrimentos (Lasat, 2000), sin embargo, algunos metales y metaloides no esenciales para los vegetales son absorbidos, traslocados y acumulados en la planta debido a que presentan un comportamiento electroquímico similar a los elementos nutritivos requeridos.

La absorción de metales pesados por las plantas es generalmente el primer paso de su entrada en la cadena alimentaria. La absorción y posterior acumulación dependen primero, del movimiento de los metales desde la solución del suelo a la raíz de la planta. Segundo, el paso de los metales por las membranas de las células corticales de la raíz. Tercero, el transporte de los metales desde las células corticales a la xilema desde donde la solución con metales se transporta de la raíz a los tallos. Cuarto, la posible movilización de los metales desde las hojas hacia tejidos de almacenamiento usados como alimento (semillas, tubérculos y frutos) por el floema. Después de la absorción por los vegetales los metales están disponibles para los herbívoros y humanos directamente o a través de la cadena alimentaria.

Otro mecanismo de ingreso de sustancias potencialmente tóxicas a las plantas, como los metales pesados, es mediante la absorción foliar. La disponibilidad a través de las hojas de algunos elementos traza provenientes de fuentes aéreas puede tener un impacto significativo en la

contaminación de las plantas y también es de particular importancia en la aplicación de fertilizantes foliares (Kabata – Pendias, 2000). La absorción foliar es mediada por una fase de penetración cuticular y un mecanismo de carácter metabólico que considera la acumulación de los elementos contra un gradiente de concentración.

### **2.10. Los metales pesados en la planta**

La absorción de metales pesados por las plantas es generalmente el primer paso para la entrada de estos en la cadena alimentaria. La absorción y posterior acumulación dependen en primera instancia del movimiento (movilidad de las especies) de los metales desde la solución en el suelo a la raíz de la planta. En plantas, el concepto de bioacumulación se refiere a la agregación de contaminantes; algunos de ellos son más susceptibles a ser fitodisponibles que otros (Kabata-Pendias, 2000).

Al margen de que sean esenciales, o por el contrario resulten tóxicos, los elementos presentes en concentraciones bajas se denominan normalmente “elementos traza” Bargagli (1998), utiliza este término para todos aquellos elementos cuya concentración en la planta es menor que 0.1% (1000 mg kg<sup>-1</sup>) sin embargo, otros autores establecen un límite muchos más bajos 0.001% (Adriano, 1986).

### **2.11. Metales pesados en el agua**

El incremento de concentración en las aguas de estos compuestos se debe principalmente a contaminación puntual de origen industrial o minero. Los lixiviados de vertederos o vertidos de aguas residuales pueden ser asimismo una fuente de contaminación. También, en algunos casos existen

aguas que sufren un proceso de enriquecimiento natural en metales pesados al atravesar acuíferos formados por rocas que los contienen en su composición. Los metales pesados son, en general, tóxicos para los seres humanos, y además su característica de ser bioacumulativos (no pueden ser eliminados por el cuerpo) provoca que las concentraciones permitidas en el agua de consumo humano sean muy pequeñas. Los límites establecidos en el agua de consumo humano para los principales metales pesados (COPANIT, 1999):

Mercurio: 0.001 mg/l

Níquel: 0.02 mg/l

Cobre: 1 mg/l

Plomo: 0.01 mg/l

Cromo: 0.05 mg/l

## **2.12. Característica de los metales**

Los metales pesados son aquellos cuya densidad es por lo menos cinco veces mayor que la del agua. Tienen aplicación directa en numerosos procesos de producción de bienes y servicios.

Dado que este concepto se relaciona con elementos tóxicos y contaminantes, suele adoptarse la denominación de elemento o metal traza para hacer referencia a todos los elementos presentes en el medio ambiente en un rango de concentración entre 0.01-100 mg kg<sup>-1</sup> (Jenkins y

Gareth, 1980; Alloway, 1990), donde se incluyen tanto elementos esenciales como contaminantes.

### **Características generales de los metales más comunes en el suelo y agua:**

#### **Cadmio (Cd)**

El cadmio forma parte de la composición natural de algunas rocas y suelos y provoca una liberación al medio ambiente cercana a 25000 toneladas. De otra parte, por vía antrópica las concentraciones en el ambiente pueden ser incrementadas considerablemente. Ya que es un metal ampliamente utilizado en la industria y productos agrícolas, esto ha producido un progresivo aumento en su producción. El 5% del metal es reciclado y debido a su notable movilidad, provoca una importante contaminación ambiental (Marruecos et. al. 1993).

La población está expuesta al cadmio por diversas vías: i) Oral, a través del agua y la ingesta de comida contaminada con este elemento (hojas de vegetales, granos, cereales, frutas, vísceras animales y pescado) (Navarro & Méndez-Armenta 2011). En algunos países de Europa y Norte América la ingesta diaria de cadmio varía entre 10 y 40  $\mu\text{g}/\text{día}$ . ii) La inhalación de partículas durante actividades industriales en personas laboralmente expuestas, donde la concentración de cadmio puede tener valores superiores a 50  $\mu\text{g}/\text{L}$ . iii) Finalmente, por vía dérmica, aunque las concentraciones absorbidas son muy reducidas.

Al cadmio se le reconoce como uno de los metales pesados con mayor tendencia a acumularse en las plantas. El cadmio causa severos desequilibrios en los procesos de nutrición y transporte de agua en las plantas (Singh y Tewari, 2003). La favorabilidad de acumulación de cadmio en las plantas ha llevado a considerarlas como potenciales candidatos para tareas de fitoremediación de este metal.

### **Plomo (Pb)**

El Pb se encuentra en las rocas magmáticas y sedimentos arcillosos en una concentración de entre 10 y 40 mgkg<sup>-1</sup>, en las rocas intrusivas y sedimentos calcáreos está presente por debajo de 10 mgkg<sup>-1</sup>. También, puede formar compuestos con la materia orgánica y las arcillas los cuales limitan la movilidad de este elemento. La biodisponibilidad del Pb es mayor en suelos arenosos ácidos y con bajo contenido en materia orgánica; por encima de un pH de 5.0 se forman complejos organometálicos de Pb. Sólo una pequeña fracción del Pb en suelos contaminados aparece como compuesto soluble en agua (0,02 – 1%). Las emisiones volcánicas, el humo de incendios forestales, son algunas de las fuentes naturales de Pb (Andreu, 1991; Galán y Romero, 2008).

El plomo es un metal pesado que se ha utilizado durante muchos años debido a su resistencia a la corrosión, ductilidad, maleabilidad y facilidad para formar aleaciones. El plomo es absorbido por inhalación, ingestión y a través de la piel (Bayona, 2009; NavaRuíz y Méndez-Armenta, 2011). Las principales vías de exposición son: i) inhalación de partículas de plomo

generadas por combustión de algunos materiales. ii) La ingestión de polvo, agua o alimentos contaminados (Zurera et. al., 1987). Tiende a distribuirse en diferentes órganos, tejidos, huesos y dientes, donde se va acumulando con el paso del tiempo. La intoxicación por plomo varía de acuerdo con la edad de la persona y su nivel de exposición.

### **Arsénico (As)**

El arsénico es un metal integrante de minerales metálicos y sulfuros de otros metales, como el Cu(cobre), Co(cobalto), Pb(plomo) y Zn(zinc), entre otros. Numerosos compuestos de arsénico son solubles en agua, especialmente en forma de  $As^{3+}$  y  $As^{5+}$  y complejos orgánicos (Adriano, 1986; Marín, 1996).

En las aguas superficiales predomina la reacción de oxidación de arsenito a arseniato:  $2H_2O + HAsO_4^{2-} + HAsO_2^- + 4H^+ + 2e^-$ . Mientras que en las zonas reductoras ocurre el proceso inverso. La eliminación natural de As(arsénico) de las aguas, generalmente, se produce por adsorción sobre óxidos de Fe(hierro) y Al(aluminio) y partículas arcillosas, así, como también puede precipitar como arseniato de hierro  $FeAsO_4$ . En ambientes anóxicos y en presencia de iones  $S^{2-}$ , el arsenito se puede transformar a sulfuro de arsénico (III), el cual precipita en los sedimentos (Dojlido y Bets, 1993; Doménech, 1995).

Este elemento químico en mayor proporción proviene de la industria química, minería, agricultura (insecticidas arsenicales), productos farmacéuticos, de las fundiciones de metales no ferrosos y de la combustión

de carbón mineral (Kjedsberg y Ward, 1972; Albert, 1990; Vega, 1990; Doménech, 1995; Marín, 1996). La concentración del arsénico en la corteza terrestre es aproximadamente de 5.0 g/g. Los minerales con mayores concentraciones son los arseniuros de Cu, Pb, Ag y Au, y los sulfuros de arsénico siendo, el compuesto más utilizado, el trióxido de arsénico como subproducto en la fundición de minerales de Cu y Pb (Astolfi, 1971; Vega, 1990). Por otro lado, el arsénico de calcio y de plomo se utilizan en la agricultura como pesticidas, herbicidas y venenos (Adriano, 1986).

### **Níquel (Ni)**

El Ni(níquel) se encuentra en las rocas magmáticas y sedimentos arcillosos en una concentración de entre 10 y 40 mg kg, en las rocas intrusivas y sedimentos calcáreos está presente por debajo de 10 mg kg. También, puede formar compuestos con la materia orgánica y las arcillas los cuales limitan la movilidad de este elemento. La biodisponibilidad del Pb(plomo) es mayor en suelos arenosos ácidos y con bajo contenido en materia orgánica; por encima de un pH de 5.0 se forman complejos organometálicos de Pb(plomo).

En seres humanos, provoca la enfermedad de saturnismo que consiste en la alteración de la biosíntesis de hemoglobina, bloqueo del transporte de oxígeno y anemia, puede producir daños en el cerebro (neurotóxico) y en los riñones, alteraciones en el comportamiento (agresividad, disminución de la capacidad de aprendizaje de los niños), disminución de la calidad del esperma, abortos y descalcificación de los huesos al intercambiarse por el

Ca<sup>2+</sup> óseo. A dosis elevadas puede provocar encefalopatías, parálisis y muerte. La principal vía de exposición para la población es la ingesta y la segunda la inhalatoria (US EPA, 2005c).

## **El Cobre (Cu)**

El cobre es un elemento abundante en la corteza terrestre estimándose en el rango de 24-55 g/g. Se presenta principalmente en forma de sulfatos, carbonatos, de sulfuros de Fe(hierro) y Cu(cobre) calcopirita (CuFeS<sub>2</sub>), bornita (Cu<sub>5</sub>FeS<sub>4</sub>), cuprita (óxido de cobre), malaquita y azurita (carbonatos de cobre).

En soluciones acuosas el cobre puede presentarse en la forma Cu<sup>2+</sup> o Cu<sup>1+</sup>, pero las condiciones redox en aguas oxigenadas y la tendencia del Cu<sup>+</sup> a la forma Cu<sup>++</sup>, favorece la existencia de las formas más oxidadas (Hem, 1989; Navarro et al., 1998). Tiene tendencia a concentrarse en los óxidos de manganeso sedimentarios y en fracciones de minerales de arcilla, especialmente en aquellas ricas en carbono orgánico. En ausencia de materia orgánica, el ión Cu<sup>2+</sup> precipita como hidróxido al pH al que suele encontrarse el agua de una corriente fluvial, también puede precipitar como CuCO<sub>3</sub>. Aún en ausencia de ligandos orgánicos, una parte puede formar complejos con iones OH<sup>-</sup> y CO<sub>2</sub>.

Nriagu (1979) estimó que las emisiones mundiales de cobre a la atmósfera eran de unas 18,500 toneladas anuales de origen natural (polvos transportados por el viento, partículas de origen volcánico, exudados de la vegetación, etc.) y 56,300 toneladas anuales por causas antropogénicas

(metalurgia, combustión de maderas y combustibles fósiles). El 83% de las emisiones de este metal a la atmósfera se depositan posteriormente en las zonas continentales y el resto en los océanos. Desde el aire el cobre puede alcanzar los ambientes acuáticos tanto por precipitación húmeda (lluvia), como seca (polvo).

## **Zinc (Zn)**

El Zn(zinc) se encuentra principalmente en las rocas magmáticas. Tiende a sustituir al  $Mg^{+2}$  en los silicatos, también quedar adsorbido por la materia orgánica (formando complejos de Zn con ligandos orgánicos) y las arcillas. Está fuertemente relacionado con la presencia de plomo y cadmio, siendo muy posible que los tres elementos estén presentes cuando se detectan problemas con uno de ellos (Porta et al. 2003).

A pH inferiores a 7 el Zn(zinc) se encuentra en estado iónico ( $Zn^{+2}$ ) y, por tanto, biodisponible. Por encima de un pH  $>7.7$  precipita como hidróxido, carbonato o sulfuro, por tanto, su movilidad/solubilidad disminuye conforme aumenta el pH. Comparado con el contenido total de Zn en los suelos, la concentración presente en la fase acuosa del suelo es baja. Además, de la solubilidad y el pH, otros factores que influyen en la biodisponibilidad del Zn son: la humedad, el contenido en arcillas y materia orgánica, la concentración total de Zn en el suelo, la actividad microbiana y las interacciones con otros macro- y micronutrientes (US EPA, 2007c).

### **2.13. Contaminación por fertilizantes**

La contaminación del agua por los fertilizantes se produce principalmente por lixiviación en aguas subterráneas y superficiales. La lixiviación de nitratos, producto de algunas prácticas agrícolas. Facilita su infiltración en aguas subterráneas y superficiales, afectando negativamente la salud humana por el consumo excesivo de nitratos. Los impactos negativos de los fertilizantes en el suelo son la variación del pH, deterioro de la estructura del suelo y microfauna. Por último, el impacto negativo al aire se debe principalmente a las aplicaciones inadecuadas, lo cual genera contaminación en el ambiente (Savci, S. 2012).

Los fertilizantes se añaden al suelo para aumentar el rendimiento de los cultivos. En cada recolección se extraen elementos nutritivos: N(nitrógeno), P(fósforo), K(potasio), S(azufre), Ca(calcio) y Mg(magnesio) que hay que devolver al suelo en forma de nitratos, fosfatos, sales en cantidades equivalentes a las extraídas. Sin embargo, cada vez se añaden en mayor proporción y ha cesado la devolución a la tierra del humus que garantiza su fertilidad, deteriorándose así la estructura edáfica al no crear el complejo adsorbente arcillo-húmico.

- Nitratos y fosfatos:

El nitrógeno es uno de los nutrientes primarios, siendo la principal limitante para la productividad agrícola, debido a que el N(nitrógeno) es un constituyente de enzimas, proteínas, ADN (ácido desoxirribonucleico), y clorofila. Los principales impactos de la aplicación del nitrógeno son la eutrofización, acidificación y toxicidad. La eutrofización de los hábitats

pobres en nutrientes ocurre cuando existe una sobre disponibilidad de nutrientes en comparación a los niveles naturales. Debido a lo anterior, el tener una mayor disponibilidad de N(nitrógeno) produce un aumento de la productividad de las plantas y cambios en el ciclo del nitrógeno. La acidificación de los suelos y sistemas de agua dulce se produce por la captación y asimilación del amonio por las raíces de las plantas, en el proceso de nitrificación y lixiviación del nitrato. Por último, la toxicidad directa se produce por el amoniaco y el dióxido de nitrógeno (ambos en estado gaseoso)

El fósforo, esencial para el desarrollo de las plantas y la producción de alimentos. El principal impacto al medio ambiente es la aceleración del proceso de eutrofización en los cuerpos de agua y conduce a la floración de cianobacterias, cuya causa principal es la sobre fertilización o la contaminación por desechos de la producción animal (Pradel y Aissani, 2019).

- Pesticidas:

Son distribuidos de manera voluntaria sobre el medio natural. Se usan para proteger a animales de ciertos parásitos o para destruir plagas de cultivos, pero los pesticidas afectan al conjunto del ecosistema.

El empleo de plaguicidas altamente peligrosos en los campos agrícolas repercute en los ecosistemas tanto terrestre como marino, incidiendo en los trabajadores del campo, en las hormonas, causan daños genéticos, alteraciones del comportamiento y por último daños celulares (García, et

al., 2018). Los hallazgos reportan que los plaguicidas con mayor residualidad toxicológica se encuentran en los de tipo insecticidas (Schaaf, 2013). Estos insumos por lo general son herbicidas, insecticidas, acaricidas, fungicidas, nematocidas que son los más frecuentemente usados. Estas aplicaciones ocasionan diversos daños a la flora y fauna benéfica, que impactan en forma negativa al medio ambiente. Sin embargo, el uso de plaguicidas con mayor residualidad afectan a la fauna benéfica mediante su desaparición, ocasionado por el desconocimiento de parte de los agricultores en diferenciar un insecto benéfico de una plaga.

### **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. Área de estudio**

El estudio se realizó en la Cuenca del Río Santa María, identificada como la N° 132 en el sistema hidrológico de América Central (Figura 1). Se encuentra localizada en la vertiente del Pacífico en las provincias de Veraguas, Coclé y Herrera (8°05'25"N 80°29'01"O). El área de drenaje total de la cuenca es de 3,079.38 Km<sup>2</sup> desde su nacimiento hasta la desembocadura en el mar (Bahía de Parita) la longitud del río principal es de 173.0 Km con zona agroecológica 1 y 2 (zona del arco seco y zona de sequía intermedia).

La elevación media de la cuenca es de 200 msnm, y el punto más alto se encuentra en la Cordillera Central con una elevación de 1,528 msnm.

La Cuenca del Río Santa María se integra en un contexto social y ambiental de importantes sistemas naturales que funcionan de manera interrelacionadas.

Los principales aspectos a considerar en el manejo de la cuenca son:

En su parte alta, se encuentra el Parque Nacional Santa Fe y la Reserva Forestal La Yeguada (en los límites), ambos presentan condiciones favorables de protección y conservación, para las interrelaciones internas de la parte alta de la cuenca y hacia la parte baja de la misma. En dicha parte de la cuenca (alta), se encuentra el mayor potencial hidroenergético, desarrollo eco turístico y de conservación. Sin embargo, como respuesta a las demandas de las poblaciones rurales, es posible el desarrollo de la producción, mediante

sistemas agroforestales, aunque exista limitada capacidad productiva de los suelos.

En su parte media, la cuenca se relaciona con cuencas vecinas, cuyas poblaciones se vinculan con el sistema hídrico (como es el caso de la demanda de agua potable de la ciudad de Santiago de Veraguas) y en sus inmediaciones territoriales existe un potencial importante para actividades agropecuarias (riego de tierras agrícolas para cultivos industriales y ganadería).

En su parte baja, la cuenca se vincula con el sistema costero marino de la Bahía de Parita, manglares y actividades turísticas. El potencial y la conservación de este sistema dependerán de un manejo adecuado de las tierras en las partes alta y media de la cuenca. En su conjunto, las tierras de la parte media y baja, así como los servicios ambientales requeridos, dependerán en gran medida de las acciones de protección, conservación y producción sostenible, que se implementen en la parte alta de la cuenca.



**Figura 1** Ubicación de la Cuenca del Río Santa María.

## **3.2. Toma de la muestra en campo**

### **3.2.1. Diseño de muestreo**

Las muestras obtenidas fueron tomadas al azar en el campo buscando una mayor homogeneidad y representatividad del área de estudio, la cual en cada punto muestreado se tomó las coordenadas respectivas para su localización, utilizando un programa llamado "Fields area Measure PRO" que permite la ubicación exacta de cada sitio.

### **3.2.2. Muestreo de suelo**

Se procuró tomar un área de la finca a muestrear, preferentemente rectangular de aproximadamente 10 x 30 metros (Figura 2), luego al realizar los muestreos se utilizó el método sistemático o de rejilla que consiste en seleccionar puntos de muestreos a distancias uniformes en zig zag, diagonal o cuadrícula (Mason 1992), tomando un total de sub muestras de 10 a 15 con una profundidad de 0-30 cm (Figura 3), obteniendo una muestra compuesta más homogénea. Se tomaron muestras en áreas de producción agropecuaria intensiva y a la vez, en áreas de poca o nula actividad agrícola y pecuaria, para su posterior comparación. Los sitios muestreados fueron ubicados en el mapa de la cuenca

Figura 4), para eso se tomaron las coordenadas geográficas de cada punto de muestreo (Tabla (1)).



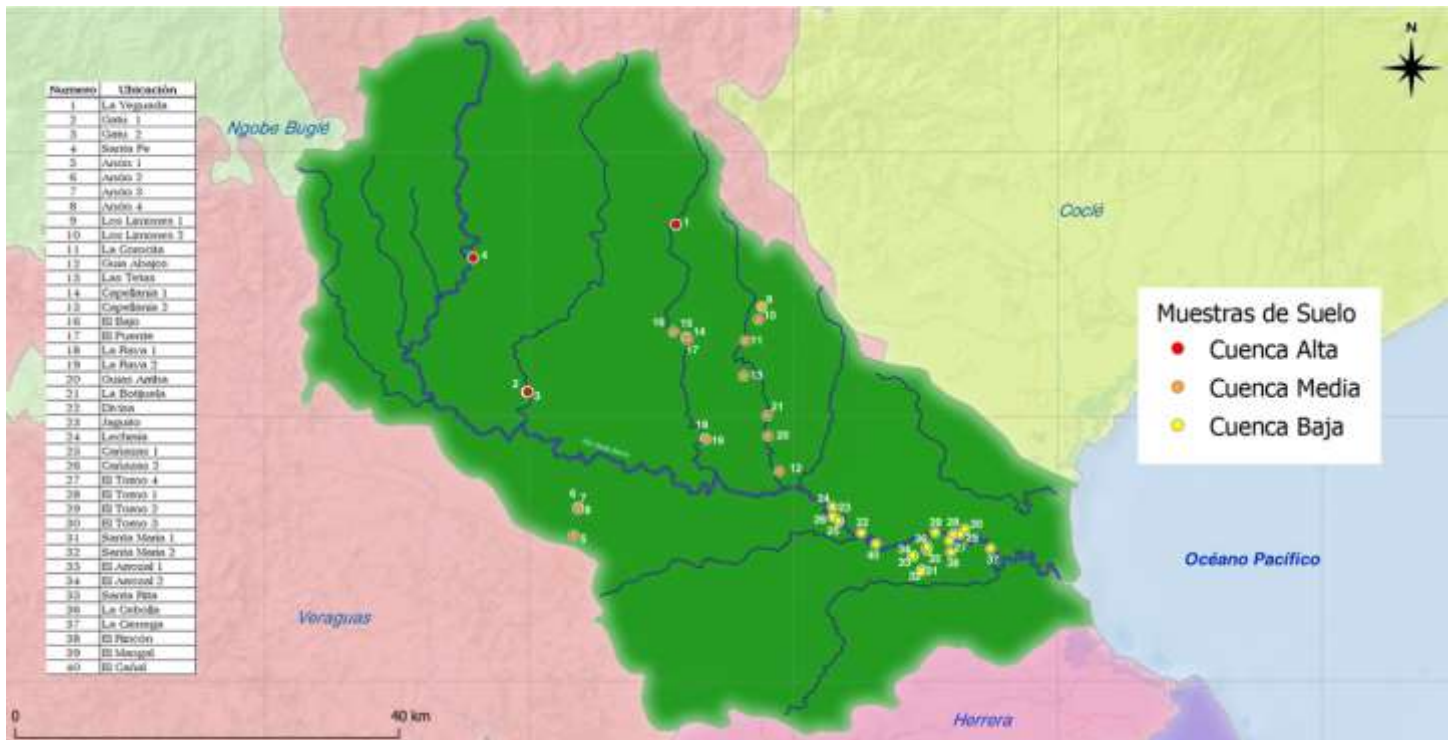
**Figura 2** Toma de muestra de suelo en campo, 2021.



**Figura 3** Toma de muestra de suelo en campo, 2021.

**Tabla 1** Ubicación geográfica de muestreo de suelos en la cuenca del Río Santa María.

Nombre	Latitud	Longitud	Cuenca
Gatú 1	8.273297	-81.00194	parte alta
Gatú 2	8.273258	-81.00105	parte alta
Santa Fe	8.400035	-81.05308	parte alta
La Yeguada	8.431504	-80.86117	parte alta
Guías Arriba	8.231462	-80.77418	parte media
La Botijuela	8.250994	-80.7747	parte media
El Puente	8.322959	-80.84992	parte media
La Corocita	8.32153	-80.79545	parte media
La Raya 1	8.229121	-80.83313	parte media
La Raya 2	8.228351	-80.83236	parte media
Los Limones 1	8.342507	-80.78273	parte media
Los Limones 2	8.341488	-80.78298	parte media
Anón 1	8.1378979	-80.95792	parte media
Guías Abajo	8.197989	-80.76336	parte media
Anón 2	8.1642311	-80.95365	parte media
Anón 3	8.1624758	-80.95357	parte media
Anón 4	8.1623095	-80.954	parte media
Capellanía 1	8.325056	-80.85143	parte media
Capellanía 2	8.325131	-80.85194	parte media
El Bajo	8.330043	-80.86345	parte media
Las Tetas	8.288465	-80.79701	parte media
Arrozal 1	8.118105	-80.63658	parte baja
Arrozal 2	8.118529	-80.637448	parte baja
Santa Rita	8.123541	-80.62347	parte baja
La Ciénega	8.125266	-80.56341	parte baja
Santa María 1	8.10476	-80.62865	parte baja
Santa María 2	8.103747	-80.6288	parte baja
Cañazas 1	8.151123	-80.70695	parte baja
Cañazas 2	8.15165	-80.70746	parte baja
El Rincón	8.121736	-80.3577	parte baja
El Torno 1	8.138695	-80.5989	parte baja
El Torno 2	8.138773	-80.59206	parte baja
El Torno 3	8.143707	-80.58769	parte baja
El Torno 4	8.13256	-80.60222	parte baja
El Cañal	8.129592	-80.67197	parte baja
El Mangal	8.140335	-80.61581	parte baja
La Cebolla	8.126844	-80.62347	parte baja
Jagüito	8.155002	-80.71286	parte baja
Lechería	8.164569	-80.71303	parte baja
Divisa	8.13867	-80.68624	parte baja



**Figura 4.** Sitios de muestreo de suelos en las partes alta, media y baja de la cuenca del Río Santa María. 2021

### 3.2.3. Muestreo de agua

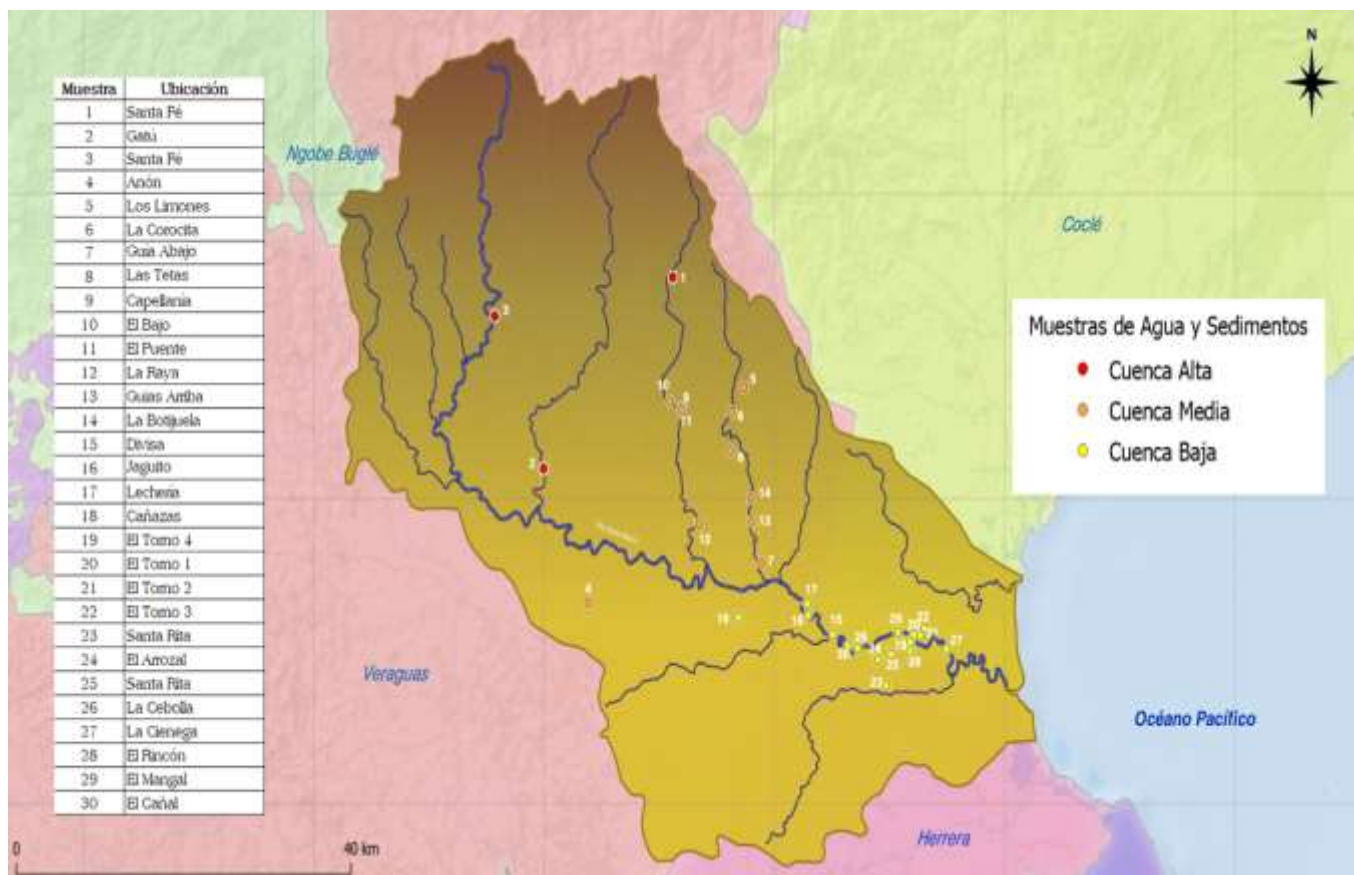
El proceso de recolección de la muestra de agua fue al azar en la parte alta, media y baja del Río Santa María. En cada finca de muestreo se tomaba una muestra de agua a una profundidad de 20 cm (Figura 5), con un galón de boca ancha o con un tubo de PVC (policloruro de vinilo) dependiendo de las condiciones del lugar. Al momento de recolectar las muestras los envases se lavaron tres veces con el agua del río. Se tomaron las coordenadas de los puntos de muestreo del agua (Tabla 2) para posteriormente ubicarlos en el mapa de la cuenca (Figura 6).



**Figura 5** Sitios de muestreo de suelos en las partes alta, media y baja de la cuenca del Río Santa María, 2021.

**Tabla 2** Ubicación geográfica de muestreo de agua en la cuenca del Río Santa María.

Nombre	Latitud	Longitud	Cuenca
Gatú	8.274824	-81.00022	parte alta
Santa Fe	8.39988	-81.0532	parte alta
La Yeguada	8.431778	-80.86007	parte alta
Guías Arriba	8.231462	-80.77418	parte media
La Botijuela	8.250507	-80.7753	parte media
El Puente	8.322575	-80.85038	parte media
La Corocita	8.321166	-80.79586	parte media
La Raya	8.229323	-80.83154	parte media
Los Limones	8.342507	-80.78273	parte media
Guías Abajo	8.197376	-80.76386	parte media
Anón	8.164681	-80.95165	parte media
Capellanía	8.32452	-80.85068	parte media
El Bajo	8.097027	-80.62863	parte media
Las Tetas	8.289322	-80.79722	parte media
El Arrozal	8.123541	-80.62347	parte baja
Santa Rita	8.12249	-80.6233	parte baja
La Ciénega	8.126563	-80.56313	parte baja
Santa María	8.097027	-80.62863	parte baja
Cañazas	8.153014	-80.78895	parte baja
El Rincón	8.125105	-80.60237	parte baja
El Torno 1	8.138849	-80.59901	parte baja
El Torno 2	8.13812	-80.59184	parte baja
El Torno 3	8.143707	-80.5876	parte baja
El Torno 4	8.13256	-80.60222	parte baja
El cañal	8.129979	-80.67012	parte baja
El Mangal	8.140629	-80.61584	parte baja
La Cebolla	8.127639	-80.65945	parte baja
Jagüito	8.154541	-80.71328	parte baja
Lechería	8.16416	-80.71424	parte baja
Divisa	8.321166	-80.79586	parte baja



**Figura 6.** Sitios de muestreo de agua y sedimentos en la parte alta, media y baja de la cuenca del Río Santa María, 2021.

### 3.2.4. Muestreo de sedimento

En cada sitio de muestreo se tomaron cuatro sub-muestras de sedimento superficiales con sus respectivas coordenadas (Tabla 3), a la ribera del río en un radio de tres metros, obteniendo una única muestra compuesta. Cada sitio de muestreo fue ubicado en el mapa de la cuenca (Figura 6), para luego ser llevada al laboratorio de Fertilidad de Suelos del IDIAP (Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá) y procesarlas.

La toma de muestras de sedimentos es una tarea básica para cualquier investigación relacionada con el tema. Sin embargo, no existe una técnica única para efectuar las muestras; de manera que, al utilizar cualquiera de ellas se ha de tener presente la precisión que garantiza su representatividad (Figura 7).



**Figura 7** Toma de muestras de sedimentos en la cuenca del Río Santa María

**Tabla 3** Ubicación geográfica de muestreo de sedimento en la cuenca del Río Santa María.

Nombre	Latitud	Longitud	Cuenca
Gatú	8.274824	-81.00022	parte alta
Santa Fe	8.39988	-81.0532	parte alta
La Yeguada	8.431778	-80.86007	parte alta
Guías Arriba	8.231462	-80.77418	parte media
La Botijuela	8.250507	-80.7753	parte media
El Puente	8.322575	-80.85038	parte media
La Corocita	8.321166	-80.79586	parte media
La Raya	8.229323	-80.83154	parte media
Guías abajo	8.197376	-80.76386	parte media
Anón	8.164681	-80.95165	parte media
Capellanía	8.32452	-80.85068	parte media
El Bajo	8.097027	-80.62863	parte media
Las Tetas	8.289322	-80.79722	parte media
El Arrozal	8.123541	-80.62347	parte baja
Santa Rita	8.12249	-80.6233	parte baja
La Ciénega	8.126563	-80.56313	parte baja
Santa María	8.097027	-80.62863	parte baja
Cañazas	8.153014	-80.78895	parte baja
El Rincón	8.125105	-80.60237	parte baja
El Torno 1	8.138849	-80.59901	parte baja
El Torno 2	8.13812	-80.59184	parte baja
El Torno 3	8.143707	-80.5876	parte baja
El Torno 4	8.13256	-80.60222	parte baja
El Cañal	8.129979	-80.67012	parte baja
El Mangal	8.140629	-80.61584	parte baja
La Cebolla	8.127639	-80.65945	parte baja
Jagüito	8.154541	-80.71328	parte baja
Lechería	8.16416	-80.71424	parte baja
Divisa	8.321166	-80.79586	parte baja

### 3.2.5. Muestreo de fertilizantes y agroquímicos

El muestreo de fertilizante y agroquímicos se basó en una encuesta realizada a los productores de la cuenca, tomando los productos más utilizados para sus respectivos análisis en el laboratorio (Tabla 4).

El procedimiento de muestreo de fertilizantes, está basado en la Norma Guatemalteca Obligatoria (COGUANOR NGO 44006) fertilizantes, enmiendas y acondicionadores de suelos 2004, cuyo procedimiento de muestreo indica extraer al azar de cada muestra elemental alrededor de 200 gramos.

**Tabla 4** Lista de fertilizantes y agroquímicos analizados.

<b>Fertilizantes</b>	
Nombre comercial	Formulas
<b>Abono completo</b>	12-24-12
<b>Urea</b>	46 %
<b>Agroquímicos</b>	
Nombre comercial	Ingrediente activo
<b>Glifopro</b>	Glifosato
<b>AGROQUAT 20 sl</b>	Gramoxone
<b>Terrano</b>	Aminopyralid y 2,4-D
<b>Arrivo 20 ec</b>	Cipermetrina
<b>Panomil 72 sc</b>	Benzonitrilo Chlorothalonil
	Halogenado,

### 3.2.6. Muestreo de follajes

Las muestras de follaje se tomaron dentro del área de muestreo de suelo, tomando muestras al azar de los cultivos (Figura 8). Se muestreó diferentes

tipos de cultivos sembrados alrededor de la cuenca alta, media y baja (Tabla 5), para luego ser analizado en el laboratorio.



**Figura 8** Punto de muestreo de follaje, planta de limón persa, 2021.

**Tabla 5** Coordenadas geográficas de los cultivos muestreados

Cultivos	Finca	Cuenca	COORDENADAS	
			Coordenadas	
			Lat.	Long.
Café	La Yeguada	Parte Alta	8.431504	-80.861166
Sandía	Guías Abajo	Parte Media	8.197989	-80.763356
Limón	Los Limones		8.342507	-80.782733
Maíz	Capellanía		8.325056	-80.851429
Zapallo	Jagüito		8.155002	-80.712855
Sandia	La Raya		8.229121	-80.83313
Zapallo (fruto)	El Torno 2	Parte Baja	8.138773	-80.592057
Maíz	El Torno 1		8.138695	-80.598904
Arroz	El Arrozal		8.118105	-80.636581
Caña	Santa Rita		8.123541	-80.62347
Sandía (fruto)	El Mangal		8.140335	-80.615814

### **3.3. MÉTODO DE ANÁLISIS EN EL LABORATORIO**

#### **3.3.1. Caracterización de los análisis de laboratorio**

Las muestras recolectadas (suelos, hojas- frutos, aguas y productos químicos) se procesaron para ser caracterizadas. Se realizó la caracterización completa físico, químico con la metodología de análisis utilizada en el Laboratorio de Suelos del IDIAP (Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá) en Divisa (Villarreal y Name, 1996).

#### **3.3.2. Determinación de los metales pesados.**

Los metales pesados que se determinaron en esta investigación en muestras de suelo, cultivos, fertilizantes, agua y sedimentos fueron el Cd(cadmio), Cu(cobre), Ni(níquel), Pb(plomo), y Zn(zinc), puesto que son considerados los más comunes por consecuencia de la acción antropogénica y que no están presentes naturalmente en suelos y sedimentos. Igualmente, por su presencia habitual en productos químicos (herbicidas, fungicidas, insecticidas, fertilizantes, etc.).

### 3.3.3. Determinación de la concentración de metales pesados en suelo y sedimentos.

Para determinar las concentraciones en suelo y sedimentos se utilizó el método EPA 3051A, que consistía en pesar 0.50 g de suelo (seco) y luego colocarlo en los envases del digestor de microondas. Posteriormente se le agregó nueve ml de ácido nítrico y tres ml de ácido clorhídrico (Figura 9 y 10), se colocaron en el digestor de microondas a 180°C por 45 minutos. Transcurrido el tiempo se deja enfriar por 1.5 horas aproximadamente. Luego de terminado el proceso de digestión se aforó a un volumen de 50 ml con agua destilada. En la solución obtenida se determinaron los siguientes metales pesados: Cd(cadmio), Cu(cobre), Ni(níquel), Pb(plomo(zinc) por medio de espectrofotometría de absorción atómica modelo contrAA 300 de fuente continua con llama.



**Figura 9** Preparando la solución de agua regia, 2021.



**Figura 10** Preparando la solución de agua regia, 2021.

#### **3.3.4. Determinación de la textura del suelo.**

Se determinó la textura (% de arena, limo y arcilla) de suelos con el método del hidrómetro de Bouyoucos, tomando dos lecturas (Figura 11 y 12). (Bouyoucos 1962; Gee y Bauder 1986).



**Figura 11** Análisis de textura, 2021.



**Figura 12** Análisis de textura, 2021.

### 3.3.5. Medición de pH del suelo.

Se determinó el pH de las muestras de suelo utilizando el potenciómetro en medio acuoso, relación suelo-agua destilada 1:2.5 (Peech, 1965).

### 3.3.6. Condiciones instrumentales del método por espectrofotometría de absorción atómica con llama.

**Tabla 6** Condiciones instrumentales del método por espectrofotometría de absorción atómica con llama continua.

Elementos	Longitud de onda (nm)	Condiciones
Arsénico	193,0	Aire-Acetileno
Cadmio	228,0	Aire-Acetileno
Cobre	327,3	Aire-Acetileno
Cromo	357,9	Aire-Acetileno
Níquel	232,0	Aire-Acetileno
Plomo	283,0	Aire-Acetileno
Zinc	213,0	Aire-Acetileno

### 3.3.7. Determinación de concentración de metales pesados en aguas.

Se colocaron 50 ml de la muestra de agua en un matraz erlenmeyer de 250ml y se adicionaron 3 ml de ácido nítrico concentrado. Posteriormente, se llevó a la plancha caliente por un tiempo de 3 horas aproximadamente a una temperatura de 150°C para su evaporación lenta, hasta una reducción de un volumen de 20 ml de la digestión de la muestra. Finalmente, se le agrega 5 ml de ácido nítrico, luego se aforó a volumen de 100ml y se filtra (Figura 13 y 14) para analizarlo.



**Figura 13** Filtrado de muestra de agua, 2021.



**Figura 14** Filtrado de muestras de agua, 2021.

#### **4. DISEÑO EXPERIMENTAL**

Para realizar el análisis estadístico en esta investigación se utilizó el programa InfoStat para evaluar las concentraciones de metales pesados con las variables estudiadas. Se realizaron análisis de regresión, varianza y el multivariado para ver las relaciones entre variables.

Variables analizadas:

Suelo

Sedimento

Agua

Cultivo

Textura y color

## **5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **5.1. Característica de los suelos muestreados dentro de la cuenca del Río Santa María.**

En las muestras de suelo analizadas, con respecto a las propiedades físico – químicas (Tabla 7), se observa que estos suelos presentan una textura con predominio de suelo franco arcilloso con un 28%, seguido de arcilloso con un 13% y arena francosa con un 12%. El contenido de materia orgánica fue bajo con un promedio en general de 1.1, en la parte alta fue de 1.2, parte media 1.03 y finalmente la parte baja fue de 1.17. El pH fue de ácido, a poco ácido con promedio en general de 5.96. Presentando en la cuenca alta, media y baja un promedio de 5.8, 5.8 y 6.13, respectivamente.

Las propiedades del suelo juegan un papel importante en la disminución o el aumento del contenido de los metales en el perfil, así como en su disponibilidad. Está controlado por parámetros que incluyen las propiedades intrínsecas del metal y las características del suelo (Colombo et al. 1998).

En cuanto al contenido de minerales en la caracterización de los suelos, se encontró un promedio en general en los distintos elementos lo cual fueron, fósforo 26.3 mg/l, potasio 74.7 mg/l, calcio 7.5 cmol/kg, magnesio 4.5 cmol/kg, aluminio 0.2 cmol/kg, manganeso 48.3 mg/l, hierro 25.9 mg/l, zinc 3.6 mg/l y cobre 2.9 mg/l. La mayoría de los minerales presentaron un contenido medio, a diferencia del calcio y magnesio que fueron altos, mientras que el zinc y

aluminio fueron bajos. En el Anexo 6, se muestra la caracterización completa de cada una de las fincas muestreadas.

**Tabla 7** Resumen de la caracterización de suelo en la cuenca del Río Santa María, 2021.

	<b>NOMBRE</b>	<b>COLOR DEL SUELO</b>	<b>A. L. ARC %</b>	<b>MO %</b>	<b>pH</b>	<b>TEXTURA</b>	<b>PENDIENTE</b>
<b>PARTE ALTA</b>	Gatú 1	Pardo amarillento oscuro	52-28-20	1.04	5.4	FRA-ARE	0 – 3 %
	Gatú 2	Pardo amarillento oscuro	48-28-24	1.24	5.5	FRA	4 – 5 %
	Santa Fe	Pardo oscuro	72-24-4	0.66	6.3	ARE-FRA	
	La Yeguada	Pardo amarillo oscuro	72-16-12	1.86	5.8	ARE-FRA	3 – 4 %
	<b>NOMBRE</b>	<b>COLOR DEL SUELO</b>	<b>A.L.ARC</b>	<b>MO</b>	<b>pH</b>	<b>TEXTURA</b>	<b>PENDIENTE</b>
<b>PARTE BAJA</b>	Jagüito	Pardo amarillento	32-40-28	1.75	5.8	FRA-ARC	3 – 4 %
	Lechería Sue	Pardo amarillento	28-36-36	1.34	6.2	FRA-ARC	0 – 1 %
	Divisa	Pardo amarillento	44-28-28	0.48	6.2	FRA-ARC	0 – 3 %
	La Cebolla	Pardo amarillento oscuro	20-20-60	1.97	6.3	ARC	0 – 5 %
	El Arrozal 1	Pardo amarillento	56-24-20	0.57	5.7	FRA-ARC-ARE	0 – 2 %
	El Arrozal 2	Pardo amarillento	84-4-12	0.57	5.4	ARE-FRA	0 – 2 %
	Santa Rita	Pardo grisáceo	60-16-24	0.66	6	FRA-ARC-ARE	2 – 4 %
	La Ciénega	Pardo amarillento	64-28-8	1.34	6.2	FRA-ARE	0 – 3 %
	Santa María 1	Pardo grisáceo	32-40-28	0.3	6.7	FRA-ARC	1 – 3 %
	Santa María 2	Pardo grisáceo	72-24-4	0.66	6.6	ARE-FRA	1 – 3 %
	Cañazas 1	Pardo amarillento	36-28-36	1.14	6.3	FRA-ARC	0 – 3 %
	Cañazas 2	Pardo amarillento	0-0-0	1.24	5.9	ARE	1 – 2 %
	El Rincón.	Pardo pálido	20-44-36	0.3	6.8	FRA-LIM-ARC	0 – 4 %
	El Torno 1.	Pardo amarillento	28-40-32	1.24	6.4	FRA-ARC	0 – 3 %
	El Torno 2	Pardo amarillento	20-44-36	1.44	6.1	FRA-LIM-ARC	0 – 2 %
	El Torno 3	Pardo amarillento	48-40-12	1.75	5.8	FRA	2 – 4 %
	El Torno 4	Pardo oscuro	36-28-36	1.54	6.1	FRA-ARC	0 – 2 %
	El Cañal	Pardo oscuro	20-44-36	1.97	6	FRA-LIM-ARC	4 – 6 %
	El Mangal	Pardo	20-44-36	1.97	6.1	FRA-LIM-ARC	5 – 6 %

	<b>NOMBRE</b>	<b>COLOR</b>	<b>A.L.ARC</b>	<b>MO</b>	<b>pH</b>	<b>TEXTURA</b>	<b>PENDIENTE</b>
<b>PARTE MEDIA</b>	Guías Abajos	Pardo oscuro	80-12-8	0.39	5.6	ARE-FRA	3 – 5 %
	El Puente	Pardo amarillo oscuro	52-28-20	0.3	6.2	FRA-ARE	0 – 3 %
	La Corocita	Pardo amarillo oscuro	60-24-16	0.39	6.5	FRA-ARE	4 – 9 %
	La Raya 1	Pardo oscuro	40-36-24	1.04	6.2	FRA	3 – 4 %
	La Raya 2	Pardo oscuro	28-40-32	1.04	6.2	FRA-ARC	1 – 2 %
	Los Limones 1	Pardo amarillo oscuro	28-20-52	1.44	4.8	ARC	6 – 8 %
	Los Limones 2	Pardo amarillo oscuro	32-20-48	1.44	4.8	ARC	4 – 10 %
	Anón 1	Pardo Amarillento	24-28-48	1.97	6.3	ARC	0 – 4 %
	Anón 2	Pardo Amarillento	20-32-48	1.54	5.5	ARC	0 – 4 %
	Anón 3	Pardo amarillo oscuro	40-28-32	0.85	5.2	FRA-ARC	0 – 3 %
	Anón 4	Pardo amarillo oscuro	36-32-32	1.04	5.3	FRA-ARC	0 – 5 %
	Capellanía 1	Pardo amarillento oscuro	56-24-20	0.48	6.4	FRA-ARC-ARE	0 – 2 %
	Capellanía 2	Pardo amarillento oscuro	52-28-20	0.39	6.2	FRA-ARE	0 – 2 %
	El Bajo	Pardo amarillento	20-44-36	1.14	6.1	FRA-LIM-ARC	0 – 4 %
	Las Tetas	Pardo amarillento	88-8-4	1.34	5.6	ARE	5 – 10 %
Guías Arriba	Pardo muy oscuro	40-36-24	1.75	6	FRA	0 – 2 %	
La Botijuela	Pardo amarillo oscuro	36-28-36	1.04	5.9	FRA-ARC	0 – 3 %	

## **5.2. Evaluación del contenido de metales pesados en suelos en la cuenca alta, media y baja del Río Santa María**

Las fincas muestreadas fueron analizadas y resumidas en la Tabla 8. Como se puede apreciar el contenido de metales pesados no superó los límites máximos permitidos por la normativa internacional USEPA (1993), expresados en mg/kg. Igualmente, no sobrepasan los límites máximos de tablas de

referencias propuestas de investigaciones realizadas por otros autores (Aguilar et al., 1999). En el Anexo 9 se encuentran todas las muestras completas con las concentraciones de metales pesados en suelos analizadas en esta investigación.

En el país no se han establecido valores que puedan ser usados como referencia y a partir de estos evaluar la calidad de los suelos agrícolas, y generar estrategias enfocadas a la conservación y restauración de los suelos. Sin embargo, estos metales pesados no dejan de ser perjudiciales para los seres vivos, por lo que resulta necesario seguir ampliando las investigaciones.

Las concentraciones de los metales pesados en suelos agrícolas y pecuarios están asociadas por lo general a las mismas actividades, en las que se involucran las producciones agrícolas y pecuarias intensivas, actividad industrial, minería clandestina, entre otras.

Alloway (2013), identificó que algunos metales pesados están directamente relacionados con fuentes específicas como: fertilizantes (Cd, Cr, Mo, Pb, Zn), plaguicidas (Cu, As, Hg, Pb, Mn, Zn), compost derivados de residuos sólidos convencionales (Cd, Cu, Ni, Pb, Zn) y del estiércol (Cu, As, Zn). Por otro lado, las condiciones de bajos pH, Materia orgánica y CIC, típica de suelos oxisoles y ultisoles favorecen la movilidad de estos elementos (Kabata Pendias, 2004; Alloway, 2013).

**Tabla 8** Concentración de metales pesados en suelos de la Cuenca del Río Santa María, 2021.

Cuenca	Parte Alta				Parte Media				Parte Baja						
	Lugar	Gatú 1	Santa Fe	La Raya 1	Los Limones 1	El Anón 3	Capellania 1	Las Tetas	Lechería	Cañazas 1	El Torno 2	El Arrozal 2	Santa María 1	(Aguilar, 1999) pH <7	USEPA, 1993
		<b>mg/kg</b>													
<b>Cu</b>	34.22	134.75	54.24	64.55	128.8	64.78	137.75	7.97	67.92	72.35	15.05	13.27	150-300	750	
<b>Zn</b>	101.28	95.27	178	60.48	174.63	128.85	136.45	1.55	101.81	87.02	45.64	22.86	300-600	1400	
<b>Cd</b>	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	3-7	20	
<b>Ni</b>	22.84	32.65	10.34	10.17	28.02	18.75	37.74	23.54	19.34	11.79	4.76	2.1	80-200	210	
<b>Pb</b>	3.17	6.84	7.55	7.49	2.73	5.03	2.3	8.81	8.32	2.42	1.56	7.05	250-350	150	
<b>pH</b>	5.4	6.3	6.2	4.8	5.2	6.4	5.6	6.2	6.3	6.1	5.4	6.7			

## **Cobre (Cu)**

En la Tabla 8 se puede observar que el Cu(cobre) no supera los límites permitidos según las normativas internacionales. Sin embargo, algunas muestras se encuentran cercanas a valores de referencias propuestos por autores en otras investigaciones (Aguilar et al., 1999), estos valores son recomendados solo para muestras con pH menores de siete ( $< 7$ ). Las muestras que se encuentran cerca de estos límites permitidos presentan un contenido de 128.8 mg/kg, 134.75 mg/kg y 137.7 mg/kg. La segunda muestra con más contenido en suelos es la de Santa Fe con presencia de cobre (134.75 mg/kg) en la parte alta de la cuenca, lo que no parece tener relación, porque por lo general la concentración de metales pesados suele ser más alta en la parte baja y media de las cuencas. Esto puede estar relacionado con la minería clandestina que se practica en la parte alta de la cuenca. Muchas personas se dedican a extraer oro, lo que puede liberar metales pesados en el agua del río, luego son acumulados en sedimentos y posteriormente en suelos de la cuenca.

La presencia de cobre en los suelos de uso agrícola puede deberse a las aplicaciones excesivas de fungicidas y fertilizantes específicamente los que son elaborados a base de este metal. Por esta razón se puede decir que existe una relación entre las aplicaciones de estos productos con el incremento, ya que, en las áreas muestreadas se utiliza muchos productos con estas composiciones. Las fincas que tuvieron los niveles más altos de cobre fueron El Anón (Arroz), Las

Tetas (Sandía), que son cultivos susceptibles a enfermedades fúngicas por lo que son necesarias mayores aplicaciones de fungicidas.

El factor más importante en la acumulación del cobre en el suelo es la materia orgánica. Esta tiene la cualidad de formar y combinarse en formas estables con el cobre. Numerosos componentes orgánicos están involucrados en el proceso, incluyendo los ácidos húmicos y fúlvicos, los últimos considerados como los más activos (CHEAM, 1973).

### **Zinc (Zn)**

El contenido de Zn no supera los niveles máximos permitidos por las normativas internacionales. No obstante, muestras con contenido de 101.28 mg/kg, 101.81 mg/kg, 128.85 mg/kg, 136.45 mg/kg, 174.63 mg/kg y 178 mg/kg están a niveles altos en comparación a las demás, por esta razón sería recomendable mantener un monitoreo de estos suelos para detectar si en un futuro incrementan y así darle continuidad para poder buscar posibles alternativas de biorremediación.

De acuerdo con Kabata–Pendias (2004), las concentraciones de zinc en suelos agrícolas varían entre 10 y 100 mg/kg. En este sentido, hace parte de los elementos esenciales para las plantas. Sin embargo, en concentraciones superiores a 400 mg/kg puede generar problemas de toxicidad (EPA, 1996).

## **Cadmio (Cd)**

El cadmio en las muestras de suelos analizadas en esta investigación dio como resultado trazas. Es decir que las concentraciones en las muestras fueron tan bajas que el espectrofotómetro de absorción atómica ContrAA 300 utilizado en el laboratorio de suelos del IDIAP (Instituto de Innovación Agropecuaria de Panamá) en Divisa, no pudo detectarlas. No obstante, esto nos indica que estos suelos presentan concentraciones que no se acercan a los niveles máximos permitidos para llegar ser tóxicos para los seres vivos.

Laegreid et al. (1999), plantea que los fertilizantes fosforados son una fuente de cadmio, debido a los contenidos de apatita, que además de fósforo, contiene cadmio en concentraciones entre 8 y 500 mg/kg.

## **Níquel (Ni)**

Las muestras de níquel no sobrepasaron los límites máximos permitidos por las normativas siendo los valores más altos 37.74 mg/kg, 32.65 mg/kg y 28.02 mg/kg. Lo que nos indica que el contenido de níquel en estas muestras está lejos de superar los límites máximos.

El níquel junto al zinc también cumple funciones bioquímicas en lo seres vivos y el rango normal en suelos está entre 0,1 a 5 mg/kg. Por el contrario, cuando se

encuentra en niveles de 10 a 100 mg/kg, puede presentar problemas de toxicidad (EPA, 1996).

### **Plomo (Pb)**

El plomo está muy por debajo de los niveles máximos permitidos 250 a 350 mg/kg, ni siquiera superan los 10 mg/kg.

El Pb(plomo) ha sido directamente relacionado con la aplicación de agroquímicos y fertilizantes como urea y superfosfato (Micó et al., 2006). Según la EPA (1996), el contenido normal de plomo en suelo es de 10 mg/kg, valor que ha sido superado en algunas otras investigaciones. Sin embargo, el rango de toxicidad propuesto por esta agencia se encuentra entre los 50 a 100 mg/kg. Por su lado Kabata-Pendias y Pendias (2001), mencionan que para denominar a un suelo contaminado por plomo este debe superar los 100 mg/kg.

### **5.3. Evaluación del contenido total de metales pesados en sedimentos**

Las muestras de sedimentos obtenidas se dieron con el fin de determinar la concentración de metales pesados que pudiera haber en la ribera del Río Santa María; ya que por la erosión de suelo y los arrastres del afluente pueden quedar residuos de cualquier contaminante que pudiera traer efectos secundarios en la

actividad agropecuaria y ganadera a largo plazo, afectando así a las personas. Por falta de normativas legales nacionales que señalen los valores considerados tóxicos o contaminados dificulta la interpretación de los resultados, por eso se utilizaron valores reportados por otros autores.

Muchos de los contaminantes que ingresan a un cuerpo de agua superficial, por vía natural o antropogénica, quedan retenidos en los sedimentos que se depositan en el fondo del cauce, causando efectos tóxicos sobre los sistemas acuáticos (Estreves et al., 1996; Bohn et al., 2001). Así, variaciones de pH, salinidad y de las propiedades redox de las corrientes de agua pueden provocar movilización y resuspensión de especies químicas acumuladas en los sedimentos, magnificando incluso su efecto tóxico, tal como es el caso de los metales pesados (Ruiz et al., 1996).

En la Tabla 9 se muestra un resumen de algunas muestras de sedimentos para evaluar su concentración con los valores de referencias según la US EPA, 1993. Las muestras completas de sedimentos analizadas se pueden ver detalladamente en el Anexo 9.

### **Cobre (Cu)**

Con respecto a la Tabla 9 se observa que el cobre total encontrado en esta investigación sobrepasa los límites permisibles de 50 mg/kg establecidos por la USEPA (1993). El cobre encontrado en sedimento está relacionado con la

presencia en suelos, ya que en el sedimento queda los mismos cuando son arrastrados por los ríos; igualmente cuando se dan las inundaciones, quedando acumulados. En muestras de suelos se encontró presencia de cobre que no sobrepasaban los límites permitidos. Sin embargo, en sedimentos, sí sobrepasaron los límites máximos permitidos, de allí la relación del contenido en sedimento – suelo.

La llegada del cobre al medio acuático, y posteriormente a los depósitos sedimentarios del río, va ligada a diversos usos en la agricultura y la industria. Por tanto, su ingreso al cuerpo superficial en estudio puede deberse al empleo de fertilizantes y fungicidas formulados a partir del cobre en las áreas de cultivo de la parte alta de la microcuenca, al ingreso de lixiviados provenientes de depósitos de basura cercanos a las riberas del río( por lo general se ubican en lotes baldíos utilizados como botaderos a cielo abierto), a la quema de desechos sólidos en las cercanías del río, al ingreso de aguas residuales domésticas, al uso de combustibles fósiles y a fuentes naturales como vulcanismo, vegetación en descomposición e incendios forestales (ATSDR, 2004; Navarro & Sabater, 2004).

### **Zinc (Zn)**

Según el resultado obtenido en la lectura del Zn(zinc) en el espectrofotómetro de absorción atómica no sobrepasaron los límites permitidos. Las fincas que presentaron alta concentración fue la de La Raya con 193.85 mg/kg de ahí le sigue

la de El Anón con 178.85 mg/kg. La mostró la concentración más baja fue la finca El Torno 2 con 73.86 mg/kg, según la USEPA (1993) los límites para el zinc van de un rango de <90 >200 mg/kg.

### **Níquel (Ni)**

Conforme a los resultados obtenidos en el análisis los valores del níquel total reportados por esta investigación, no sobrepasan al límite de 50 mg/kg establecidos por la USEPA (1993). A excepción de la finca Las Tetas con un valor 55.92 mg/kg y Santa María con 76.17 mg/kg. Estos son superiores a los límites citados. La presencia de Ni(níquel) en los sedimentos estudiados puede deberse al ingreso al cauce de desechos no ordinarios, como: electrodomésticos y baterías. Estos emplean aleaciones de níquel en su fabricación, y a productos líquidos usados en la industria metalmecánica, como aceites, pinturas y lubricantes procedentes del lavado de calles por la lluvia o que ingresan en forma directa al cauce (Marrugo et al., 2006). En caso de aceites y lubricantes en estas zonas se practica mucho la agricultura bajo riego en cucurbitáceas y cultivos industriales. La mayoría tiene las bombas cerca de los ríos, esto trae como consecuencia, el derrame de estos líquidos provoca la contaminación favoreciendo la presencia de níquel en el sedimento.

**Tabla 9** Concentración total de metales pesados en sedimentos en la Cuenca del Río Santa María, 2021.

Cuenca	Parte alta						Parte media						Parte baja	Lugar
	Gatú	Santa Fe	La Raya	El Anón	Capellanía	Las Tetas	Lechería	Cañazas	El Torno 2	El Arrozal	Santa María	La Cebolla	USEPA	
<b>Cu</b>	45.16	67.12	50.57	86.17	59.03	91.59	53.08	68.39	46.48	22.89	90.03	53.65	< 25 > 50	
<b>Zn</b>	114.24	109.93	193.85	178.85	149.23	174.10	136.73	125.66	73.86	83.08	118.40	112.26	< 90 > 200	
<b>Cd</b>	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	> 6	
<b>Ni</b>	13.80	10.53	8.60	37.89	11.54	55.92	16.73	48.18	31.08	12.21	76.17	12.53	< 20 > 50	
<b>Pb</b>	4.57	5.48	6.23	0.85	8.63	4.06	5.50	6.49	5.91	6.62	6.97	1.28	< 40 > 60	

#### 5.4. Evaluación del contenido de metales pesados de agua

En la presente investigación realizada en la cuenca del Río Santa María se encontró una baja contaminación a lo largo de su cauce. La presencia de los metales evaluados estaba por debajo de las normas utilizadas. Los resultados se compararon con las normas nacionales DGNTI COPANIT 24 99 que son las encargadas de determinar la calidad del agua en Panamá.

### **Cobre (Cu)**

La presencia de cobre en agua del Río Santa María sobrepasó los límites máximos permitidos de 0.02 mg/kg establecido por las normas nacionales COPANIT 24 99. La finca que presentó la concentración más alta fue La Cebolla con 0.05 mg/kg. Las Tetas presentó la concentración más baja con un 0.03 mg/kg. Según estudios de Guevara y Richtera, realizados en el norte y sur de Chile, respectivamente, se determinaron concentraciones altas de cobre, esto se debe a procesos productivos de las empresas mineras, en los tratamientos de los residuos líquidos generados, así como en diferencias de caudal de los ríos.

### **Zinc (Zn)**

Con respecto a la Tabla 10, la presencia de zinc en el agua no sobrepasa los límites permitidos de 2 mg/kg. Esto nos indica que el contenido de Zn(zinc) en la cuenca es demasiado bajo. La finca que presentó el contenido más alto fue Santa María con 0.010 mg/kg. La finca de Gatú mostró el valor más bajo con 0.002 mg/kg.

El zinc es un mineral alimenticio para seres humanos, plantas y animales. Las ingestiones de cantidades excesivas de zinc pueden perjudicar la salud de los mismos, cuando se encuentra por encima de los límites máximos permitidos.

## **Plomo (Pb)**

Según los resultados obtenidos en el laboratorio la presencia de plomo en el agua de la cuenca del Río Santa María no superó los límites permitidos por las normas nacionales COPANIT 24 99. La finca que presentó la concentración más alta fue Santa María con 0.45 mg/kg y la más baja fue El Torno 2 con 0.08 mg/kg lo cual no está por encima de 5 mg/kg.

El metal pesado más importante en la contaminación atmosférica es el plomo (Pb), el cual tiene la capacidad de unirse rápidamente a los compuestos orgánicos. Como característica principal, este elemento puede permanecer durante un largo periodo en los ecosistemas sin degradarse (Lerma- Torres, *et al.* 2016).

**Tabla 10** Concentración de metales pesados en aguas de la Cuenca del Río Santa María, 2021.

Cuenca	parte alta		Parte Media				Parte Baja							
	Lugar	Gatú	Santa Fe	La Raya	El Anón	Capellanía	Las Tetas	Lechería	Cañazas	El Torno 2	El Arrozal	Santa María	La Cebolla	COPANIT 24-99
	<b>mg/kg</b>													
<b>Cu</b>	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.05	<b>0.02</b>
<b>Zn</b>	0.002	0.004	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.010	ND	<b>2</b>
<b>Cd</b>	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<b>0.01</b>
<b>Ni</b>	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	<b>0.2</b>
<b>Pb</b>	ND	ND	0.11	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.08	ND	0.45	ND	<b>5</b>

## 6. Evaluación del contenido de metales pesados en cultivos

**Tabla 11** Concentración de metales pesados en cultivos dentro de la Cuenca del Río Santa María, 2021.

Cuenca	Parte alta		Parte media				Parte baja					Kabatas – Pendias y Pendias, 2001
	Café	Sandía	Limón	Maíz	Pasto	Arroz	Maíz	Zapallo (Fruto)	Caña	Zapallo	Sandía (Fruto)	
Cultivo												
Lugar	La Yeguada	La Raya 1	Los Limones 1	Capellanía 1	Lechería	El Arrozal 1	El Torno 1	El Torno 2	Santa María 1	Jagüito	El Mangal	
	mg/kg											
<b>Cu</b>	ND	2.77	ND	ND	12.53	ND	ND	ND	ND	4.18	ND	5-20
<b>Zn</b>	20.30	127.90	22.85	47.18	97.47	36.89	66.94	101.00	21.32	67.36	2027	50-100
<b>Cd</b>	ND	0.38	ND	ND	ND	ND	0.11	ND	0.10	ND	ND	0.05-0.5
<b>Ni</b>	ND	ND	ND	0.79	10.83	77.21	0.42	13.72	32.29	ND	10.78	0.1-10
<b>Pb</b>	0.40	ND	0.20	ND	ND	ND	ND	3.92	ND	ND	17.70	0.5-10

En la Tabla 11, de cultivos se puede observar que los metales que sobrepasan los niveles máximos permitidos según los valores de referencia (Kabatás - Pendias y Pendias, 2001.). Estos son: el Zn(zinc), Ni(níquel) y Pb(plomo), en cultivos de arroz, pasto, caña y sobre todo cucurbitáceas.

De los metales pesados: el cadmio, plomo, mercurio y arsénico son los cuatro más tóxicos y cuya determinación es de exigencia regulatoria en los alimentos y productos fitoterapéuticos (Curtis, 2001, De Armas, 2007).

Como ya muchos autores han descrito, el zinc se encuentra asociados a muchos fungicidas y fertilizantes, al igual que el plomo. Mientras que el níquel se asemeja más a la aplicación de compost derivado de residuos sólidos convencionales. Por esta, razón en áreas cultivadas donde se realizan estas actividades y se encuentra presencia de elevadas concentraciones de estos metales en el suelo se puede dar una bioacumulación en cultivos, dando como repercusión el riesgo a la salud.

La absorción de estos metales por la planta depende de la concentración total de metales en el suelo y es diferente para cada especie vegetal en función de sus estrategias para tolerar elevadas concentraciones de metales pesados en suelos (Cabezas et al., 2004).

Se debe tener en cuenta que los cultivos son uno de los aspectos más importantes a considerar, ya que las concentraciones elevadas de metales pesados en los suelos pueden transferirse a las plantas por absorción, y estos a su vez, llegan al

consumidor, que pueden ser a los seres humanos directo (suelo – planta – humano) o de animales a las personas (suelo – planta – animal – humano).

La transferencia trófica es un mecanismo importante para la acumulación de elementos en organismos de eslabones superiores de la cadena alimentaria, y es una de las principales vías por las cuales los seres humanos están expuestos a tóxicos ambientales (Walton et al. 2010).

## **7. Evaluación del contenido de metales pesados en agroquímicos**

En la tabla 12, los herbicidas e insecticidas no se encuentran por encima de los niveles máximos permitidos, a excepción de la muestra de fungicida que sobrepasó los límites permitidos de zinc en los valores de referencia según Colmer y Sánchez (2000), lo que nos puede decir que a simple vista no se ven responsables de la presencia en suelos y demás. Sin embargo, la continuidad y uso excesivo de estos productos por un largo periodo, es algo que puede provocar la presencia y posterior incremento del contenido de muchos metales pesados en áreas de producción agropecuarias.

**Tabla 12** Contenido de metales pesados en agroquímicos.

Muestras	Plaguicidas y fertilizantes	Cu	Zn	Cd	Ni	Pb
mg/kg						
Herbicida	Gramoxone	0.16	12.25	ND	0.22	0.04
Fungicida	Panomil 72 Sc	0.48	78.39	ND	3.35	0.12
Herbicida	Glifosato	0.09	11.76	0.37	ND	ND
Insecticida	Cipermetrina	0.33	13.50	ND	1.00	0.16
Herbicida	2,4-D	0.67	13.18	ND	ND	0.19
Valor de referencia según Colmer y Sánchez 2000		12-50	1.3-35	60		0.8-14
Fertilizante	Urea	17.43	291.50	ND	37.95	3.75
Fertilizante	Abono completo	8.61	264.80	0.36	68.03	2.43
Valor de referencia de fertilizantes nitrogenados		1-15	1.3-25	0.05-8.5	0.8-14	
Valor de referencia de fertilizantes fosforados		1-300	50-1450	0.1-170	7-38	7-225

En cuanto a los fertilizantes, el contenido de Cu(cobre), Zn(zinc) y Ni(níquel) en la urea sobrepasaron los límites máximos permitidos según los valores de referencias de Alloway, 1995 y Kabatas - Pendias y Pendias, 1984, para fertilizantes nitrogenados. Se puede relacionar con la presencia de metales pesados, puesto que la urea es un fertilizante muy utilizado en las actividades agrícolas y pecuarias.

Los plaguicidas y fertilizantes han sido asociados con las altas concentraciones de metales pesados en suelos. Se debe a que muchos de estos productos contienen en su formulación metales, que al ser utilizados excesivamente en estos suelos de uso agrícolas - pecuarios, se acumulan en ellos o en las fuentes de aguas, ya sea por derrame o deriva de los químicos, algunos con mucha persistencia y a su vez, son absorbidos por las raíces de las plantas, empezando a formar parte de la cadena alimenticia, llegando hasta los humanos.

En tal sentido, los suelos donde a lo largo de muchos años se han aplicado fertilizantes fosfatados, poseen mayor riesgo de acumulación de metales pesados (Xiu-Xiu Chen, 2020, Su y Zhang, 2014). Esto se debe a la presencia de impurezas de la materia prima (roca fosfórica). Por otra parte, los metales pesados, que se encuentran en concentraciones variables, persisten en los fertilizantes comerciales. Los fertilizantes fosfatados son portadores de cadmio, zinc, cobalto, cobre, cromo, flúor, níquel, plomo y muchos otros elementos químicos, incluyendo componentes radioactivos (Zheng, 2019, Gupta, 2014).

## **8. ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

### **8.1. Análisis de regresión de concentración de metales pesados sistema suelos – cultivos**

En el análisis de regresión se encontró una correlación positiva entre el Cu y Mg 0.66. Igualmente, el Zn con Ca 0.68, Mg 0.83 y negativa del Zn con Ni -0.55 (Tabla 13). A mayor concentración de cobre en el suelo, mayor es el contenido de Magnesio en el cultivo. A mayor concentración de zinc en el suelo, mayor es el contenido de calcio y magnesio en cultivo. En cambio, en el suelo con mayor contenido de zinc la presencia de níquel es menor (Tabla 13).

Según Badoya (2014), en una investigación el níquel presentó una correlación positiva con el zinc y el cobre. Estos tres metales actúan con la misma valencia (+2) y pueden competir por las posiciones de cambio en los coloides del suelo.

En la Tabla 14 se observa que las características más importantes y minerales disponibles de los suelos analizados, no presentaron correlación con los minerales y metales pesados totales en esta investigación.

**Tabla 13** Análisis de regresión de metales suelos – cultivos

	<i>Ca-cultivo</i>	<i>Mg-cultivo</i>	<i>K-cultivo</i>	<i>Cu-cultivo</i>	<i>Zn-cultivo</i>	<i>Cd-cultivo</i>	<i>Ni-cultivo</i>	<i>Pb-cultivo</i>
<i>Ca-suelo</i>	0.25	0.27	-0.19	-0.06	0.01	0.33	-0.24	-0.02
<i>Mg-suelo</i>	0.12	0.08	-0.17	0.07	0.22	0.20	-0.24	0.26
<i>K-suelo</i>	0.11	0.55	-0.03	-0.03	0.22	-0.08	-0.27	0.22
<i>Cu-suelo</i>	0.19	<b>0.66</b>	-0.15	-0.22	0.18	-0.11	-0.42	0.20
<i>Zn-suelo</i>	<b>0.68</b>	<b>0.83</b>	-0.26	-0.19	0.01	0.43	-0.55	-0.03
<i>Cd-suelo</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Ni-suelo</i>	-0.24	0.15	0.01	0.31	0.41	-0.24	-0.44	0.35
<i>Pb-suelo</i>	0.29	0.28	-0.41	0.43	0.29	0.07	-0.06	0.17

**Tabla 14.** Análisis de correlación de características y minerales disponibles del suelo con minerales y metales pesados totales.

	<b>Mg-total</b>	<b>K-total</b>	<b>Cu-total</b>	<b>Zn-total</b>	<b>Cd-total</b>	<b>Ni-total</b>	<b>Pb-total</b>
<i>Arena</i>	-0.03	0.25	0.22	0.00	0.03	0.03	0.12
<i>Limo</i>	-0.10	-0.13	-0.10	-0.03	-0.01	0.09	0.15
<i>Arcilla</i>	-0.22	-0.18	-0.14	-0.03	0.03	-0.01	0.06
<i>MO</i>	0.01	-0.09	-0.18	-0.04	-0.10	0.18	0.07
<i>pH</i>	0.22	0.11	0.08	-0.06	-0.02	0.05	-0.11
<i>P-disponible</i>	0.38	0.39	0.15	0.08	-0.06	0.10	0.08
<i>K-disponible</i>	0.18	0.08	-0.09	-0.06	-0.11	0.07	0.02
<i>Ca-disponible</i>	0.22	0.26	0.20	0.03	-0.05	0.02	0.12
<i>Mg-disponible</i>	0.13	0.16	0.16	0.08	-0.08	0.14	0.09
<i>Al-disponible</i>	-0.12	-0.09	-0.04	0.13	-0.06	-0.10	-0.02
<i>Mn-disponible</i>	-0.06	-0.09	-0.29	-0.35	-0.15	-0.06	-0.08
<i>Fe-disponible</i>	-0.05	-0.07	0.00	-0.06	-0.06	-0.02	-0.05
<i>Zn-disponible</i>	-0.04	-0.02	-0.17	-0.10	-0.09	-0.02	0.13
<i>Cu-disponible</i>	0.06	-0.05	-0.16	-0.02	-0.07	0.18	-0.05

## 8.2. Análisis de varianza suelo

### Cobre total (Cu)

En la tabla 15 sobre análisis de varianza, se observa que el cobre total presentó diferencia altamente significativa ( $<0.001$ ) entre los sitios muestreados (localidad). Igualmente, entre las muestras y las diferentes partes de la cuenca (alta, media y baja) estando por debajo de 0.05 (95% de probabilidad). En el Anexo 15 se puede observar que entre El Anón 2 (A) y El Anón 3 (A) no existe diferencia significativa, mientras El Anón 2(A), El Anón 3 (A) en comparación con la El Arrozal 1 (RS) si presentan una diferencia altamente significativa. En el Anexo 14 se puede observar que no hubo diferencia significativa entre la cuenca media y baja, pero si existe entre cuenca alta en comparación con la media y baja. La diferencia entre la cuenca alta con respecto a la media y baja se debe que en la parte alta la cantidad de muestra estudiada fue menor con respecto a la parte baja y media. Esto pudo influir en la presencia de cobre, puesto que la misma fue mayor en la parte alta, a diferencia de las demás partes de la cuenca. En el Anexo 16 del total de las muestras el análisis arrojó que hubo diferencias significativas entre suelo y sedimento. En el Anexo 2 se puede observar la georreferenciación de la concentración de cobre en las muestras de suelos y sedimentos en cada sitio de muestreo en el mapa de la cuenca.

**Tabla 15** Análisis de varianza del contenido de cobre.

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Cu-total	207	0.97	0.96	10.43

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	184375.61	54	3414.36	88.28	<0.0001
Rep	16.75	2	8.38	0.22	0.8055
Localidad	170474.65	49	3479.07	89.95	<0.0001
Cuenca	6566.26	2	3283.13	84.88	<0.0001
Muestra	7317.95	1	7317.95	189.20	<0.0001
Error	5879.13	152	38.68		
<b>Total</b>	<b>190254.74</b>	<b>206</b>			

### Zinc total (Zn)

En la Tabla 16 sobre el análisis de varianza de Zinc, se observa que presentó diferencias altamente significativas entre los puntos de muestreos (localidades) y significativa entre las partes de la cuenca (alta, media y baja). En cambio, entre las muestras (suelos y sedimentos) no hubo diferencias significativas. En el Anexo 17 de localidad se puede contemplar que en Capellanía 2 y Anón 4 no hay diferencias entre sitio, pero si hay diferencia entre Capellanía 2 y Santa María 1. En el Anexo 18 la cuenca baja y alta no presentó diferencias entre sí, pero en la cuenca media con respecto a la cuenca baja y alta si hubo diferencias. En el Anexo 1 se observa la concentración de zinc en cada punto de muestreo de suelos y sedimentos en el mapa de la cuenca.

**Tabla 16** Análisis de varianza del contenido zinc.

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Zn-total	207	0.92	0.89	14.91

**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	436641.48	54	8085.95	32.57	<0.0001
Rep	976.77	2	488.39	1.97	0.1434
Localidad	433632.31	49	8849.64	35.65	<0.0001
Cuenca	1820.19	2	910.10	3.67	0.0279
Muestra	212.20	1	212.20	0.85	0.3567
Error	37734.44	152	248.25		
Total	474375.92	206			

### Cadmio total (Cd)

En la Tabla 17 sobre el análisis de varianza del cadmio aparece que solo existe diferencia altamente significativa entre los sitios muestreados (localidad). En el Anexo 19 de cadmio se muestra la diferencia que existe entre el Anón 1 y Guías Abajo. De esta manera, la localidad del Anón 1 es la que mayor contenido de cadmio presenta. Sin embargo, estas fueron las únicas localidades que presentaron contenido, es decir que, el cadmio en el suelo fue bastante escaso y donde hubo presencia igual no se superaron los límites permitidos. En el Anexo 4 se observa la concentración de cadmio en cada sitio de muestreo de suelos y sedimentos en el mapa de la cuenca.

**Tabla 17** Análisis de varianza del contenido de Cd(cadmio).

Variable N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Cd-total 207	0.74	0.65	32.66

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.88	54	0.02	7.95	<0.0001
Rep	0.01	2	3.3E-03	1.60	0.2060
Localidad	0.88	49	0.02	8.70	<0.0001
Cuenca	0.00	2	0.00	0.00	>0.9999
Muestra	0.00	1	0.00	0.00	>0.9999
Error	0.31	152	2.1E-03		
Total	1.20	206			

### Níquel total (Ni)

En la Tabla 18 sobre análisis de varianza del níquel se observa que existe diferencias altamente significativas entre las localidades. Al igual que el cadmio, indicando, los contenidos de este metal en los diferentes sitios de muestreo varían entre sí, notablemente. En el Anexo 20, se evidencia lo antes dicho, los contenidos se alejan uno de otros. El Anón 1 y Gatú 1 por ejemplo, fueron unas de las muestras más altas en contenido de este metal, mientras que Capellanía 2, La Raya 1 y Los Limones 1, fueron uno de las más bajas. En el Anexo 3 se muestra la concentración de níquel en los sitios muestreados de suelos y sedimentos en el mapa de la cuenca.

**Tabla 18** Análisis de varianza del contenido de Ni(níquel).

Variable N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Ni-total 207	0.76	0.67	47.22

**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	45646.10	54	845.30	8.91	<0.0001
Rep	257.24	2	128.62	1.36	0.2609
Localidad	45035.75	49	919.10	9.69	<0.0001
Cuenca	207.28	2	103.64	1.09	0.3381
Muestra	145.83	1	145.83	1.54	0.2170
Error	14422.46	152	94.88		
Total	60068.56	206			

### Plomo total (Pb)

En la Tabla 19 sobre análisis de varianza del plomo, los resultados del análisis arrojan que en las variables estudiadas (localidad, cuenca, muestra) hubo diferencias altamente significativas. En el Anexo 21 las localidades que presentan una alta diferencia significativa, por ejemplo: Cañazas 1, Cañazas 2 y La Raya 1 que se encuentran entre los más alto de la gráfica. En cambios las que presentaron menos contenido están: El Anón 1 y El Torno 4. En el Anexo 22, en la cuenca se observa que hubo diferencia significativa entre la parte alta y media. Por otro lado, en la parte alta y baja no hubo diferencias significativas. En el Anexo 23 se observa que entre suelos y sedimentos si hubo diferencias significativas. En el Anexo 5 se muestra la concentración de plomo en los sitios muestreados de suelos y sedimentos en el mapa de la cuenca.

**Tabla 19** Análisis de varianza del contenido de Pb(plomo).

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Pb-total	207	0.77	0.69	34.88

**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1532.79	54	28.38	9.39	<0.0001
Rep	6.61	2	3.30	1.09	0.3379
Localidad	1426.38	49	29.11	9.63	<0.0001
Cuenca	75.26	2	37.63	12.45	<0.0001
Muestra	24.54	1	24.54	8.12	0.0050
Error	459.56	152	3.02		
Total	1992.35	206			

### 8.3. Metales pesados en color y textura

En los análisis estadísticos se encontró diferencias altamente significativas entre los diferentes colores y texturas de suelos en relación con los metales pesados. Las diferentes clasificaciones de color de suelo tienen una alta retención de Cu(cobre) y Zn(zinc); teniendo una baja retención Ni(níquel) y Pb(plomo). En el suelo pardo hubo una alta retención de Ni con 44.24 mg/kg. Entre las diferentes texturas de suelos presentes en la cuenca, se encontró diferencias altamente significativas; siendo el Zn el que más se presentó de acuerdo con los tipos de suelo, seguido del cobre. Por su parte, el Ni(níquel) y Pb(plomo) fueron los que menos presencia manifestaron. En el Anexo 12 y 13 se muestra un resumen de la concentración de los metales pesados en los colores y texturas de suelos.

Según investigaciones consultadas (Bautista, 2021) en su investigación los colores grises, rojizo oscuro y gris oscuro, y en algunos casos el grupo gris olivo alcanzaron las concentraciones mayores de Cu, Pb y Zn en este estudio, de la misma manera que lo reportado para el polvo urbano en Ensenada Baja California (Cortés et al. 2015). Estos metales pesados se consideran producto de la contaminación antrópica al estar muy por arriba de los valores de fondo, como por ejemplo los 20 mg/kg de plomo, 36 mg/kg de zinc, 41 mg/kg de cromo y 7 mg/kg de cobre (Ihl et al., 2015).

#### **8.4. Análisis de varianza textura - color**

##### **Cobre total (Cu)**

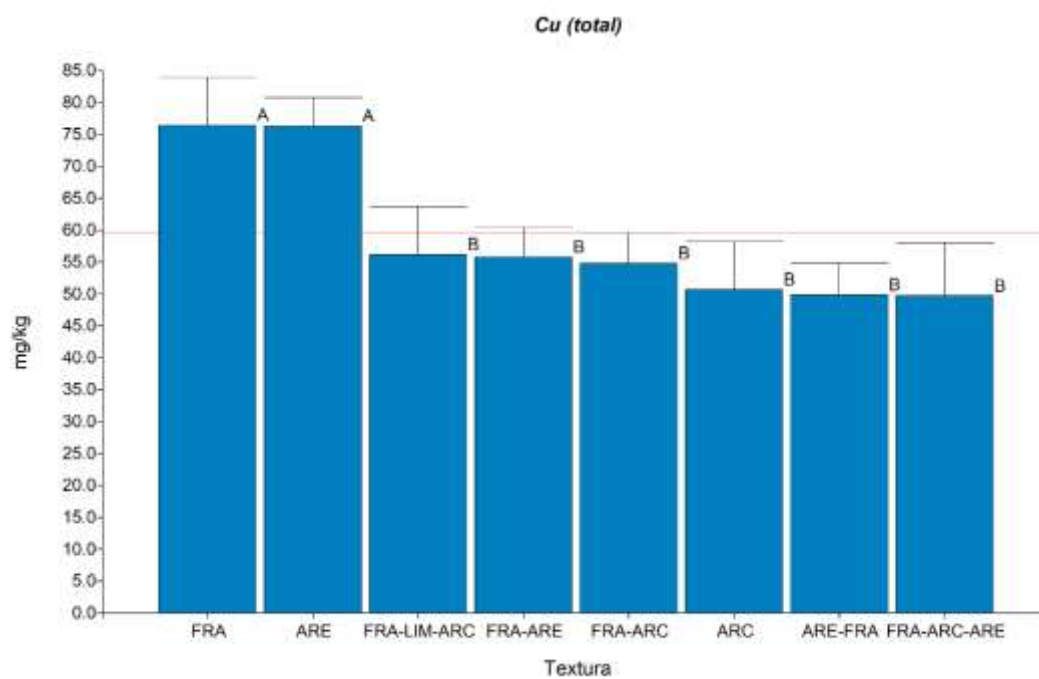
En la Tabla 20 del cobre, los resultados arrojan que hubo diferencias altamente significativas entre la textura del suelo y el color. En la Figura 15 de textura se contempla que en las diferentes clasificaciones de suelo la presencia de cobre estuvo bastante similar entre sí, excepto los suelos FRA en comparación con los ARC y ARE-FRA. En la Figura 16 se observa que los suelos pardo oscuro y pardo grisáceo hubo alta presencia de cobre, en cambio en los suelos pardo amarillento oscuro y pálido la presencia fue baja.

**Tabla 20** Análisis de varianza del contenido de Cu(cobre) en relación con la textura y color.

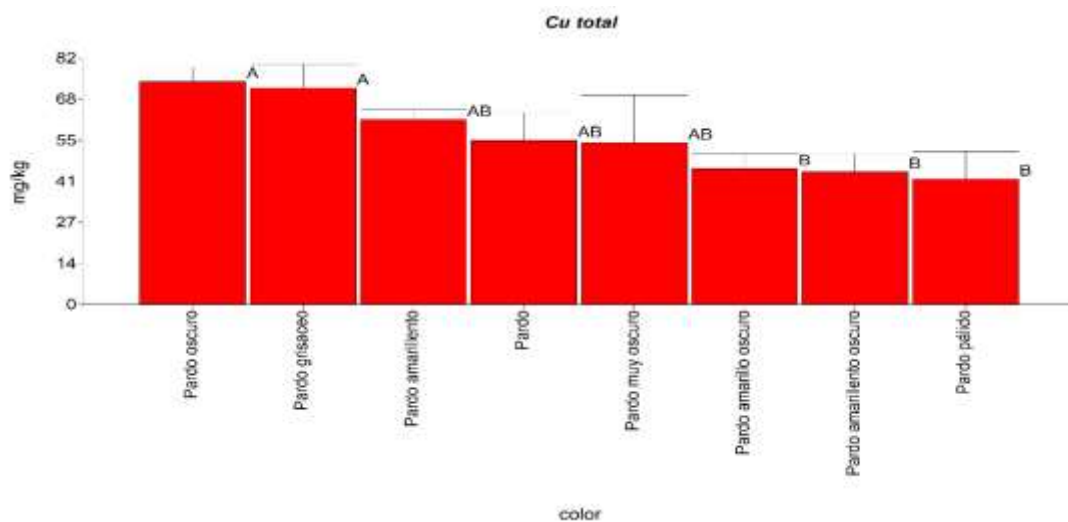
Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Cu-total	207	0.24	0.18	46.24

**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	45160.15	15	3010.68	3.96	<0.0001
color	25340.61	7	3620.09	4.77	0.0001
Textura	19819.54	8	2477.44	3.26	0.0017
Error	145094.59	191	759.66		
Total	190254.74	206			



**Figura 15** Contenido de Cu(cobre) según la textura del suelo.



**Figura 16** Contenido de Cu(cobre) según el color del suelo.

### Zinc total (Zn)

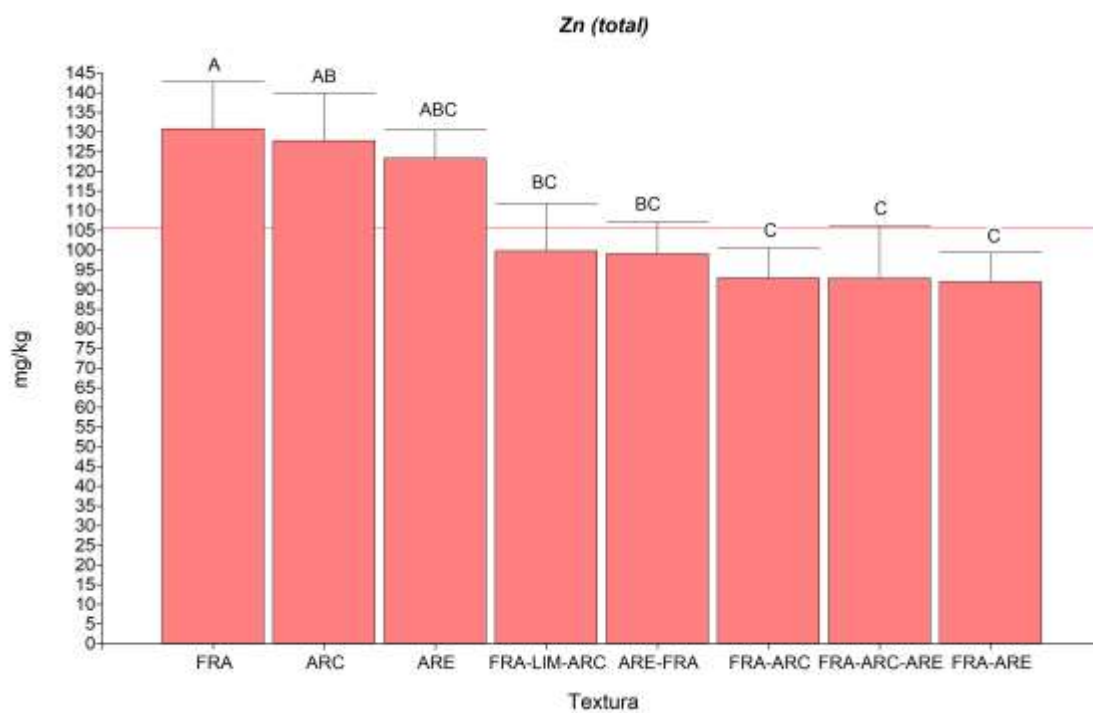
En la Tabla 21 sobre análisis de varianza de zinc, solo hubo diferencia altamente significativa entre las texturas. En la Figura 17 se observa que la concentración de zinc en las diferentes texturas de suelo está relacionada una con la otra, excepto el suelo FRA en comparación con el ARE-FRA.

**Tabla 21** Análisis de varianza del contenido de Zn (zinc en relación con el color y textura.

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Zn-total	207	0.19	0.13	42.47

**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	89792.14	15	5986.14	2.97	0.0003
color	27524.57	7	3932.08	1.95	0.0635
Textura	62267.58	8	7783.45	3.87	0.0003
Error	384583.77	191	2013.53		
Total	474375.92	206			



**Figura 17** Gráfica del contenido de Zn(zinc) en relación con la textura del suelo.

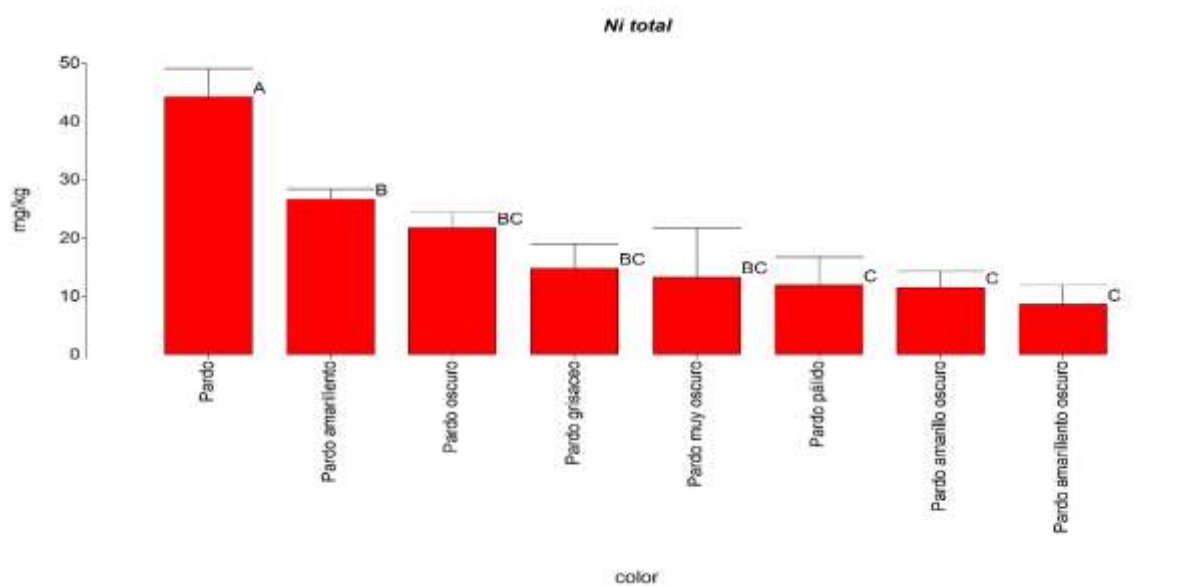
## Níquel total (Ni)

Con respecto a la Tabla 22 sobre análisis de varianza del níquel, el resultado del análisis estadístico determinó que hubo diferencia altamente significativa en color y textura. Es decir, que los metales variaron según las características físicas del suelo de cada lugar muestreado. En la Figura 18 se observa que los suelos pardos hubo mayor presencia de níquel que en los suelos pardo-amarillentos oscuros, con una diferencia significativa. Por otro lado, los suelos pardo-amarillentos, pardo oscuro, pardo grisáceo, pardo muy oscuro, pardo pálido, pardo amarillo oscuro y pardo amarillento oscuro dieron presencia de níquel bastante similar. En cambio, en la textura los suelos FRA-LIM-ARC, obtuvieron presencia de níquel bastante superior con respecto a las otras clases de suelos, mientras que, en las demás texturas de suelo la presencia fue similar (Figura 19).

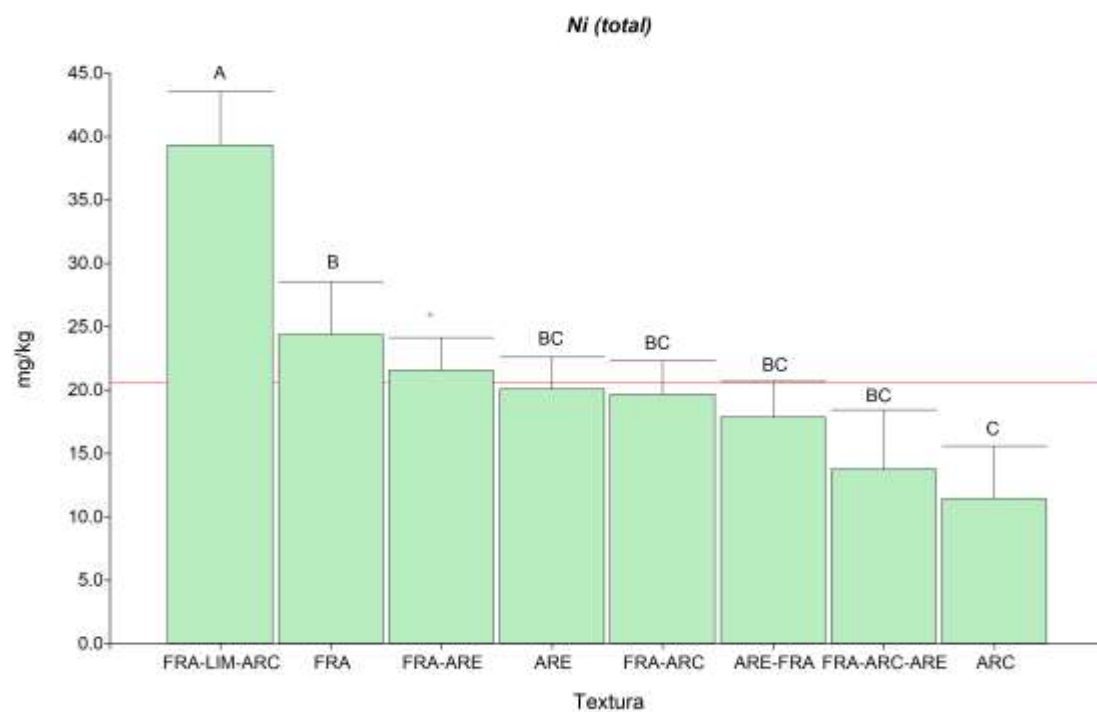
**Tabla 22** Análisis de varianza del contenido de Ni(níquel) según el color y textura.

Variable N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Ni-total 207	0.33	0.28	40.30

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	19898.56	15	1326.57	6.31	<0.0001
color	14355.01	7	2050.72	9.75	<0.0001
Textura	5543.56	8	692.94	3.29	0.0015
Error	40170.00	191	210.31		
Total	60068.56	206			



**Figura 18** Gráfica del contenido de Ni(níquel) según el color del suelo.



**Figura 19** Gráfica del contenido de Ni(níquel) según la textura del suelo.

### Plomo total (Pb)

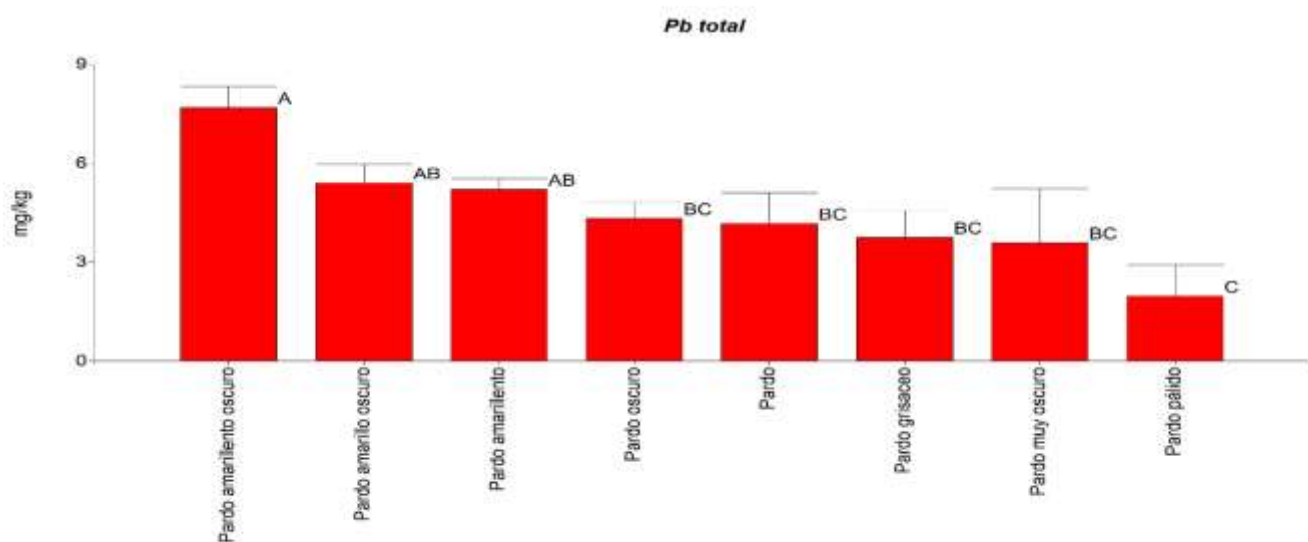
De acuerdo con la Tabla 23, los resultados estadísticos obtenidos en el análisis de varianza para el plomo, hubo diferencias altamente significativas con respecto al color y significativa en textura del suelo. En la Figura 20, los suelos pardo-amarillentos oscuro obtuvieron mayor presencia de plomo, a diferencia del pardo pálido que fue mucho menor. En cambio, según la Figura 21 en los suelos arcillosos fueron donde se presentó un contenido de Pb (plomo) más alto y estuvo relacionado con la mayoría de los suelos excepto con los suelos FRA-ARC.

**Tabla 23.** Análisis de varianza del contenido de Pb(plomo) según color y textura.

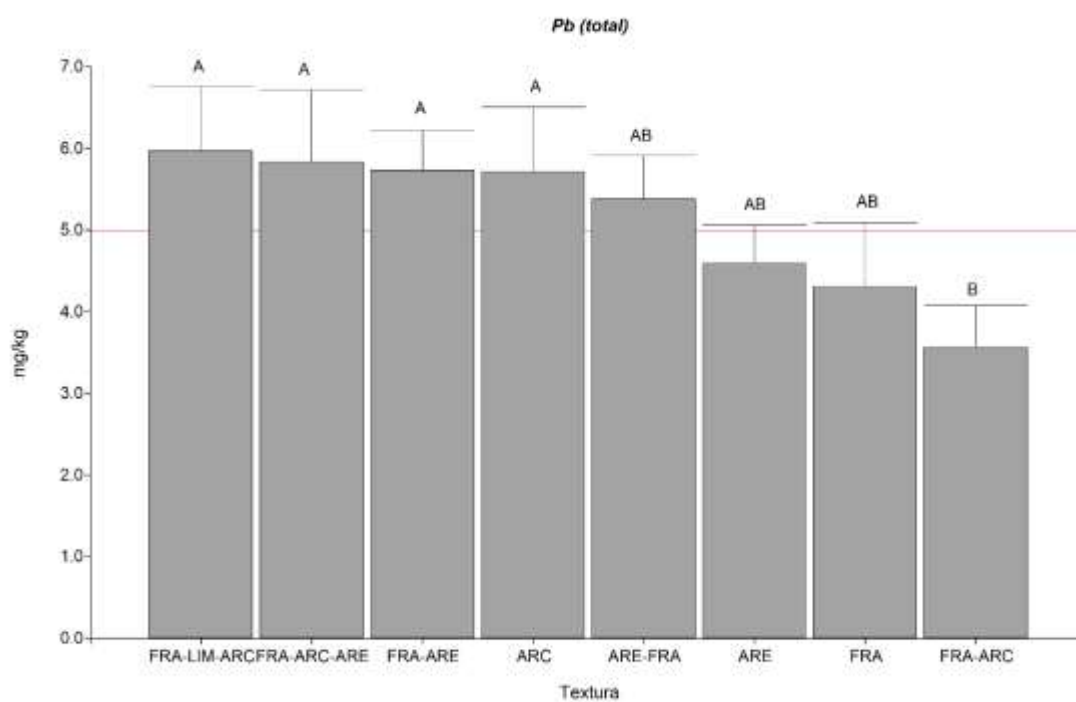
Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Pb-total	207	0.23	0.17	46.72

#### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	465.40	15	31.03	3.88	<0.0001
color	312.27	7	44.61	5.58	<0.0001
Textura	153.13	8	19.14	2.39	0.0175
Error	1526.95	191	7.99		
Total	1992.35	206			



**Figura 20** contenido de Pb(plomo) según el color del suelo.



**Figura 21** Contenido de Pb(plomo) según la textura del suelo.

### **8.5. Análisis multivariado de componentes principales**

En la Figura 22, 23 y 24 se muestra la relación de los diferentes componentes analizados en esta investigación, sin tomar en cuenta la unidad de medida.

En las figuras de suelo – sedimento; agua - sedimento y cultivo se compara las diferentes partes de la cuenca y su relación con todas las variables analizadas en esta investigación.

En la Figura 22 de suelo – sedimento se observa que en la parte baja y media de la cuenca hay una gran presencia de metales y minerales que indican una relación entre sí, en comparación con la parte alta. El contenido de estos elementos y metales es menor, esto puede variar por influencia del pH, la textura, materia orgánica entre otros. La cantidad de metal ligada a la fracción orgánica de un suelo depende de las características propias del elemento. El porcentaje de metal enlazado a la materia orgánica procedente de las aplicaciones de enmiendas orgánicas y extraído con EDTA (potencialmente disponible) puede llegar a ser de un 80-90% para Cd, Cu y Zn y de un 50-60 % para Ni y Pb (Berrow y Burridge, 1990). La materia orgánica, al acomplejar metales, produce un descenso del pH al liberar H<sup>+</sup> (Doner et al, 1982). Al acidificar el suelo se pueden movilizar metales y provocar que una parte del mismo pase a formas salubre (Németh et al. 1996) lo que puede suponer un riesgo de contaminación al aumentar su biodisponibilidad. La disminución del

pH y la presencia de aniones como Cl, originan así mismo un mayor contenido de metales solubles en el suelo entre ellos el Níquel (Evans et al. 1995).

En la Figura 23 agua – sedimento según los resultados del análisis estadístico multivariado vemos que en la parte baja y media de la cuenca hay presencia de metales pesados y minerales en comparación con la parte alta que el contenido es casi nulo.

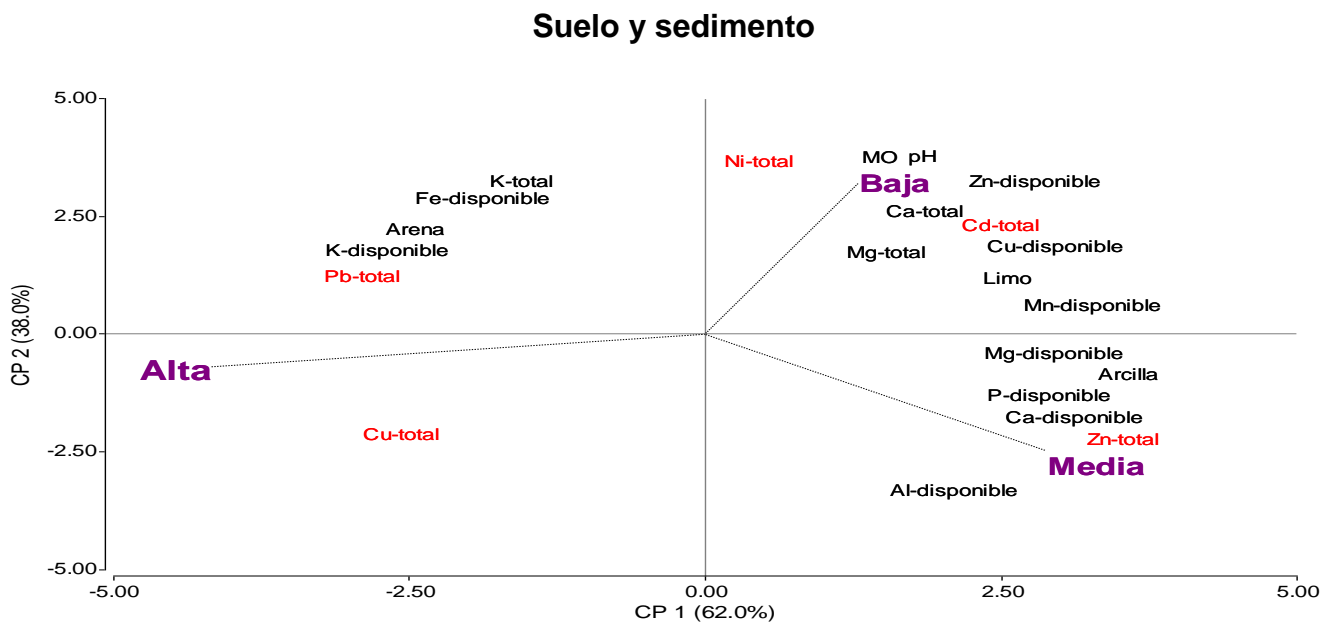
Las actividades antrópicas producen diferentes tipos de vertidos que incrementan la concentración de metales pesados en los sedimentos fluviales. Según su forma de asociación, los metales son susceptibles o no de solubilizarse durante las modificaciones fisicoquímicas estacionales (estiaje, crecida, etc.). La desoxigenación de las capas profundas durante el verano ocasiona la reducción química de los óxidos asociados a la fase sólida, produciendo así, la disminución de la concentración de Fe(hierro) y Mn(manganeso) en el sedimento. La reducción de estos dos elementos puede ocasionar la solubilización de ciertos metales adsorbidos en el sedimento como el Zn, Cr y Ni. K. (El Falaki et al, 1994).

Los sedimentos pueden actuar como portadores y posibles fuentes de contaminación, porque los metales pesados no se quedan permanentemente y pueden ser liberados a la columna del agua por cambios en las condiciones ambientales, tales como pH, potencial redox, oxígeno disuelto o la presencia de quelatos orgánicos (Bhattacharj et al. 1987). Por otra parte, numerosos estudios han demostrado el poder quelatante del EDTA, que disuelve metales

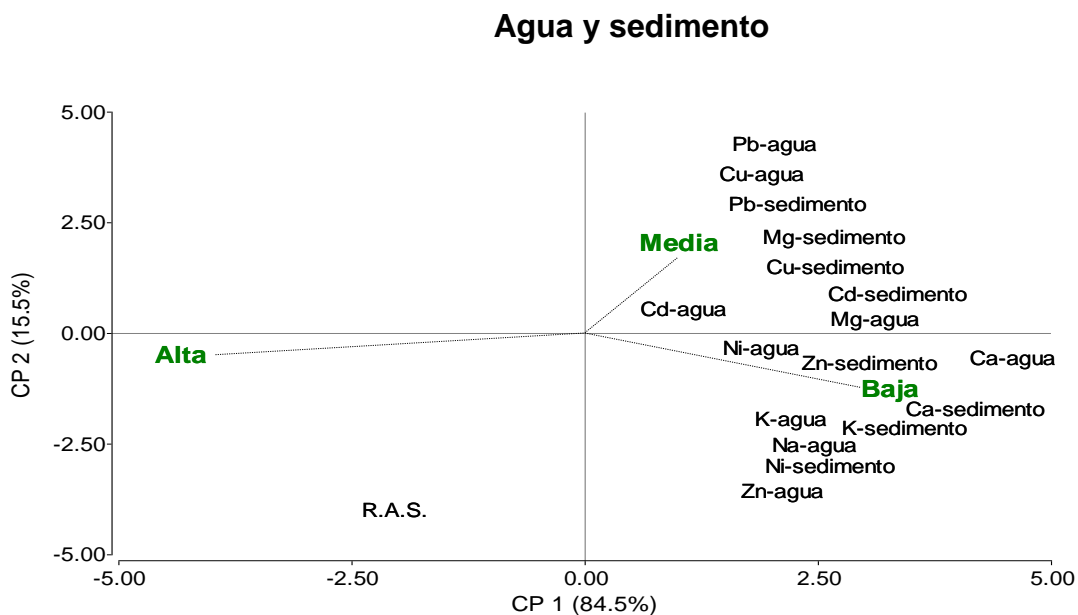
de los sedimentos incorporándolos a la columna del agua. Por tanto, el análisis de metales pesados en sedimentos permite detectar la contaminación que puede escapar al análisis de las aguas y también proporciona información acerca de las zonas críticas del sistema acuático (S. J. Gonsior et al. 1997).

En la Figura 24 vemos que la presencia de minerales y metales pesados con relación a los tipos de cultivos estudiados se observa que la sandía (fruto) tuvo una alta relación con los metales Pb(plomo), Zn(zinc). Esto tiene relación con lo descrito por (Hettiarachchi y Pierzynski, 2002), en suelos contaminados con Pb(plomo), este se encuentra comúnmente asociado a Cd(cadmio) y Zn(zinc). Sin embargo, en este estudio el Cd(cadmio) salió bajo y respectivamente alejado del cultivo de sandía, esto puede deberse a lo mencionado por Jonathan *et al.* (2002), han demostrado con estudios de campo con Cd(cadmio) y Zn(zinc), que la adición de Zn(zinc) puede reducir la acumulación de Cd(cadmio) en las plantas cultivadas, y demostraron que en el cultivo de trigo (*Triticum aestivum* y *T. turgidum*) la extracción de  $Cd^{2+}$  fue inhibida por  $Zn^{2+}$ . El zapallo (fruto) está asociado con Ni(níquel), esto puede deberse a aplicaciones de fertilizantes excesivas y dosis altas. También, puede deberse a que la muestra procesada de este cultivo fue el fruto directamente, lo que coincide con los resultados obtenidos por Sauerbeck (1991), quien sugirió una movilización de este elemento de las partes vegetativas a las reproductivas, para posteriormente acumularse en las semillas (Mishra y Kar, 1974). En el caso del limón (follaje) y el café (follaje) tuvieron una alta relación con Cu(cobre) y Cd(cadmio). La presencia de cobre

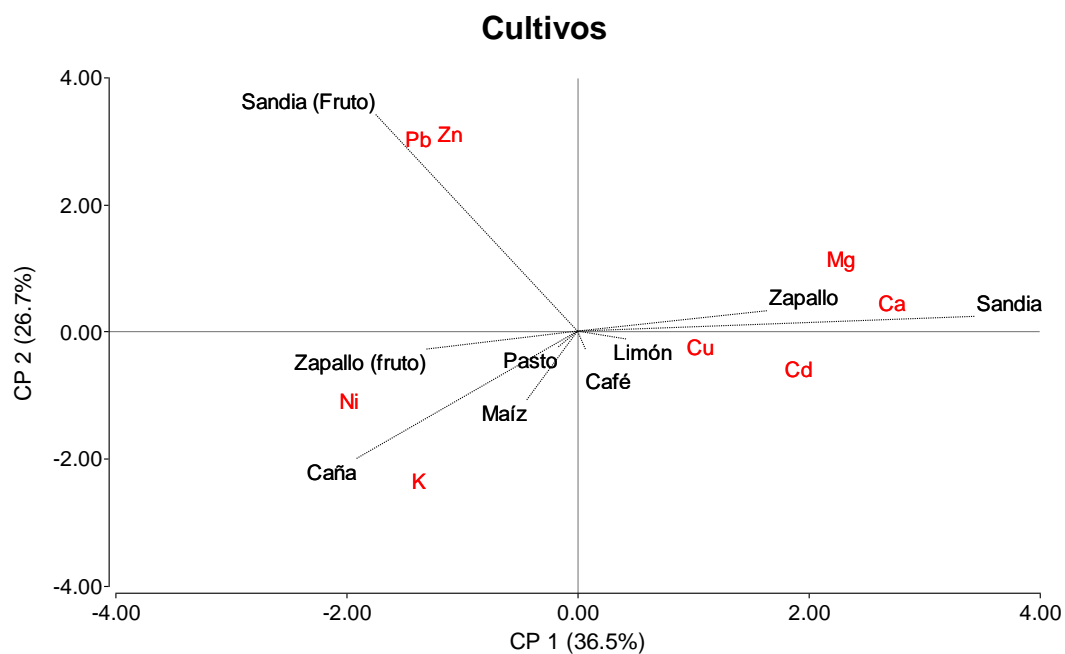
y cadmio en el ambiente tiene, en buena parte, un origen natural tal como el producido por la erosión de muchas rocas, también por consecuencia de la actividad volcánica, incendios forestales, entre otras. Esta puede ser la causa de su presencia en los cultivos mencionados, puesto que cercanos a éstas área de producción existe un volcán.



**Figura 22** Gráfica de análisis multivariado de componentes principales de suelos y sedimentos.



**Figura 23** Gráfica de análisis multivariado de componentes principales de aguas y sedimentos.



**Figura 24** Gráfica de análisis multivariado de componentes principales de cultivos

## CONCLUSIONES

En el presente estudio, se concluye lo siguiente:

- La presencia de los metales pesados (Cu, Ni, Zn, Pb, Cd) analizados en suelos, se encontraron niveles bajos, dentro de lo que exige la norma EPA. En cambio, en sedimento solo los metales Ni y Cu presentaron niveles por encima de lo permitido según las normas USEPA.
- El análisis del agua de la cuenca del Río Santa María se comprobó que, de los metales analizados, el único que sobrepasó los límites permitidos por las normas COPANIT fue el Cu.
- Los cultivos el Zn, Pb y Ni sobrepasaron los límites máximos permitidos en cultivos de caña de azúcar, arroz, pasto y existía mayor contenido en cucurbitáceas (sandía, zapallo). Esto puede deberse a que el Zn y Ni son fácilmente absorbido por las plantas. También puede tener relación con la alta aplicación de productos químicos (plaguicidas y fertilizantes) como han descrito muchos autores.
- Se comprobó que, en los plaguicidas, el Zn superó los límites máximos permitidos en fungicidas solamente. Mientras que en fertilizantes el Cu, Zn y Ni superaran los límites máximos permitidos en la urea. Esto debido a su presencia habitual en la formulación de estos productos, que muchas veces

por su frecuencia y constancia en aplicaciones agrícolas durante muchos años, quedan retenidos y bioacumulados.

- En el análisis estadístico (regresión suelos-cultivos) se determinó que existe una correlación positiva entre Cu, Mg y Zn con Ca, Mg, es decir que influyen entre sí en el aumento de la disponibilidad (suelo-planta). También, existe diferencias altamente significativas entre los colores y texturas de suelos con respecto al contenido de metales pesados en suelos.

## REFERENCIAS CITADAS

- Aguilar, J; Dorronsoro, C.; Galán, E. & Gómez Ariza, J.L. (1999): Los criterios y estándares para declarar un suelo como contaminado en Andalucía y la metodología y técnica de toma de muestras y análisis para su investigación. In "Investigación y Desarrollo Medioambiental en Andalucía". OTRI. Universidad de Sevilla, 61-64.
- Alloway B.J. 2013 Heavy Metals in Soils, Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability (3ra Ed.) United Kingdom.
- Alloway, B. J. (1990). "Soil processes and the behaviour of inerals " en "Heavy Metals in Soils ". B.J. Alloway (et.), Blackie and Son, Ltd., Gran Bretaña.
- ATSDR (Agency for Toxic Substances & Disease Registry). (2004). Reseña toxicológica del cobre. Atlanta, GA: Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU., Servicio de Salud Pública, 10 p. Consultado el 4 de febrero del 2022: <file:///D:/Downloads/Dialnet-EvaluacionDeMetalesPesadosEnLosSedimentosSuperfici-4835669.pdf>
- Bayona, M. L. (21 de Julio de 2014). niveles de cd, co, cr, cu, ni, pb y zn en los suelos de ribera de la cuenca del rio. Obtenido de <file:///D:/Downloads/Tesis-Larios.pdf>
- Cabezas, J. Alonso, J., Pastor, J., Sastre, I. & Lobo, M. (2004). Absorción y acumulación de metales pesados en tres especies vegetales en suelos enmendados con lodos de depuradora. INIA (Instituto Nacional de

Investigación Agraria), Madrid – España. Disponible en: [http://digital.csic.es/bitstream/10261/52285/1/absorcion\\_yacu2004852 .pdf](http://digital.csic.es/bitstream/10261/52285/1/absorcion_yacu2004852.pdf). Recuperado el 10/04/2016.

- C. Su; L. Jiang; W. Zhang, “A review on heavy metal contamination in the soil worldwide: situation, impact and remediation techniques,” *Environmental Skeptics and Critics*, vol. 3, no. 2, pp. 24-38. Jun.2014. [http://www.iaees.org/publications/journals/environsc/articles/2014-3\(2\)/a-review-on-heavy-metal-contamination-in-the-soil-worldwide.pdf](http://www.iaees.org/publications/journals/environsc/articles/2014-3(2)/a-review-on-heavy-metal-contamination-in-the-soil-worldwide.pdf)
- Curtis, D.; Watkins J. 2001 Manual de Toxicología. 5ta Ed. Ed McGraw-Hill Interamericana. México
- De Armas, T.; Castro D.2007. Impacto de la contaminación ambiental sobre los cultivos: metales pesados. Ciencia y Tecnología de Alimentos., Vol. 17. No.1
- D. K. Gupta; S. Chatterjee; S. Datta; V. Veer; C. Wtalthier, “Role of phosphate fertilizers in heavy metal uptake and detoxification of toxic metals,” *Chemosphere*, vol. 108, pp. 134-144. Aug. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.01.030>
- Cheam, V. Chelation study of copper (II): fulvic acid system. Canadian Journal of Soil Science. 53: 377-382. 1973.
- Jonathan, J. H., M. W. Ross, A. N. Wendel, and V. K. Leon. 2002. Transport interactions between cadmium and zinc in roots of bread and durum wheat

seedlings. *Physiol. Plant.* 116: 73-78.

[http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S012099652009000100005](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S012099652009000100005)

- Hettiarachchi, G.M. and G.M Pierzynski. 2002. In situ stabilization of soil lead using phosphorus and manganese oxide: Influence of plant growth. *J. Environ. Qual.*, 31:564-573.
- Kabata-Pendias A. Soil–plant transfer of trace elements—an environmental issue. *Geoderma*. 2004; 122(2):143-149.
- Kabata-Pendias A, Pendias H, 2001. Trace Elements in Soils and Plants. CRC Press, Boca Raton, FL.
- K. El Falaki, C. Perrin, L. Belkesam and A. Peisajovich, Impacto de los detergentes sobre los sedimentos. *Movilización de metales, Tecnología del agua* 128, (1994), pp. 25-31.
- Læg Reid M, Bockman OC, Kaarstad O. 1999. Agriculture, fertilizers and the environment. CABI publishing.
- Lerma-Torres, D.-C., M.-J. Puy-Alquiza y C. Rodríguez-Robelo 2016. "Remediación electrocinética del aire de los túneles de la ciudad de Guanajuato." *Revista: Jovenes en la ciencia*, Vol. 2, N°1, pp. 284 - 288. Consultado el 20 de enero del 2022: <http://repositorio.uaaan.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/45601/M>

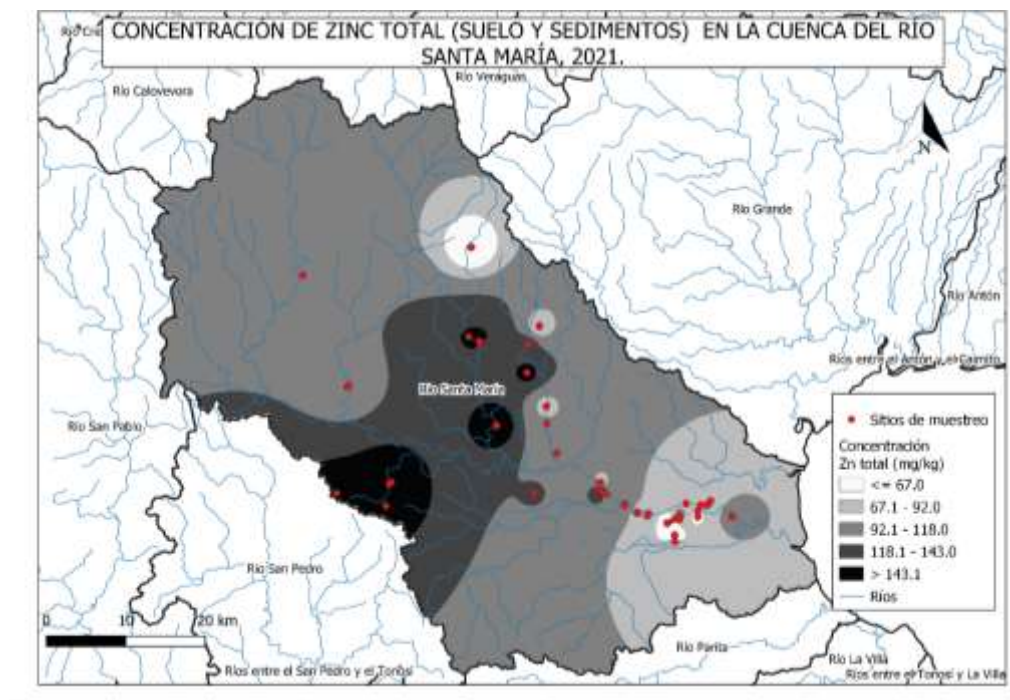
[AR%C3%8DA%20GABRIELA%20VILLA%20GALINDO.pdf?sequence=1&isAllowed=y](#)

- L. Zheng; B. Ying; Y. Tongming, “Effect of Cd on the Uptake and Translocation of Pb, Cu, Zn, and Ni in Potato and Wheat Grown in Sierozem,” *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, vol. 28, no. 7, pp. 650-669. Jul. 2019. <https://doi.org/10.1080/15320383.2019.1643289>
- Marrugo, J., Lans, E., Doria, G., Bello, L., Castillo, M., Cortes, F. & Pinedo, J. (2006). Impacto ambiental por contaminación con níquel, mercurio y cadmio en aguas, peces y sedimentos en la cuenca del Río San Jorge, en el Departamento de Córdoba. Universidad de Córdoba, Centro de Investigaciones – CIUC. Monteiro, Colombia, 109 p. Consultado el 4 de febrero del 2022: <file:///D:/Downloads/Dialnet-EvaluacionDeMetalesPesadosEnLosSedimentosSuperfici-4835669.pdf>
- Micó C, Recatalá L, Peris M, Sánchez J. Assessing heavy metal sources in agricultural soils of and European Mediterranean area by multivariate analysis. *Chemosphere*. 2006;65(5):863-872.
- Navarro, E. & Sabater, S. (2004). Contaminación de los ríos por metales pesados. *Investigación y Ciencia* 336, 26-31. Consultado el 4 de febrero del 2022: <file:///D:/Downloads/DialnetEvaluacionDeMetalesPesadosEnLosSedimentosSuperfici-4835669.pdf>

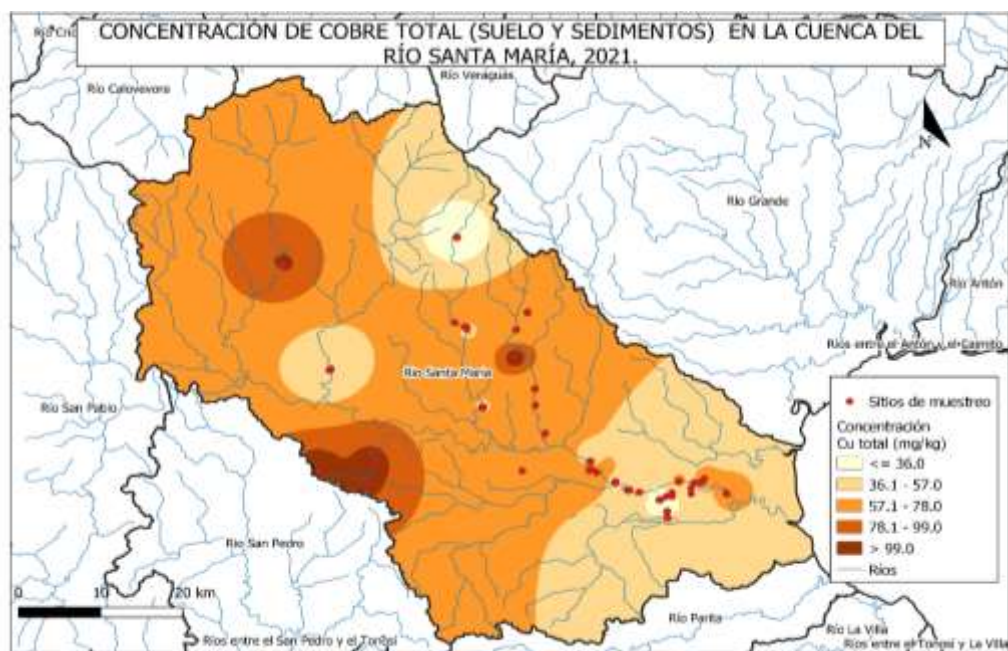
- Sauerbeck, D. 1991. Plant, element and soil properties governing uptake and availability of heavy metals derived from sewage sludge. *Water Air Soil Pollut.* 1, 57-58.
- S. Bhattacharij et al., Contaminated Sediments, Lecture Notes in Earth Sciences, Ed. by Förstner U., Vol.21, Springer-Verlag, Germany, (1987), pp. 1-157.
- S. J. Gonsior, J. J. Sorci and M. J. Zoellner M.J., The effects of EDTA on metal solubilization in river sediment/water systems, *J. Environ. Qual.* 26, (1997), pp. 957-966
- SEMARNAT (Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2010. Guía Técnica para orientar en la Elaboración de Estudios de Caracterización de Sitios Contaminados. Ministerio del ambiente. México, 217 p.
- USEPA (1996) Soil screening guidance: technical background document. EPA/540/ R-95/128. Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, DC, p A-5.
- Walton, R. C., McCrohan, C. R., Livens, F., White, K. N. (2010). Trophic transfer of aluminium through an aquatic grazer–omnivore food chain. *Aquatic toxicology* 99(1), 93-99.
- X. X. Chen; Y. M. Liu; Q. Y. Zhao; W. Qing Cao; X. Ping Chen; C. Q. Zou, “Health risk assessment associated with heavy metal accumulation in wheat

after long-term phosphorus fertilizer application,” *Environmental Pollution*, vol. 262, pp. 114348. Jul.2020. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114348>

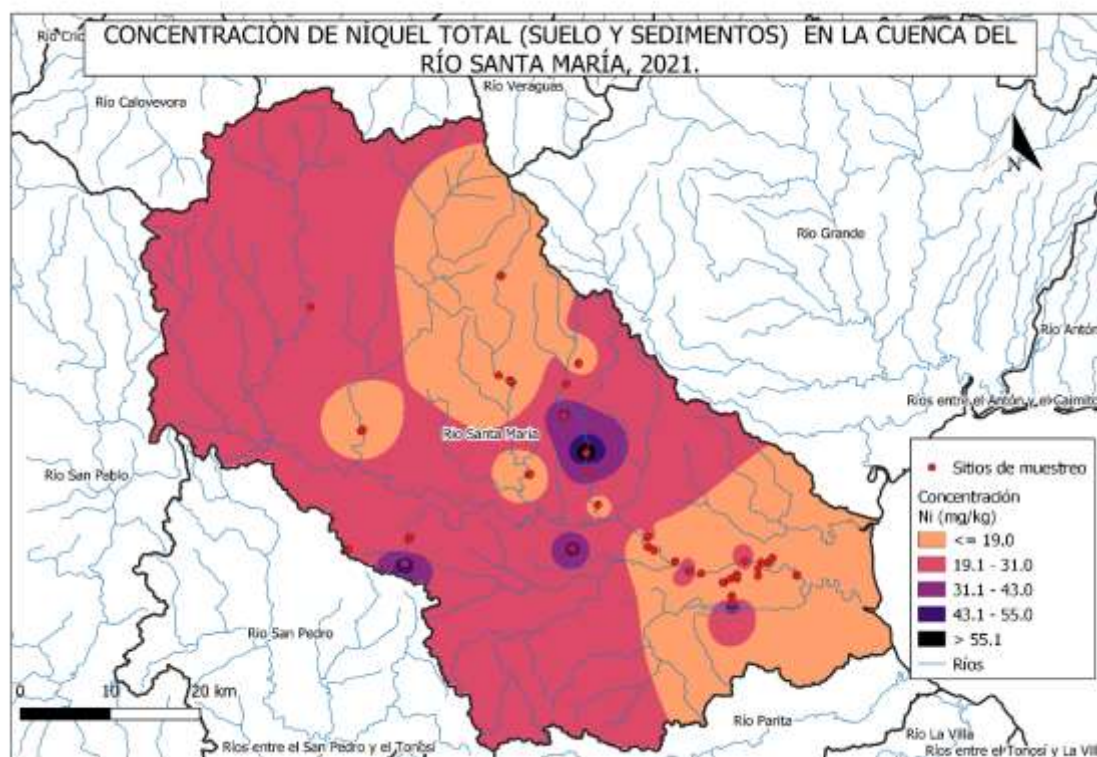
## ANEXOS



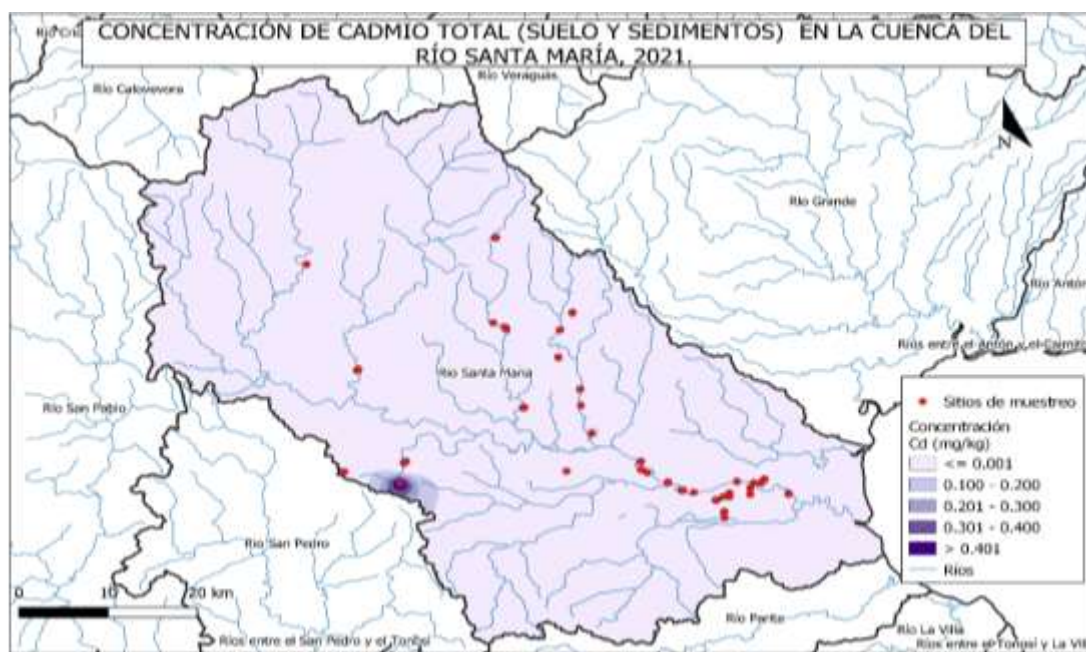
**Anexo 1** Concentración de Zn en los diferentes tipos de muestreos, 2021.



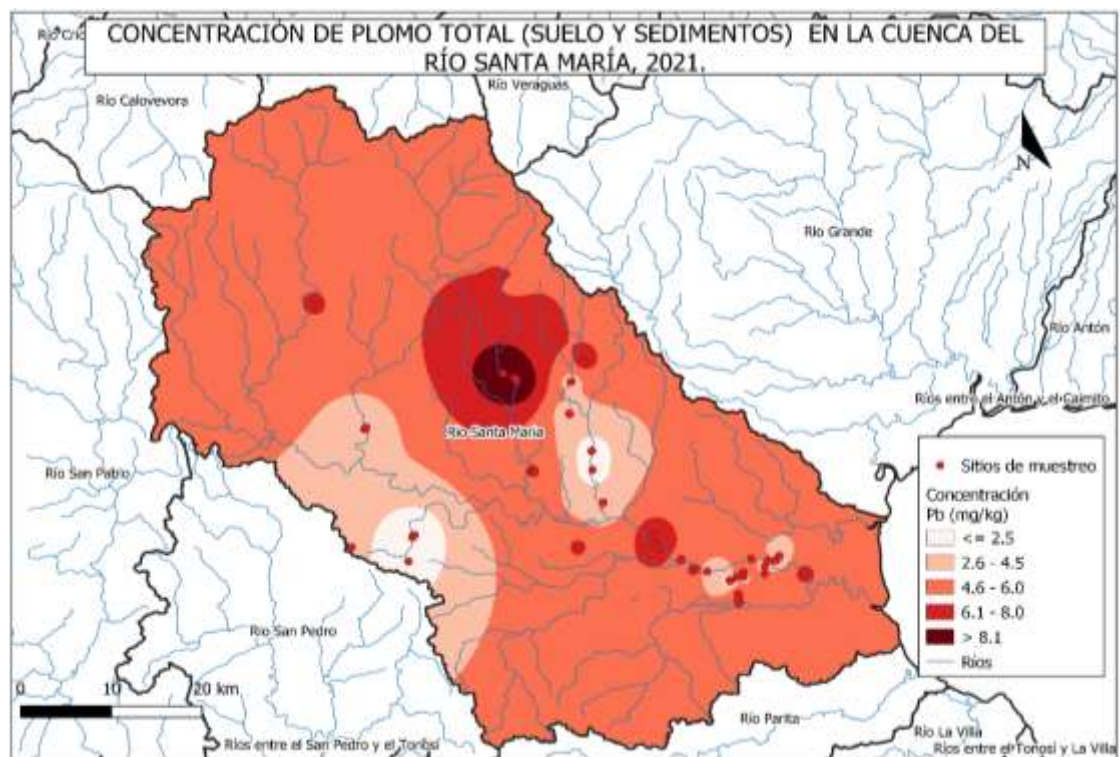
**Anexo 2** Concentración de Cu(cobre) en los diferentes puntos de muestreo 2021.



**Anexo 3** Concentración de Ni(níquel) en los diferentes puntos de muestreo, 2021.



**Anexo 4** Concentración de Cd(cadmio) en los diferentes puntos de muestreo, 2021.



**Anexo 5** Concentración de Pb(plomo) en los diferentes puntos de muestreo, 2021.

## Anexo 6. Caracterización química de los suelos muestreados

Localidad	MO	pH	P	K	Ca	Mg	Al	Mn	Fe	Zn	Cu
	%		mg/kg		Cmol/kg			mg/kg			
Anón	1.1	6.3	5.0	44.3	8.3	5.0	0.1	55.6	68.8	2.4	5.7
Anón 1	0.5	6.2	3.0	28.6	4.0	2.7	0.1	11.8	5.8	1.2	2.9
Anón 2	0.4	6.1	35.0	58.1	7.3	6.0	0.2	59.2	70.5	1.8	2.5
Anón 3	1.0	6.2	20.0	59.5	8.8	4.1	0.2	17.6	18.0	3.0	2.2
Anón 4	1.0	6.2	20.0	43.8	9.4	4.8	0.2	19.2	8.2	5.0	1.9
Cañazas	0.5	6.4	16.0	75.9	9.5	5.2	0.2	56.4	24.9	5.0	3.5
Cañazas 1	1.0	5.4	6.0	74.0	4.7	2.7	0.1	51.9	18.3	1.7	2.8
Cañazas 2	1.2	5.5	14.0	54.2	6.0	3.1	0.1	32.9	6.9	2.4	1.8
Capellania	1.2	5.9	13.0	69.7	5.9	4.4	0.1	46.3	87.7	3.6	7.4
Capellania 1	0.4	6.8	74.0	66.3	9.9	5.9	0.1	32.6	45.1	3.3	1.5
Capellania 2	1.4	4.8	0.0	24.6	3.4	1.3	0.7	13.6	21.8	2.3	2.8
Divisa	0.2	6.1	15.5	80.3	8.0	6.7	0.2	44.5	25.2	6.3	2.0
El Arrozal	0.1	6.8	7.0	69.5	2.4	1.3	0.1	28.2	62.7	4.7	1.4
El Arrozal 1	1.5	5.5	3.0	91.5	6.7	4.0	0.2	146.9	18.8	4.4	6.8
El Arrozal 2	0.9	5.2	0.0	23.6	6.0	3.6	0.8	42.5	23.3	5.3	7.7
El Bajo	1.6	6.1	58.0	194.0	9.3	5.6	0.1	42.1	11.9	7.0	2.6
El Cañal	0.7	6.1	8.0	50.9	5.4	4.4	0.3	80.4	19.3	3.6	3.5
El Mangal	1.7	6.4	10.0	72.7	8.7	8.0	0.2	58.5	30.6	2.2	3.7
El puente	0.7	6.2	16.5	58.7	8.6	4.2	0.2	53.3	25.0	9.5	2.9
El Rincón	0.8	6.4	25.0	54.8	7.7	4.0	0.2	77.9	38.6	6.8	2.3
El torno	2.0	6.0	15.0	109.8	7.0	3.6	0.2	59.4	11.6	4.2	4.8
El Torno 1	0.6	5.4	1.0	47.3	2.7	1.3	0.2	81.3	222.0	6.2	2.7
El Torno 2	0.6	6.2	8.5	70.7	5.3	3.2	0.3	66.5	25.6	2.2	2.5
El Torno 3	1.0	6.4	24.0	154.1	6.2	2.5	0.2	61.6	8.5	8.3	2.2
El Torno 4	0.4	6.5	36.5	81.4	13.0	7.3	0.3	44.1	16.0	0.8	1.7
Gatú	0.1	7.2	63.0	54.0	5.8	3.0	0.1	52.9	26.9	7.4	2.4
Gatú 1	1.5	5.4	11.0	139.0	5.7	4.6	0.2	82.7	58.7	5.7	3.4
Gatú 2	2.0	6.3	90.0	57.4	8.6	3.8	0.1	109.6	6.9	4.0	2.9
Guía abajos	0.3	6.2	20.0	50.3	7.6	3.3	0.2	25.2	13.3	2.0	0.9
Guias Arriba	0.8	6.5	32.5	68.3	9.7	6.8	0.1	39.6	16.8	3.8	2.7
Jaguito	0.4	6.0	20.0	56.9	8.7	3.4	0.2	24.9	9.9	0.9	0.7
La Botijuela	1.3	6.1	36.5	121.2	7.5	5.0	0.2	58.7	19.4	3.3	4.1
La cebolla	0.9	5.8	3.0	67.2	4.3	3.4	0.7	25.3	15.1	1.6	2.7
La Cienega	0.9	6.4	42.5	67.6	11.7	6.3	0.2	48.0	13.1	2.3	3.6
La corocita	1.3	5.9	9.5	83.3	4.6	7.1	0.3	64.9	18.2	3.4	4.9
La Raya	1.2	6.1	18.0	60.4	9.4	4.6	0.2	36.0	10.9	2.0	3.0
La raya 1	0.3	6.2	58.0	69.6	6.7	4.4	0.2	16.3	8.6	0.9	2.6
La raya 2	0.3	6.7	80.0	57.3	6.6	3.8	0.2	30.3	17.1	2.5	1.4
La Yeguada	0.7	5.9	12.0	67.1	5.8	3.7	0.1	48.4	50.6	2.9	2.8
Las Tetas	1.1	5.7	28.0	87.7	6.8	3.8	0.2	40.6	42.1	4.4	3.4
Lechería	0.9	6.3	47.0	68.9	10.0	3.7	0.2	44.4	13.8	2.9	2.7
Los limones 1	0.4	6.5	19.0	37.5	9.8	5.2	0.2	10.8	7.2	0.6	1.5
Los limones 2	1.4	6.4	4.0	25.7	11.7	6.7	0.5	28.2	8.7	1.6	1.8
Santa Fe	0.4	6.3	62.5	81.4	10.2	5.7	0.1	41.3	17.0	2.9	2.9
Santa María	1.4	6.1	54.0	41.4	8.6	5.4	0.1	16.1	2.9	2.8	3.5
Santa María 1	0.4	6.2	44.0	63.3	9.3	4.0	0.2	39.0	12.4	4.7	2.2
Santa María 2	1.4	5.9	15.0	87.3	7.4	4.9	0.3	102.6	44.7	2.2	3.0
Santa Rita	1.5	5.6	7.0	122.7	4.6	2.5	0.1	36.6	4.3	3.6	1.8
promedio	0.9	6.1	25.2	70.7	7.4	4.4	0.2	48.0	28.2	3.6	3.0
Desv. Estandart	0.5	0.4	22.8	32.6	2.4	1.6	0.2	26.8	34.5	2.0	1.5

### Anexo 7 Caracterización de suelos por cuenca alta, media y baja.

Cuenca	MO	pH	P	K	Ca	Mg	Al	Mn	Fe	Zn	Cu
	%		mg/kg		Cmol/kg			mg/kg			
Alta	0.80	5.96	11.43	78.99	5.70	3.66	0.14	38.84	29.13	2.70	2.13
Baja	0.96	6.19	20.60	76.74	6.68	4.43	0.17	48.84	30.93	4.26	3.07
Media	0.84	6.01	34.52	70.89	9.04	4.78	0.28	50.04	18.54	3.08	2.80
Promedio	0.87	6.05	22.18	75.54	7.14	4.29	0.20	45.91	26.20	3.35	2.67
dev. Estandar	0.08	0.12	11.63	4.18	1.72	0.57	0.07	6.15	6.69	0.81	0.48

### Anexo 8 Análisis de correlación de sedimento – agua.

	R.A.S.	Na-agua	Ca-agua	Mg-agua	K-agua	bicarbonato	Cloruros	Alcalinidad	C.E-agua	pH-agua	Cu-agua	Zn-agua	Cd-agua	Ni-agua
<b>Ca-sedimento</b>	0.53	0.57	0.28	0.26	0.53	0.46	0.46	0.31	0.06	0.24	0.11	-0.18	0.00	0.00
<b>Mg-sedimento</b>	-0.31	-0.07	0.35	0.27	-0.12	0.19	-0.08	0.36	0.47	0.09	0.02	-0.10	0.00	0.00
<b>K-sedimento</b>	-0.21	-0.09	0.07	0.06	0.00	-0.04	0.03	0.12	-0.13	-0.26	0.23	0.39	0.00	0.00
<b>Cu-sedimento</b>	0.06	0.36	<b>0.64</b>	<b>0.64</b>	0.35	0.53	0.38	0.53	0.32	-0.07	0.18	0.31	0.00	0.00
<b>Zn-sedimento</b>	0.28	0.43	0.41	0.43	0.40	0.47	0.36	0.44	0.17	0.19	0.18	0.05	0.00	0.00
<b>Cd-sedimento</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	<b>0.99</b>	<b>0.99</b>
<b>Ni-sedimento</b>	-0.03	0.18	0.50	0.42	0.23	0.39	0.13	0.50	0.22	0.08	-0.29	0.39	0.00	0.00
<b>Pb-sedimento</b>	-0.16	-0.25	-0.23	-0.30	-0.15	-0.24	-0.29	-0.18	-0.19	0.06	0.08	0.09	0.00	0.00

## Anexo 9 Medida de resumen de metales pesados por localidad

Localidad	Cu-total	Zn-total	Cd-total	Ni-total	Pb-total
	<i>mg/kg</i>				
Anón	86.18	178.85	0.00	37.89	0.28
Anón 1	105.25	169.25	0.50	51.71	0.61
Anón 2	121.35	134.95	0.00	18.24	2.28
Anón 3	128.80	174.63	0.00	28.02	2.73
Anón 4	109.53	197.35	0.00	18.05	2.43
Cañazas	68.39	125.67	0.00	48.19	6.49
Cañazas 1	67.92	101.81	0.00	19.34	8.32
Cañazas 2	55.06	98.97	0.00	12.22	8.20
Capellanía	59.03	149.23	0.00	11.54	8.63
Capellania 1	64.78	128.85	0.00	18.75	5.03
Capellania 2	58.99	199.80	0.00	5.46	5.88
Divisa	53.10	118.44	0.00	18.13	4.92
El Arrozal	26.39	73.78	0.00	9.33	0.04
El Arrozal 1	14.36	45.10	0.00	3.48	2.37
El Arrozal 2	15.05	45.64	0.00	4.76	1.56
El Bajo	66.53	145.11	0.00	20.65	9.91
El Cañal	56.12	77.98	0.00	25.18	6.74
El Mangal	67.16	85.29	0.00	29.35	5.87
El puente	48.34	124.78	0.00	8.00	12.28
El Rincón	8.75	17.24	0.00	13.79	7.23
El torno	46.49	73.87	0.00	12.41	5.61
El Torno 1	60.32	82.99	0.00	19.61	4.41
El Torno 2	64.66	86.64	0.00	21.43	4.17
El Torno 3	62.85	86.43	0.00	13.21	3.27
El Torno 4	58.07	94.22	0.00	17.11	2.17
Gatú	45.17	114.24	0.00	13.80	4.58
Gatú 1	34.22	101.28	0.00	22.84	3.17
Gatú 2	36.05	88.39	0.00	15.66	3.47
Guía abajos	68.27	97.75	0.11	15.31	2.58
Guias Arriba	61.21	93.47	0.00	33.28	1.50
Jaguito	102.94	169.48	0.00	17.40	5.79
La Botijuela	57.46	78.40	0.00	66.89	1.33
La cebolla	63.95	143.58	0.00	17.24	4.02
La Cienega	68.85	118.61	0.00	9.35	6.83
La corocita	60.74	130.30	0.00	22.64	3.68
La Raya	50.58	193.85	0.00	8.60	6.24
La raya 1	54.24	178.00	0.00	10.34	7.55
La raya 2	64.89	140.30	0.00	13.55	4.71
La Yeguada	8.00	28.86	0.00	11.41	5.88
Las Tetas	114.67	155.28	0.00	45.16	3.18
Lecheria	30.52	69.14	0.00	20.14	7.16
Los limones 1	64.55	60.48	0.00	10.17	7.49
Los limones 2	67.68	79.06	0.00	21.29	5.77
Santa Fe	100.94	102.60	0.00	21.60	6.16
Santa María	90.03	118.40	0.00	76.18	6.97
Santa María 1	13.27	22.86	0.00	2.10	7.05
Santa María 2	18.24	35.89	0.00	0.64	6.12
Santa Rita	20.02	64.48	0.00	7.29	3.31
Promedio	59.79	108.37	0.01	20.18	4.92
desv. Estandar	29.39	47.14	0.07	15.47	2.61

**Anexo 10** Resumen de metales pesados por cuenca alta, media y baja.

Cuenca	Cu-total	Zn-total	Cd-total	Ni-total	Pb-total
	<i>mg/kg</i>				
Alta	63.64	100.19	0.00	17.94	5.49
Baja	58.29	102.58	0.01	25.25	5.09
Media	60.27	111.04	0.01	15.33	4.71
Promedio	60.73	104.60	0.01	19.51	5.10
desv. Estandar	2.70	5.70	0.01	5.14	0.39

**Anexo 11** Resumen de metales pesados por tipo de muestra.

Muestra	Cu-total	Zn-total	Cd-total	Ni-total	Pb-total
	<i>mg/kg</i>				
sedimento	54.64	108.25	0	23.98	4.62
Suelo	63.22	103.76	0.02	18.2	5.25
Promedio	58.93	106.01	0.01	21.09	4.94
desv. Estand	6.07	3.17	0.01	4.09	0.45

**MEDIDAS RESUMEN METALES PESADOS (COLOR Y TEXTURA)****Anexo 12** Medidas resumen metales pesados según su color.

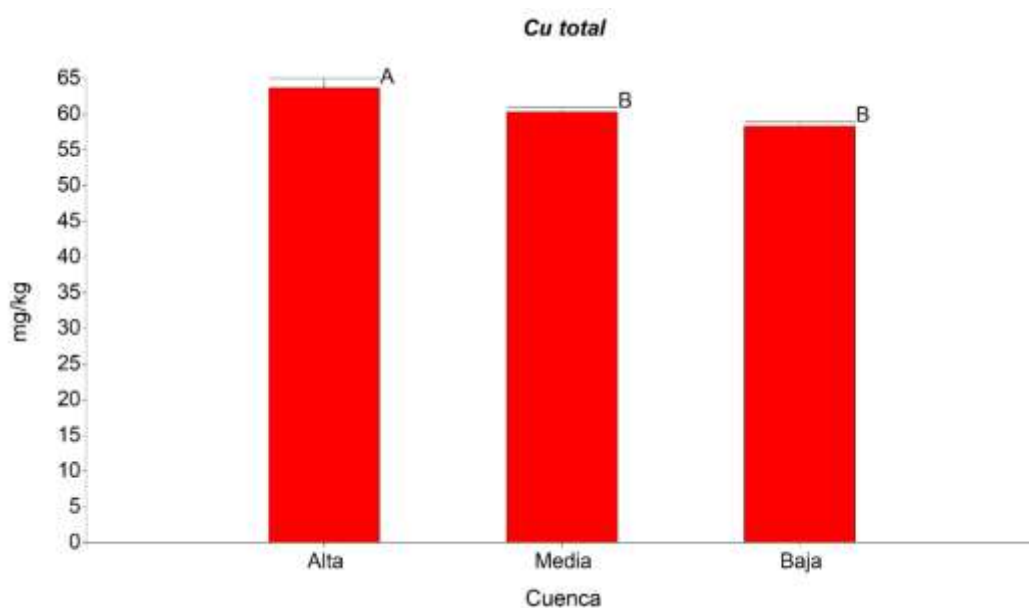
Color	Cu-total	Zn-total	Ni-total	Pb-total
	<i>mg/kg</i>			
Pardo	54.53	93.06	44.25	4.17
Pardo amarillento	61.74	109.96	26.61	5.18
Pardo amarillento oscuro	44.66	76.18	9.56	7.83
Pardo amarillo oscuro	44.85	108.05	11.6	5.27
Pardo grisáceo	71.93	123.99	14.79	3.75
Pardo muy oscuro	53.71	87.61	13.3	3.58
Pardo oscuro	75.08	110.17	18.42	4.19
Pardo pálido	41.74	100.09	11.9	1.97
Media	56.03	101.14	18.80	4.49
desv. Estandart	12.62	15.13	11.59	1.70

### Anexo 13 Medidas de resumen de metales según la textura.

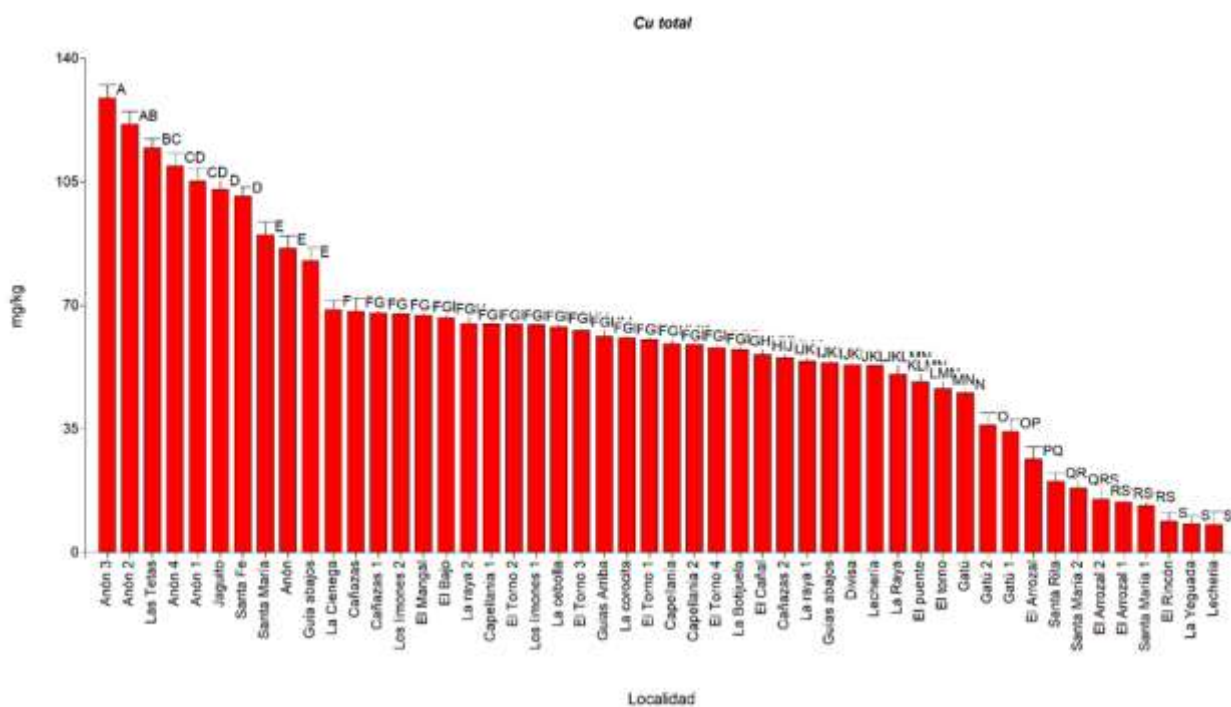
Textura	Cu-total	Zn-total	Ni-total	Pb-total
	mg/kg			
ARCILLOSO	50.64	127.83	11.4	5.72
ARENOSO	76.29	123.31	20.07	4.59
ARENA-FRANCOSA	48.77	100.71	17.66	5.47
ARENA-FRANCOSA	60.32	82.99	19.61	4.41
FRANCO	76.45	130.82	24.35	4.3
FRANCO-ARCILLOSO	54.76	92.94	19.64	3.56
FRANCO-ARCILLO- ARENOSO	49.64	92.86	13.75	5.83
FRANCO-ARENOSO	55.77	91.9	21.54	5.73
FRANCO-LIMO- ARCILLOSO	56.16	99.74	39.34	5.97
Media	58.76	104.79	20.82	5.06
desv. Estandart	10.63	17.74	7.97	0.86

### ANÁLISIS DE VARIANZA EN SUELO

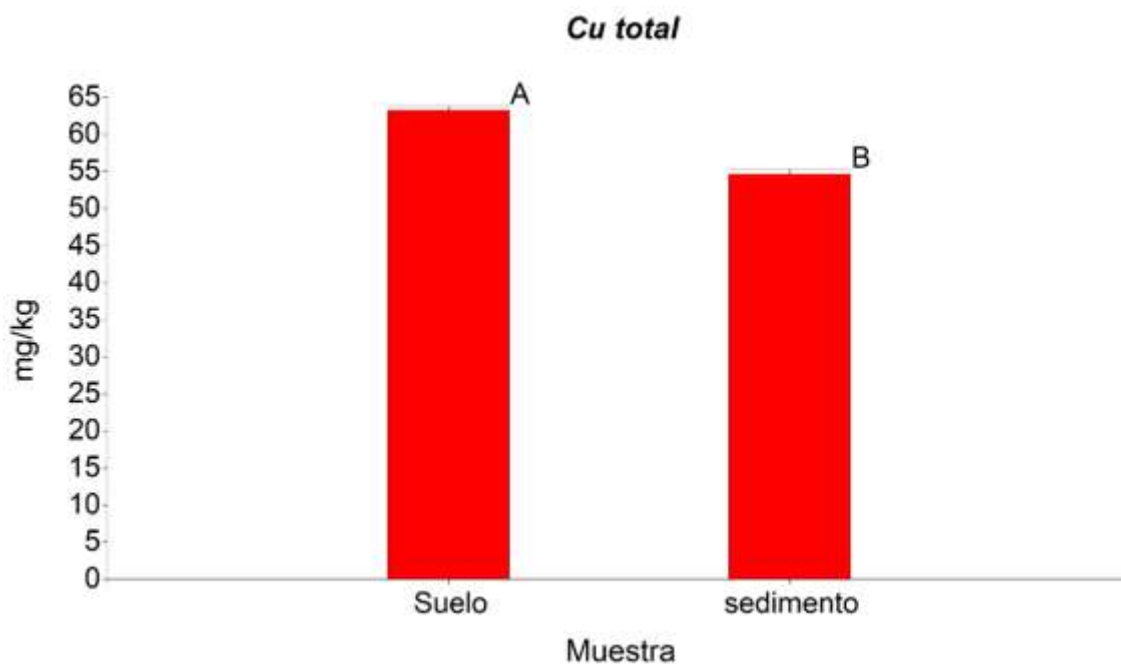
Cu



Anexo 14 Análisis de varianza en Cu(cobre) en la parte alta, media y baja.

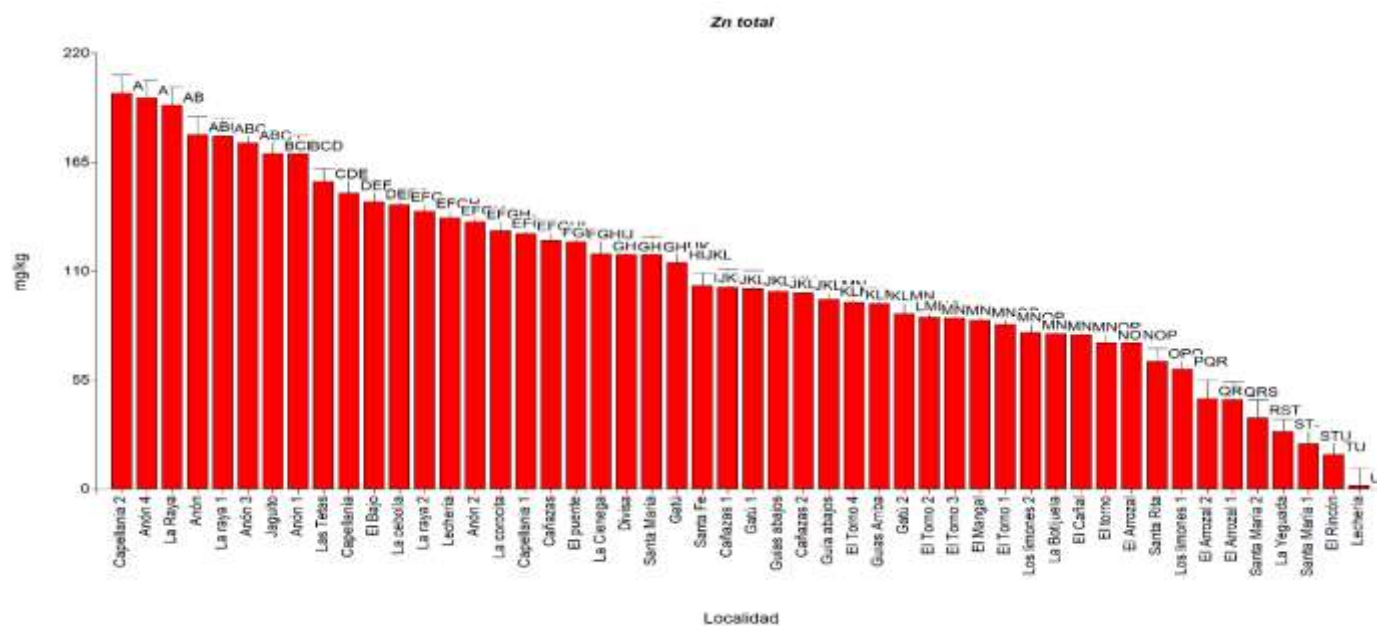


**Anexo 15** Análisis de varianza de Cu(cobre) según la localidad.

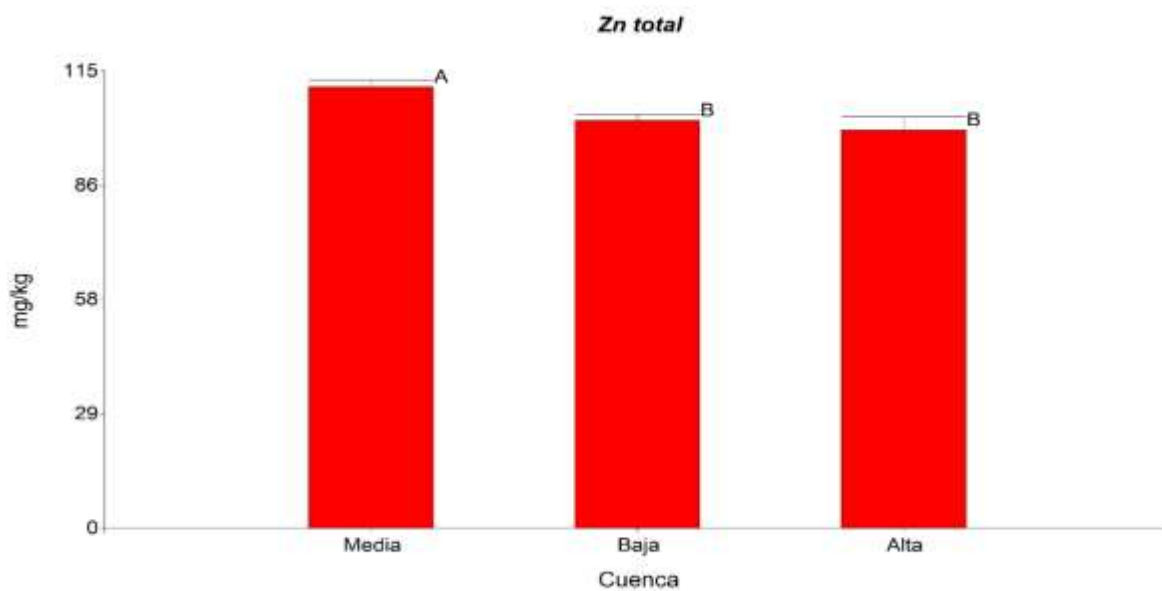


**Anexo 16** Análisis de varianza en Cu(cobre) en suelo y sedimento.

## Zn

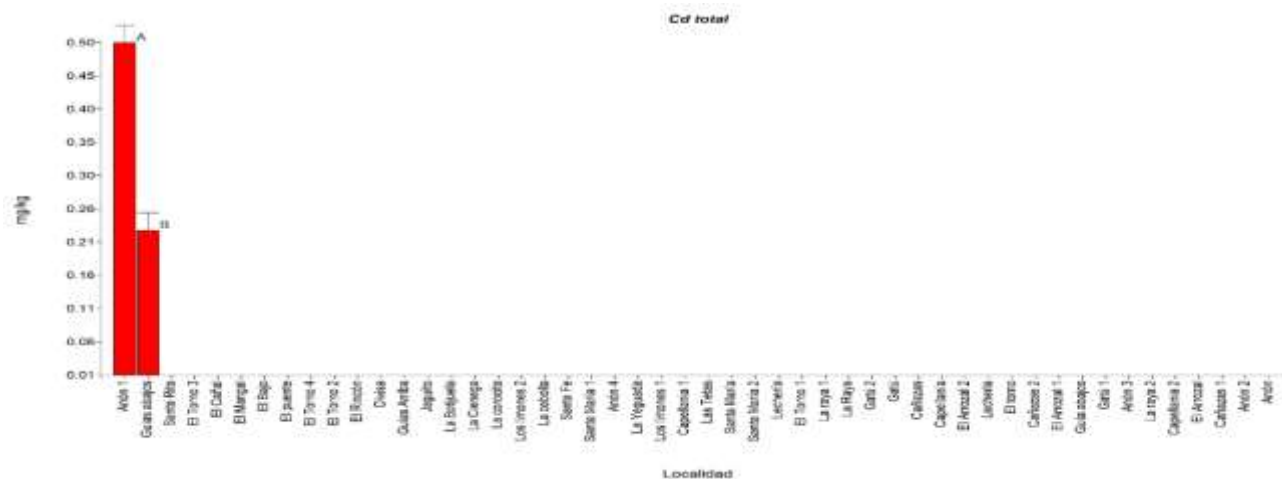


**Anexo 17** Análisis de varianza en Zn(zinc) según la localidad.



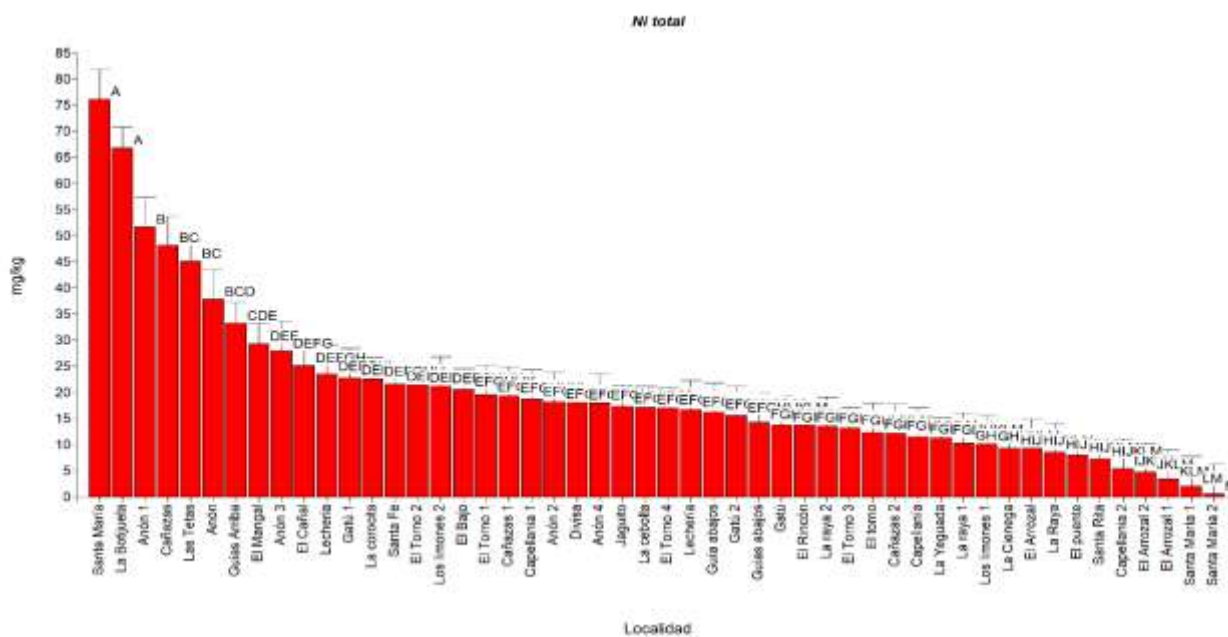
**Anexo 18** Análisis de varianza en Zn(zinc) en la parte alta, media y baja.

**Cd**



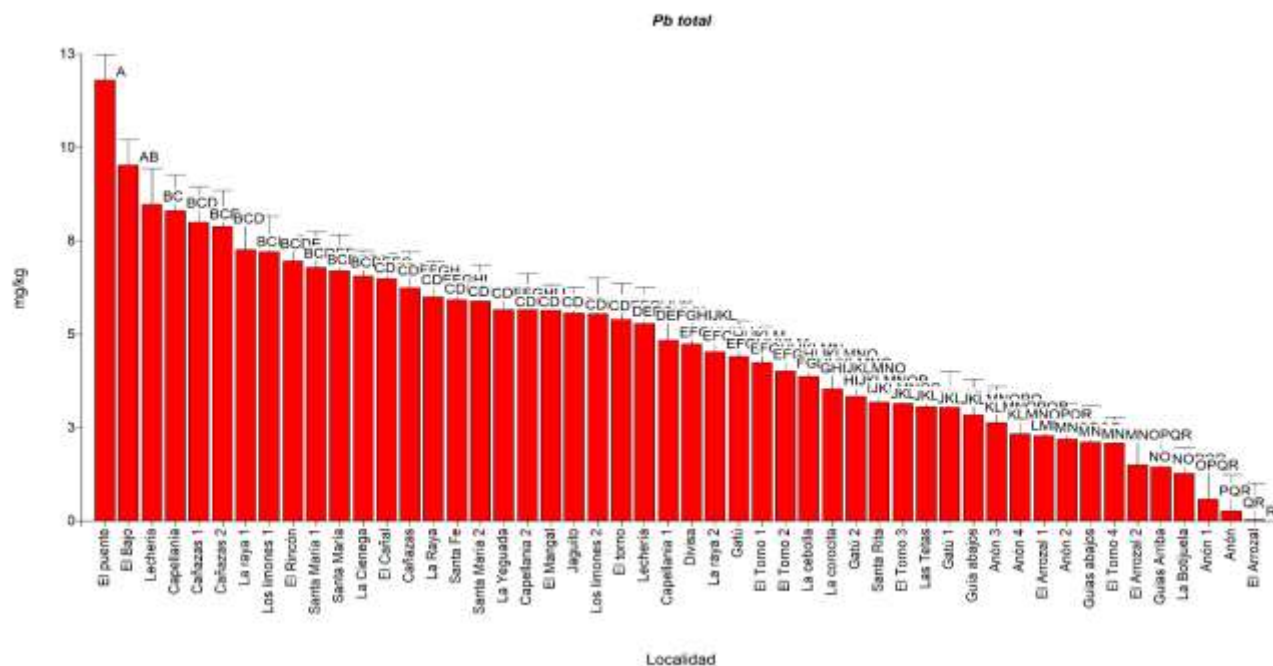
**Anexo 19** Análisis de varianza de Cd(cadmio) según la localidad.

**Ni**

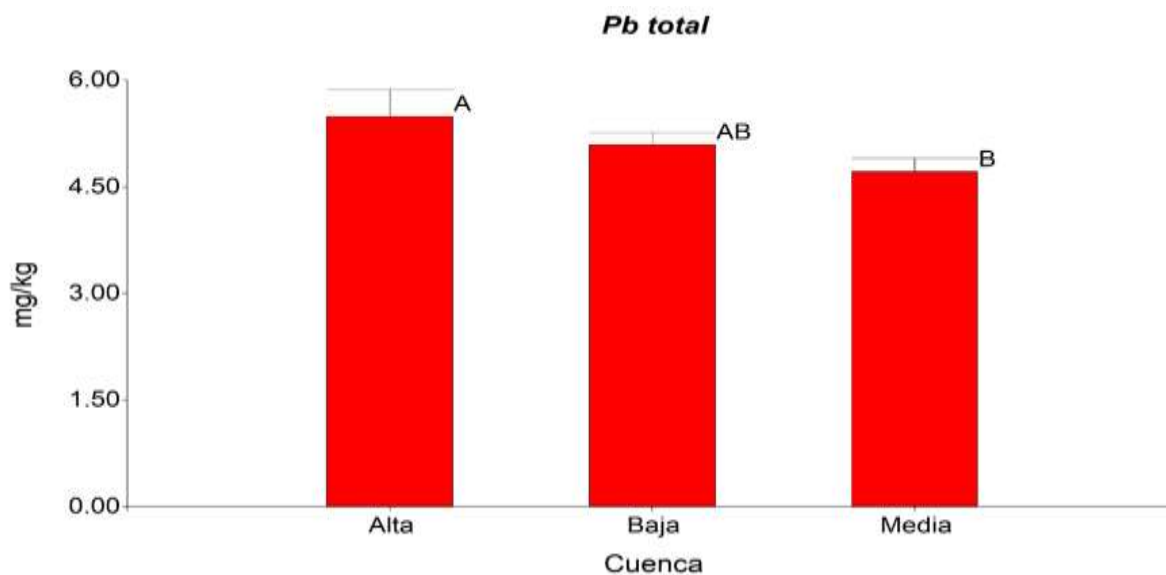


**Anexo 20** Análisis de varianza de Ni(níquel) según la localidad.

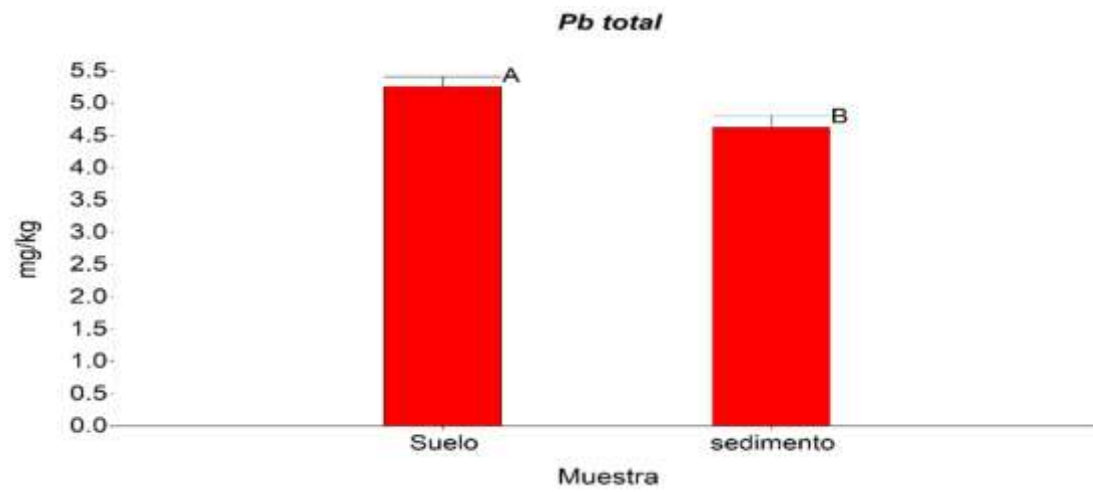
## Pb



**Anexo 21** Análisis de varianza en Pb(plomo) según la localidad.



**Anexo 22** Análisis de varianza en Pb(plomo) en la parte alta media y baja.



**Anexo 23** Análisis de varianza en Pb(plomo) en suelo y sedimento.