

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE QUÍMICA  
CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**“Evaluación de la calidad de distintos ríos en la Zona Norte y Pacífico del país, en cuanto a su contenido de metales pesados en sedimentos”**

Proyecto Final de Graduación para optar por el título de  
Ingeniero Ambiental

Con el grado académico de  
Licenciatura

Eva Lucía Marín Miranda

CARTAGO, Octubre, 2021



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional.



**“Evaluación de la calidad de distintos ríos en la Zona Norte y Pacífico del país, en cuanto a su contenido de metales pesados en sedimentos”**

Informe presentado a la Escuela de Química del Instituto Tecnológico de Costa Rica como requisito parcial para optar por el título de Ingeniero Ambiental con el grado de licenciatura

**Miembros del tribunal**

---

**MSc. Noemy Quirós Bustos**  
**Directora**

---

**Lic. Andrey Caballero Chavarría**  
**Lector 1**

---

**M.Sc. Jacqueline Herrera Núñez**  
**Lector 2**

---

**Dra. ir. Mary Luz Barrios Hernández**  
**Coordinadora COTRAFIG**

---

**MGLA. Ricardo Coy Herrera**  
**Director Escuela de Química**

---

**MSc. Ana Lorena Arias Zúñiga**  
**Coordinadora Carrera de Ingeniería Ambiental**



## **DEDICATORIA**

### ***A Dios***

Por darme el regalo de la vida y la salud para llegar hasta acá.

### ***A mi familia***

Especialmente a mi padre Miguel Marín Morales y mi madre Yolanda Miranda Villegas, así como a mi hermana Naíma Marín Miranda, por ser un apoyo incondicional todos estos años.

### ***A Jose Alejandro Miranda Rosales***

Por ser el mejor compañero, por estar ahí en todo momento, por enseñarme a apreciar las pequeñas cosas en todo lo que hacemos y darme la motivación para seguir adelante a pesar de las circunstancias.

### ***A mis perritos***

A los que están y a los que no, por ser mi compañía, alegría y distracción durante estos 6 años de estudio.



## **AGRADECIMIENTOS**

A mi familia por darme soporte todos estos años lejos de casa porque sin ellos no hubiera sido posible concluir mis estudios.

A la profesora Noemy Quirós, por darme la oportunidad de poder desarrollar este proyecto.

Al Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos (CEQIATEC), así como al Centro de Investigación en Protección Ambiental (CIPA) por su apoyo a lo largo del proceso mediante el préstamo de equipo e instalaciones.

Además, a la Vicerrectoría de Investigación (VIE) por el financiamiento para esta investigación, el cual está bajo el marco del proyecto “Elaboración de un modelo para predecir la vulnerabilidad de metales pesados en agua y sedimentos en distintas regiones del país”.

A Diana Robles y Andrey Caballero por todo el apoyo brindado durante el trabajo de laboratorio de la investigación. A todo el personal del CEQIATEC, en especial a Pamela Zamora y Javier Montero por todo el apoyo y las enseñanzas durante mis 2 años de asistencia en el CEQIATEC. Igualmente, a Giovanni Conejo y Alejandro Córdoba, por su colaboración en los muestreos para esta investigación.

A Brenda Zúñiga Reyes, Alexander González Alvarado y Andrea Solano Herrera, por ser un excelente grupo de trabajo a lo largo de este proceso.

# TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN .....</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>ii</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. <i>Objetivos</i> .....	2
1.1.1. Objetivo general .....	2
1.1.2. Objetivos específicos .....	2
<b>2. REVISIÓN DE LITERATURA .....</b>	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2.1. <i>Recurso hídrico, contaminación y cambio climático</i> .....	3
2.2. <i>Importancia y fuentes de contaminación del suelo y sedimento</i> .....	3
2.3. <i>Metales Pesados y los sedimentos</i> .....	4
2.3.1. Definición y consecuencias .....	4
2.3.2. Posibles fuentes de contaminación .....	5
2.3.3. Transporte de los metales en sedimento y sus interacciones con el agua .....	6
2.4. <i>Índices de medición</i> .....	7
2.4.1. Lineamientos de calidad de sedimentos (SQG) .....	8
2.4.2. Factor de contaminación (CF) .....	8
2.4.3. Grado de contaminación (CD).....	9
2.4.4. Factor de enriquecimiento (EF) .....	9
2.5. <i>Zona de estudio</i> .....	10
2.5.1. Río Arenal .....	10
2.5.2. Río Tres Amigos .....	11
2.5.3. Río Toro .....	11
2.5.4. Río Tempisque .....	12
2.6. <i>Estudios previos en el país</i> .....	13
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>14</b>
3.1. <i>Sitio de estudio</i> .....	15
3.1.1. Río Arenal .....	15
3.1.2. Río Tres Amigos .....	16
3.1.3. Río Toro .....	16
3.1.4. Río Tempisque .....	17
3.2. <i>Recolección de las muestras y su caracterización</i> .....	18

3.2.1.	Metales pesados estudiados y su criterio de selección .....	18
3.2.2.	Caracterización fisicoquímica de los sedimentos.....	19
3.3.	<i>Determinación de la concentración de metales pesados en los sedimentos</i> .....	19
3.3.1.	Tratamiento previo .....	19
3.3.2.	Digestión de las muestras .....	19
3.3.3.	Análisis de metales pesados.....	20
3.3.4.	Cálculo de la concentración.....	21
3.4.	<i>Evaluación de la contaminación</i> .....	22
3.4.1.	Lineamientos de calidad de sedimentos.....	22
3.4.2.	Factor de contaminación y grado de contaminación .....	23
3.4.3.	Factor de enriquecimiento .....	24
3.5.	<i>Elaboración de mapas de uso de suelo</i> .....	24
3.6.	<i>Análisis estadístico</i> .....	24
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>24</b>
4.1.	<i>Caracterización y análisis de metales pesados en los sedimentos</i> .....	24
4.1.1.	Propiedades fisicoquímicas del sedimento.....	24
4.1.2.	Concentraciones de metales pesados .....	26
4.2.	<i>Análisis de los coeficientes de evaluación de sedimentos.</i> .....	27
4.2.1.	Lineamientos de la calidad de los sedimentos .....	28
4.2.2.	Factor de contaminación y grado de contaminación .....	28
4.2.3.	Factor de enriquecimiento .....	32
4.2.4.	Posibles causas de contaminación .....	35
4.3.	<i>Matriz de correlación y Análisis de componentes principales</i> .....	38
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>43</b>
<b>6.</b>	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>44</b>
<b>7.</b>	<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>45</b>
<b>8.</b>	<b>APÉNDICES</b> .....	<b>57</b>
	<i>Apéndice 1: Tabla comparativa entre los valores de fondo propios y los valores de fondo de la NOAA.</i> .....	57
	<i>Apéndice 2: Distribución de las concentraciones para los ríos estudiados.</i> .....	58
	<i>Apéndice 3. Resultados PCA realizados</i> .....	62
<b>9.</b>	<b>ANEXOS</b> .....	<b>64</b>

*Anexo 1. Plaguicidas de venta libre en el país con posible contenido de Metales Pesados. .... 64*

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1.</b> Clasificación de los SQG. ....	8
<b>Figura 3.1.</b> Mapa de la ubicación de los sitios de muestreo para el río Arenal. ....	15
<b>Figura 3.2.</b> Mapa de la ubicación de los sitios de muestreo para el río Tres Amigos. ....	16
<b>Figura 3.3.</b> Mapa de la ubicación del sitio de muestreo para el río Toro. ....	17
<b>Figura 3.4.</b> Mapa de la ubicación del sitio de muestreo para el río Tempisque. ....	18
<b>Figura 3.5.</b> Horno microondas marca CEM modelo Mars 6. ....	20
<b>Figura 3.6.</b> Espectrómetro de absorción atómica marca Perkin-Elmer modelo AAnalyst-800... ..	20
<b>Figura 4.1.</b> Concentraciones de MP (sin Fe) en los ríos Arenal, Tres Amigos, Toro y Tempisque .....	27
<b>Figura 4.2.</b> CF de MP en sedimentos del río Arenal utilizando sus valores de fondo propios y los valores de fondo de la NOAA.....	29
<b>Figura 4.3.</b> CF de MP en sedimentos del río Tres Amigos utilizando sus valores de fondo propios y los valores de fondo de la NOAA.....	30
<b>Figura 4.4.</b> CF de MP en sedimentos del río Toro utilizando sus valores de fondo propios y los valores de fondo de la NOAA.....	30
<b>Figura 4.5.</b> CF de MP en sedimentos del río Tempisque utilizando sus valores de fondo propios y los valores de fondo de la NOAA.....	31
<b>Figura 4.6.</b> EF de MP en sedimentos del río Arenal utilizando sus valores de fondo propios y los valores de fondo de la NOAA.....	33
<b>Figura 4.7.</b> EF de MP en sedimentos del río Tres Amigos utilizando sus valores de fondo propios y los valores de fondo de la NOAA.....	33
<b>Figura 4.8.</b> EF de MP en sedimentos del río Toro utilizando sus valores de fondo propios y los valores de fondo de la NOAA.....	34
<b>Figura 4.9.</b> EF de MP en sedimentos del río Tempisque utilizando sus valores de fondo propios y los valores de fondo de la NOAA.....	34
<b>Figura 4.10.</b> Uso de suelo para el río Arenal. ....	35
<b>Figura 4.11.</b> Uso de suelo para el río Tres Amigos. ....	36
<b>Figura 4.12.</b> Uso de suelo para el río Toro. ....	37
<b>Figura 4.13.</b> Uso de suelo para el río Tempisque. ....	38
<b>Figura 4.14.</b> Círculo de correlaciones entre variables realizado en Rstudio.....	40

<b>Figura 8.1.</b> Distribución de las concentraciones de MP a lo largo de los muestreos para el Río Arenal.....	58
<b>Figura 8.2.</b> Distribución de las concentraciones de MP a lo largo de los muestreos para el Río Tres Amigos.....	59
<b>Figura 8.3.</b> Distribución de las concentraciones de MP a lo largo de los muestreos para el Río Tres Amigos.....	60
<b>Figura 8.4.</b> Distribución de las concentraciones de MP a lo largo de los muestreos para el Río Tempisque.....	61
<b>Figura 8.5.</b> Círculo de correlaciones para la zona norte. ....	62
<b>Figura 8.6.</b> Círculo de correlaciones para el pacífico norte. ....	63

### LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 2.1.</b> Criterio de clasificación de EF de los MP. ....	9
<b>Tabla 3.1.</b> Métodos utilizados para los parámetros fisicoquímicos de los sedimentos.....	19
<b>Tabla 3.2.</b> Límites de detección para la técnica utilizada. ....	21
<b>Tabla 3.3.</b> Valores de fondo para inorgánicos en sedimentos.....	22
<b>Tabla 3.4.</b> Comparación entre los SQG, PEC y TEC, ambos valores expresados en mg/kg.....	23
<b>Tabla 4.1.</b> Resultados de textura, pH y porcentaje de materia orgánica (%MO) para los diferentes puntos de muestreo. ....	25
<b>Tabla 4.2.</b> Porcentaje de muestras de sedimento cuya concentración de MP (mg/kg) que se encuentra en los diferentes rangos de las SQG.....	28
<b>Tabla 4.3.</b> CD para los sedimentos de las diferentes cuencas analizadas utilizando sus valores de fondo propios y los valores de fondo de la NOAA.....	32
<b>Tabla 4.4.</b> Coeficiente de correlación de Pearson entre MP para los 4 ríos analizados.....	39
<b>Tabla 4.5.</b> Matriz de componentes rotados para parámetros estudiados en los sedimentos. ....	40
<b>Tabla 4.6.</b> Coeficiente de correlación de Pearson entre MP en muestras de los ríos de la zona norte. ....	41
<b>Tabla 4.7.</b> Coeficiente de correlación de Pearson entre MP en muestras del pacifico norte. ....	42
<b>Tabla 8.1.</b> Razones entre los valores de fondo propios y los de la NOAA.....	57
<b>Tabla 8.2.</b> Matriz de componentes rotados para parámetros estudiados en los sedimentos de la zona norte.....	62

<b>Tabla 8.3.</b> Matriz de componentes rotados para parámetros estudiados en los sedimentos del pacífico norte. ....	63
<b>Tabla 9.1.</b> Metales encontrados a nivel internacional en diferentes plaguicidas de venta libre en Costa Rica. ....	64

### **LISTA DE ECUACIONES**

Ecuación 3.1. Concentración de metales en mg/L.....	21
Ecuación 3.2. Concentración del metal en mg/kg.....	22
Ecuación 3.3. Factor de contaminación .....	23
Ecuación 3.4. Grado de contaminación. ....	23
Ecuación 3.5. Factor de enriquecimiento.....	24

## LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos	USEPA
Análisis de Componentes Principales	PCA
Arsénico	As
Cadmio	Cd
Centro de Investigación y Servicios Químicos y Microbiológicos	CEQIATEC
Centro de Investigaciones Agronómicas	CIA
Cobre	Cu
Cromo	Cr
Factor de Contaminación	CF
Factor de Enriquecimiento	EF
Grado de Contaminación	CD
Hierro	Fe
Índices de Morbilidad Estandarizada	IME
Insuficiencia Renal Crónica	IRC
Lineamientos de Calidad de los Sedimentos	SQG
Materia Orgánica	MO
Mercurio	Hg
Metales Pesados	MP
Níquel	Ni
Plomo	Pb
Potencial de Hidrógeno	pH
Probable Effect Concentration o Concentración de efecto probable	PEC
Threshold Effect Concentration o concentración de efecto umbral	TEC
Universidad de Costa Rica	UCR
Zinc	Zn

## RESUMEN

Los metales pesados (MP) son contaminantes peligrosos por su toxicidad, persistencia y su capacidad de bioacumulación y biomagnificación, ya que no pueden ser asimilados o transformados en el ambiente. La contaminación por MP en cuerpos de agua superficial proviene de procesos naturales como el vulcanismo y de fuentes antropogénicas tal es el caso del uso de plaguicidas en la agricultura, minería, aguas residuales industriales, contaminación difusa, entre otros. En este estudio, se realizó una evaluación de la calidad fisicoquímica de las subcuencas de los ríos Arenal, Tres Amigos, Toro y Tempisque evaluando su contenido de MP mediante el análisis de muestras de sedimento provenientes de su cauce. Se realizó el cálculo de los lineamientos para la calidad de sedimentos (SQG), factor de contaminación (CF), grado de contaminación (CD) y factor de enriquecimiento (EF). El orden de concentración detectada en mg/kg para los MP fue Fe>Cu>Cr>Ni>As>Pb>Hg para todos los ríos en estudio. La mayoría de los ríos presentan contaminación moderada considerando el CF, mientras que el CD indica que los ríos se encuentran con baja a considerable contaminación. Por otro lado, los ríos presentan valores de EF bajos indicando un nulo enriquecimiento. Algunas posibles causas de la contaminación por MP encontradas son: la represa Arenal, los plaguicidas utilizados en los cultivos de la zona y fuentes naturales como el vulcanismo. Los coeficientes de Pearson indicaron fuentes similares para Cr y Ni de manera general y en ambas vertientes, el río Tempisque presenta una cantidad alta de correlaciones indicando una fuente en común para la mayoría de los metales analizados.

**Palabras clave:** Metales Pesados, Factor de Contaminación, Factor de Enriquecimiento, río Arenal, río Tres Amigos, río Toro, río Tempisque, recurso hídrico, sedimento

## **ABSTRACT**

Heavy metals (HM) are dangerous pollutants due to their toxicity, persistence, and their ability to bioaccumulate and bio magnify since they cannot be assimilated or transformed in the environment. Pollution by HM in surface water bodies comes from natural processes such as volcanism and anthropogenic sources, such is the case of the use of pesticides in agriculture, mining, industrial wastewater, diffuse pollution, among others. In this study, an evaluation of the physicochemical quality of the sub-basins of the Arenal, Tres Amigos, Toro and Tempisque rivers was carried out, evaluating their PM content by analyzing sediment samples from their shores. The calculation of the guidelines for sediment quality (SQG), contamination factor (CF), contamination degree (CD) and enrichment factor (EF) was performed. The order of concentration detected in mg / kg for the HM was Fe > Cu > Cr > Ni > As > Pb > Hg for all the rivers under study. Most of the rivers present moderate contamination considering the CF, while the CD indicates that the rivers are with low to considerable contamination. On the other hand, rivers present low EF values indicating no enrichment. Some possible causes of PM contamination found are the Arenal dam, pesticides used on crops in the area and natural sources such as volcanism. Pearson's coefficients indicated similar sources for Cr and Ni in a general way and in both slopes, the Tempisque River presents a high number of correlations indicating a source in common for most of the metals analyzed.

**Key words:** Heavy Metals, Contamination Factor, Enrichment Factor, Arenal river, Tres Amigos River, Toro River, Tempisque river

## 1. INTRODUCCIÓN

Los ríos son el recurso de agua dulce más importante del mundo y suministran agua para muchos propósitos (Bhaskar et al., 2020). En muchas partes del mundo, existe una creciente preocupación por el estado ecológico y la salud de los ríos y su capacidad para proporcionar diferentes servicios ecosistémicos (Meynell et al., 2021).

El uso de suelo en las actividades humanas tales como la agricultura y la industria, ocasionan la contaminación de las aguas de los ríos aledaños y sus respectivos sedimentos. Uno de los contaminantes más dañinos para el ambiente y el ser humano son los metales pesados (MP), los cuales a pesar de estar naturalmente presentes en nuestro ambiente y ser esenciales en pequeñas cantidades para los microorganismos, son tóxicos, no biodegradables y bioacumulables, lo que causa impactos negativos hacia el ambiente y la vida humana (Ibrahim et al., 2019).

Muchos de estos MP son arrastrados por las corrientes de los ríos y quedan retenidos en los sedimentos a la orilla del cauce del río, también se pueden redissolver en el agua por procesos químicos, por ejemplo, la reacción de oxidación-reducción, la absorción de cationes en el complejo de intercambio, entre otros (Jing et al., 2018). Xie et al., (2018) indica que los MP filtran fácilmente a las capas inferiores del suelo fácilmente en el suelo, por lo que se concentran principalmente en la superficie. Haciendo que una muestra de sedimento sea mucho más representativa de lo que ha sucedido en un lapso sin la necesidad de realizar un muestreo pasivo, que aumentaría el costo del estudio.

El contenido de metales en los suelos es el resultado de las actividades humanas y los procesos naturales de ahí la importancia de la utilización de índices que permiten determinar la fuente de contaminación. La entrada de MP en suelos utilizados en la agricultura proviene principalmente de prácticas agrícolas, deposición atmosférica e industrias locales. Las fuentes típicas de metales en niveles de traza son provenientes de la agricultura incluyen fungicidas y pesticidas que contienen Cobre (Cu), Zinc (Zn), Plomo (Pb) y Arsénico (As), especialmente en el campo de producción de frutas (Mao et al., 2020).

La contaminación por MP se ha evaluado mediante índices que utilizan SQG basada en la probabilidad toxicológica, o índices basados en la concentración de fondo de MP en sedimentos locales, como el EF, CF, CD entre otros (Song & Choi, 2017).

El estudio de los MP en sedimentos en nuestro país es casi inexistente ya que no se tienen estudios previos relacionados a índices de calidad de sustancias inorgánicas en ríos, y únicamente

se realizan índices de calidad en cuanto a contaminación orgánica *e.g.* demanda bioquímica de oxígeno, sólidos solubles y sedimentables, entre otros. Debido a esto las subcuencas de los ríos Arenal, Toro y Tres amigos, además de la cuenca del río Tempisque serán analizadas a fondo, pues están situadas sobre una zona principalmente agrícola y en las que ya estudios del Centro de Investigaciones en Contaminación Ambiental, de la UCR han encontrado rastros de pesticidas en sus aguas (Córdoba, 2018). Es por ello que el presente trabajo pretende evaluar la calidad de distintos ríos en la zona norte y pacifico norte del país en cuanto a su contenido de metales pesados

## **1.1. Objetivos**

### ***1.1.1. Objetivo general***

Evaluar el estado de calidad de distintos ríos en la Zona Norte y Pacífico Norte del país en cuanto a su contenido de metales pesados en sedimentos.

### ***1.1.2. Objetivos específicos***

1. Caracterizar distintos ríos de la Zona Norte y Pacífico Norte del país, mediante el contenido de metales pesados en muestras de sedimento.
2. Aplicar índices y coeficientes de calidad de contaminación de metales pesados en sedimentos de ríos de la zona norte y pacifico del país
3. Correlacionar las concentraciones de los metales pesados en sedimentos para cada vertiente analizada.

## **2. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1. Recurso hídrico, contaminación y cambio climático**

Los ríos son un componente importante del ciclo global del agua, ya que conectan los dos ecosistemas principales de la tierra y el mar y proporcionan un enlace crítico en el ciclo biogeoquímico (Liu et al., 2020). Mukate et al., (2020) menciona que el riesgo de contaminación del agua subterránea está aumentando debido a la presión de la población, la urbanización; prácticas modernas de uso de la tierra, incluida la agricultura y la industrialización creciente y el cambio climático. También puede haber una falta de suministro de agua dulce en áreas densamente pobladas y, con el cambio climático y el aumento del nivel del mar proyectados, se espera que los problemas aumenten en las próximas décadas (Snousy et al., 2020). Otras fuentes de contaminación para los ambientes acuáticos (e.g. Lagos, ríos, embalses y humedales) son el transporte de aguas residuales no tratadas o tratadas inadecuadamente de fuentes domésticas, industriales y agrícolas, esto especialmente en los países en desarrollo (Huang et al., 2020).

La contaminación del agua tiene múltiples influencias en la salud, según la Organización Mundial de la Salud las enfermedades relacionadas con la contaminación hídrica constituyen una carga importante para la salud humana, por lo que su respectiva evaluación es una de las principales prioridades para evitar cualquier problema de salud (Abdeldayem, 2020). Hasta la fecha la literatura ha demostrado que la exposición a MP a través del consumo de agua potable se ha vuelto un tema de atención. En particular, las personas en comunidades pequeñas y rurales son las más vulnerables (Chowdhury et al., 2016).

### **2.2. Importancia y fuentes de contaminación del suelo y sedimento**

El suelo se considera un recurso no renovable, esto se debe a su lenta formación y compleja y costosa recuperación, el monitoreo de su contaminación es de gran importancia (Guan et al., 2019). Sungur et al., (2015) indica que, de manera general, los suelos están más expuestos a la contaminación por MP debido a que son el mayor cuerpo receptor entre los componentes del ecosistema. Lo que los convierte en depósitos de estos contaminantes, además de desempeñar un importante papel en la movilización de los contaminantes en los sistemas acuáticos y en las interacciones agua-sedimento (Navarrete-Rodríguez et al., 2020).

Estos metales se encuentran en el suelo de manera natural, así como por actividades antropogénicas (Jeon, 2021). El estudio de la contaminación por MP es complejo ya que la concentración de los metales no depende totalmente de los factores antropogénicos (Mi Kim et al., 2018), aunque los aportes de metales de origen antropogénico al suelo son mucho mayores que la contribución de metales de fuentes naturales (Marrugo-Negrete et al., 2017). Los sedimentos son la parte superior del suelo y en estudios previos, realizado por Zhang et al., (2016) se señala que cerca del 85% de los MP eventualmente será acumulado en los sedimentos superficiales. Dado lo anterior resulta importante incluir los sedimentos en los programas de monitoreo ambiental, ya que los datos de sedimentos reflejan una mayor estabilidad en el tiempo en comparación con el agua (Ibrahim et al., 2019).

### **2.3. Metales Pesados y los sedimentos**

#### ***2.3.1. Definición y consecuencias***

Los MP se definen como aquellos metales que presentan una masa atómica mayor a 20 y una densidad elemental mayor a 5 g/cm<sup>3</sup> (Ali & Khan, 2018). Incluye los metales de transición que son tóxicos y no pueden biodegradarse, como el caso del Plomo (Pb), el Cadmio (Cd), Zinc (Zn), el Níquel (Ni), Cobre (Cu), el Cromo (Cr), el Mercurio (Hg) (Jing et al., 2018) y el Arsénico (As), esto debido a las similitudes entre sus propiedades químicas y comportamiento ambiental (Chen et al., 2015).

Kumar et al., (2019) menciona que los MP son componentes clave para mantener la salud del suelo, no obstante, incluso un pequeño aumento en su concentración por encima de ciertos límites permisibles puede afectar negativamente la hidrología, biota y química de un suelo. Debido a esto la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (USEPA, por sus iniciales en inglés) tiene al As, Pb, Hg y Cd en la parte superior de la lista de las 20 sustancias más peligrosas en el 2001 (Lee et al., 2019).

Dong et al., (2020) indica que el riesgo asociado a los MP ha llamado la atención debido a su no degradación, fácil acumulación y tendencia a traducirse en formas orgánicas más tóxicas. Wang et al., (2018) señala que las moléculas de metal podrían escapar de los mecanismos de control del organismo y unirse a componentes celulares específicos, por lo tanto, representan

efectos tóxicos e incluso letales. A nivel mundial, los MP han sido una grave amenaza para la salud humana y la integridad del ecosistema (Abdeldayem, 2020).

Por ejemplo, se tiene el caso del Hg, el cual se encuentra en tres estados redox y puede existir en varias formas químicas diferentes. Todas estas formas tienen diferentes propiedades químicas y son potencialmente tóxicas. Los compuestos orgánicos de Hg son de especial preocupación debido a su alta toxicidad. (Chakraborty et al., 2015). Boluda et al., (2011) indica que la presencia de MP en los sedimentos disminuye la cantidad de organismos vivos que viven en él, altera su población y hace que los ecosistemas sean más frágiles.

La acumulación de metales en el suelo y sedimentos puede ser permanente y, aun cuando la contaminación sea moderada representa un peligro para la salud pública, debido a que estos elementos pueden llegar al manto freático o ser absorbidos por las plantas, afectando consecuentemente la calidad y seguridad de los alimentos (Castro-González et al., 2019). Los metales se pueden distribuir a través del ciclo geoquímico natural en un ecosistema e ingresar a los cuerpos humanos a través de la cadena alimentaria, el sistema respiratorio y el contacto dérmico (Li et al., 2016). Continuando con el Hg, el más claro ejemplo es la enfermedad de Minamata, la cual es causada por el consumo de pescado contaminado con Hg, y se considera uno de los principales desastres químicos ambientales del siglo XX (Ali & Khan, 2018). Es por lo que se creó el convenio de Minamata, que busca “proteger la salud humana y el medio ambiente de las emisiones antropogénicas y las liberaciones de mercurio y compuestos de mercurio” (Convenio de Minamata Sobre El Mercurio, 2019). Para esto las partes acordaron controlar y reducir (cuando sea posible) las emisiones de Hg y compuestos de Hg. (Adlard et al., 2021). En el caso de nuestro país se ha encontrado As tanto en aguas como en sedimentos de la zona norte específicamente en Cañas, Aguas Zarcas y Los Chiles (Herrera-Murillo et al., 2019)(Castillo-Muñoz, 2019).

### ***2.3.2. Posibles fuentes de contaminación***

Las concentraciones totales de MP en los sedimentos también están directamente relacionadas con el material primario del suelo. Las fuentes naturales incluyen erupciones volcánicas, incendios forestales, erosión de rocas minerales y erosión del suelo (Kumar et al., 2019). Sin embargo, la movilidad de los metales de origen humano es mayor que la de las fuentes pedogénicas y litosféricas (Sungur et al., 2015). Las fuentes antropogénicas incluyen fundición, eliminación de desechos en vertederos, galvanoplastia, aplicación de fertilizantes, uso de bio-

sólidos o lodos de depuradora, petroquímicos, industriales, descargas y deposición atmosférica fertilizantes y pesticidas, minería, combustión de carbón, transporte, industrias metalíferas (Ren et al., 2019). También se pueden relacionar con la producción agrícola e industrial local, industria naviera, deposición atmosférica (Bing et al., 2016) producción de energía, la quema de combustibles y la eliminación de desechos sin tratamiento (Boluda et al., 2011).

Trujillo-González et al., (2016) señalan que fuentes comunes de contaminantes metálicos como Pb, Cu, Cd y Zn incluyen el uso de combustibles tipo gasolina con contenido de Pb, desgaste de neumáticos y pastillas de freno, aceites, lubricantes y grasas; mientras que Cr y Ni provienen del desgaste de piezas metálicas y accesorios de Cr. Las aguas residuales domésticas, industriales y agrícolas mal tratadas contienen altas concentraciones de metales, que a menudo, en muchos países en vías de desarrollo, se descargan al medio ambiente (Chowdhury et al., 2016).

Martínez Mera et al., (2019) también indica que los cambios en el uso de suelo y el uso de agroquímicos en la agricultura convencional han alterado las propiedades fisicoquímicas y han aumentado las concentraciones de algunos contaminantes en suelos agrícolas. Por otro lado, estudios realizados en México en zonas, donde la principal actividad económica es la agricultura, concluyen que el uso de agroquímicos proporciona los Pb y Cd al río de la zona bajo estudio. (Navarrete-Rodríguez et al., 2020). En el caso de nuestro país, se han detectado MP en plaguicidas de uso comercial (Chacón, 2019).

### ***2.3.3. Transporte de los metales en sedimento y sus interacciones con el agua***

De manera general la movilidad de los MP en los sedimentos están controlados por la capacidad de adsorción de este; por lo tanto, los factores como el pH, tipo y propiedades del sedimento no solo afectan los fenómenos de adsorción, sino que también influyen en la capacidad de retención y movilidad de MP en el suelo (Jing et al., 2018).

Los procesos de sorción y sedimentación de los metales dependen principalmente de la composición del sedimento, incluyendo tanto el tamaño y textura del grano como el contenido de materia orgánica (Vargas-González et al., 2017). Algunos estudios han demostrado que las concentraciones más altas de metales están asociadas con partículas de sedimento de grano fino (Chakraborty et al., 2015). Por otro lado, Hou et al., (2019) señala que otros factores para la biodisponibilidad de los MP son el pH del sedimento y el contenido de materia orgánica.

Una vez emitidos a la atmósfera, los MP son transportados y depositados a través de precipitación húmeda y seca en sedimentos donde se pueden acumular y ser almacenados durante

largos períodos (Le Gall et al., 2018). La cantidad de MP depositados en los sedimentos puede depender de la estación climática en la que se encuentre, ya que existe una mayor concentración durante la época seca en comparación con la lluviosa, de esto se puede inferir que los contaminantes se diluyen en dicha época (Montalvo et al., 2014). Los embalses de las presas tienen un impacto en el régimen de flujo, el transporte de sedimentos y la calidad del agua. Esto porque la represa de un río disminuye la velocidad del agua, lo que conduce a un aumento en la deposición de sedimentos suspendidos (Sojka et al., 2018).

Los MP tienden a migrar del agua a los sedimentos donde se acumulan (Dong et al., 2020). De la misma manera, los MP acumulados en los sedimentos pueden liberarse al agua por mecanismos, tales como la alteración del pH y el potencial redox, la re-suspensión de sedimentos y el movimiento de la biota bentónica contaminada (Pejman et al., 2015). Por otro lado, los metales traza acumulados en los sedimentos también pueden liberarse al medio acuático a través de escorrentía (Gao et al., 2019). Según Islam et al., (2015) la biodisponibilidad del metal decrece en el siguiente orden: intercambiable (aniones y cationes), ácido reducido, forma orgánica y forma residual. Cuando las condiciones ambientales como la conductividad eléctrica, el potencial de reducción y la demanda química de oxígeno cambian en el agua o los sedimentos, los MP pueden liberarse de los sedimentos y causar daños continuos al medio ambiente acuático (Z. Zhang et al., 2016). De igual forma los parámetros hidrológicos como el flujo de agua, físicos (temperatura) y químicos (pH) pueden interferir en la solubilidad y/o precipitación de los metales; por lo tanto, estos parámetros son indicadores importantes para determinar el flujo de elementos entre la columna de agua y el sedimento (Santana Costa et al., 2017).

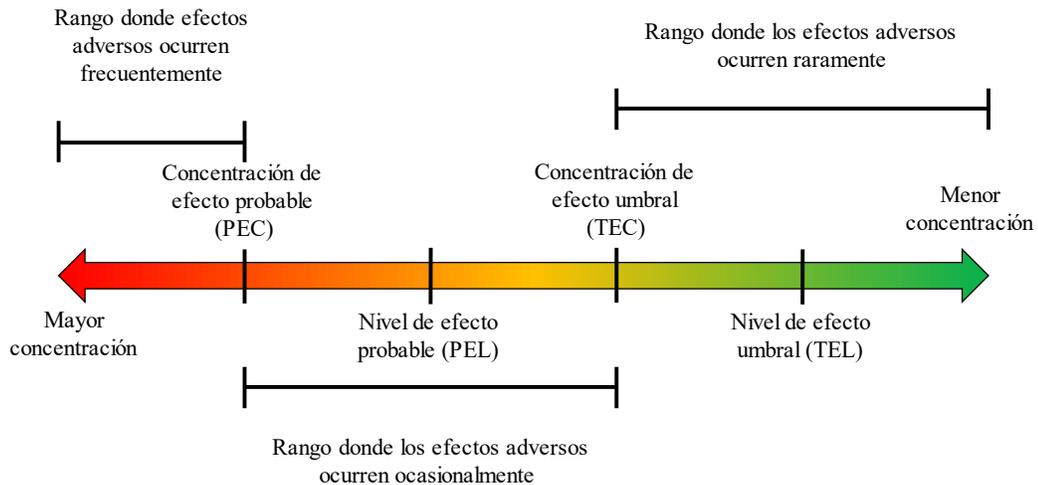
#### **2.4. Índices de medición**

Un medio inapropiado para evaluar la concentración de MP de fuentes naturales y antropogénicas es la determinación directa de la concentración de MP en los sedimentos, ya que ambas fuentes de contaminación se acumulan de la misma manera (Maanan et al., 2015). Los análisis estadísticos, como la correlación de Pearson y el análisis de componentes principales (PCA) son muy útiles para identificar correlaciones y fuentes de MP. El EF y el CF son métodos ampliamente utilizados para cuantificar la contaminación por MP. Se han propuesto SQG e índices de riesgo ecológico potencial para evaluar el riesgo ecológico potencial asociado con los MP en

los sedimentos. (Leão et al., 2021). Para esta investigación se utilizaron cuatro índices los cuales se explican a continuación:

#### 2.4.1. *Lineamientos de calidad de sedimentos (SQG)*

Los SQG se desarrollan para mejorar la protección del ecosistema bentónico, la pesca y la calidad del agua superficial, y un componente fundamental de todos los marcos de evaluación de la calidad de los sedimentos (Y. Zhang et al., 2021). Los SQG son muy útiles en términos de revelar la contaminación de los sedimentos al comparar la concentración de sedimentos con la pauta de calidad correspondiente. Estas directrices evalúan el grado en que el estado químico asociado a los sedimentos podría afectar negativamente a los organismos marinos y están diseñadas para ayudar en la interpretación de la calidad de los sedimentos (Maanan et al., 2015). La clasificación de los SQG se observa en la Figura 2.1



**Figura 2.1.** Clasificación de los SQG.

Fuente: Elaboración propia.

Hübner et al., (2009) recomienda el uso de los valores de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA), especialmente en América del Norte y donde aún no se dispone de SQG locales adecuados.

#### 2.4.2. *Factor de contaminación (CF)*

Los índices como CF se emplean para estimar el riesgo de contaminación por trazas de metales (Jha et al., 2021). CF representa las adiciones antropogénicas de MP en el medio ambiente (Keshavarzi & Kumar, 2019). Se calcula dividiendo el nivel de MP en la determinación de las

muestras para el valor ambiental de referencia (Verma et al., 2021). La CF se clasifica en cuatro tipos, como  $CF < 1$ ,  $1 < CF \leq 3$ ,  $3 < CF \leq 6$  y  $CF > 6$ , lo que indica contaminación baja, moderada, alta y muy alta (Håkanson, 1980).

#### **2.4.3. Grado de contaminación (CD)**

Håkanson en 1980 sugirió el grado de contaminación (CD) para una evaluación general de la contaminación por sedimentos (Pejman et al., 2015). El CD se determinó como la suma del CF de cada muestra (Maanan et al., 2015). En este método, se requieren al menos cinco muestras de sedimento para proporcionar una concentración media que luego se compara con el valor de fondo (Pejman et al., 2015). Este índice se clasifica de la siguiente manera:  $CD < n$ ,  $n < CD < 2n$ ,  $2n < CD < 4n$  y  $CD > 4n$ , lo que indica un grado de contaminación bajo, moderado, considerable y muy alto respectivamente (Martínez Mera et al., 2019). Donde “n” es la cantidad de metales analizados.

#### **2.4.4. Factor de enriquecimiento (EF)**

El EF permite determinar el grado de interferencia antropogénica por la contaminación por MP (Vieira et al., 2019). El EF indica el nivel de toxicidad de cualquier elemento nocivo comparando concentraciones preindustriales (Rani et al., 2021). La EF para cada metal pesado se calculó dividiendo su relación con el elemento normalizador por la misma relación encontrada en la línea de base seleccionada (Adimalla et al., 2019). El elemento normalizador debe poseer baja variabilidad y puede ser algún elemento relativamente común en la naturaleza, como Al, Fe o Mn (Castro-González et al., 2019). Para el caso de esta investigación se eligió el Fe, debido a su abundancia natural y menor interacción con otros MP (Adimalla et al., 2019).

El valor EF permite comprender la acumulación y la contaminación de MP, porque demuestra cuán enriquecida está la muestra por el metal de interés (Vieira et al., 2019). Los valores de FE entre 0.05 y 1.5 indican que el metal es completamente de materiales de la corteza o procesos naturales, mientras que los valores de EF superiores a 1.5 sugieren que las fuentes tienen más probabilidades de ser antropogénicas (Chen et al., 2015). La Tabla 2.1 contiene la clasificación de los valores de EF.

**Tabla 2.1.** Criterio de clasificación de EF de los MP.

<b>Valor de EF</b>	<b>Clasificación del grado de enriquecimiento</b>
<1	Nulo
De 1 a 3	Menor o Poco

Valor de EF	Clasificación del grado de enriquecimiento
De 3 a 5	Moderado
De 5 a 10	Moderadamente Alto
De 10 a 25	Alto
De 25 a 50	Muy Alto
> 50	Excepcionalmente Alto

Fuente: (Keshavarzi & Kumar, 2019).

## 2.5. Zona de estudio

En este estudio se van a analizar el contenido de MP en los sedimentos de 4 ríos distintos en la zona norte y pacífico norte de nuestro país, dichos ríos son: Arenal, Tres Amigos, Toro y Tempisque. Estos ríos fueron seleccionados por factores como la importancia de estos ríos en la zona y algunas características propias de cada subcuenca que se mencionarán a continuación. Los primeros tres nacen en el cantón de San Carlos y el último en la provincia de Guanacaste.

### 2.5.1. Río Arenal

Según la división político-administrativa, la subcuenca se ubica en el cantón de San Carlos, en la provincia de Alajuela, entre los distritos Monterrey, Pocosol, Cutris y Fortuna. Su área es de 170 km<sup>2</sup> (CATIE, 2016). El río Arenal, uno de los afluentes principales en la cuenca del río San Carlos de la vertiente atlántica (Bussing & López S, 1977). La cuenca se inicia en las estribaciones de las Cordilleras de Tilarán y Volcánica de Guanacaste con elevaciones que varían entre 1800 m.s.n.m. y 538 m.s.n.m. (elevación media del embalse). Las regiones sur y oeste de la cuenca se localizan en las estribaciones de las cordilleras de Tilarán y Guanacaste (Amador et al., 2000). La subcuenca del río Arenal presenta un complejo hidroeléctrico compuesto por tres plantas: Arenal, Corobicí y Sandillal, las cuales en su conjunto suman más de 330 MW de potencia. Su construcción durante la década de los setenta implicó la formación de un embalse artificial de 87 km<sup>2</sup>, y la reubicación forzada de varios poblados (Arguedas & Villalobos, 2020). Después de emplearse en la generación eléctrica, el agua de Arenal es utilizada en actividades agrícolas mediante el Sistema de Riego Arenal–Tempisque (ICE, 2019).

La zona del Río Arenal, gracias a su cercanía con el Parque Nacional Volcán Arenal y por su belleza escénica, ha impulsado uno de los desarrollos turísticos más importantes del país. Este

parque, creado en septiembre de 1991, tiene una extensión de 12 124 hectáreas y se ha convertido en uno de los parques nacionales de gran relevancia en Costa Rica (Carvache-Franco et al., 2021). El embalse de Arenal adquiere especial importancia ya que es el único en el país que permite almacenar agua durante la estación lluviosa para emplearla en la producción eléctrica en los meses más secos del año (ICE, 2019). Según la Municipalidad de San Carlos, (2020) en la zona históricamente ha presentado lluvias todo el año, sin embargo, esta región ha tenido una disminución de precipitaciones y su temperatura promedio ha aumentado. Igualmente, en este cantón se siembra caña de azúcar, piña, cítricos y tubérculos en grandes cantidades, sin embargo, la gama de productos que se cosechan es muy amplia.

### **2.5.2. *Río Tres Amigos***

La subcuenca del río Tres Amigos tiene una superficie aproximada de 472.39 km<sup>2</sup> y abarca los distritos Pital, Aguas Zarcas, Venecia y La Palmera todos pertenecientes al cantón de San Carlos, aunque una pequeña fracción pertenece al distrito Toro Amarillo, cantón de Sarchí (Rodríguez Barrientos, 2005). Este río es afluente del río San Carlos.

Según Rodríguez Barrientos, (2005) en su estudio “Uso del suelo, prácticas culturales, sistemas productivos y sostenibilidad en las fincas de la subcuenca del río Tres Amigos, cuenca del río San Carlos”, la ganadería tanto de carne como lechera es de gran importancia en la subcuenca, además existen importantes agroindustrias. En cuanto al uso de suelo la mayor parte se dedica a los pastos para ganadería con un 62%, en segundo lugar, con un 21% están los bosques y luego se encuentran las raíces y tubérculos con un 8% y la piña con un 3%. El estudio determina que la mayoría de las fincas de la zona utilizan plaguicidas (68%) y fertilizantes químicos (72%) en la región estudiada para el control de plagas y como medio para abonar los suelos.

### **2.5.3. *Río Toro***

El río Toro es un afluente del río Sarapiquí, el que drena a un área de 1.923 km<sup>2</sup> hasta su desembocadura en el río San Juan, se encuentra ubicado en el cantón de Sarchí, provincia de Alajuela, sus aguas son aprovechadas por el ICE en un complejo hidroeléctrico de dos plantas denominadas Toro 1 y Toro 2. Tal complejo aprovecha las aguas del río Toro en las elevaciones 1 265 y 691 msnm respectivamente (Carías Vega & Zamora Bolaños, 2009). Esta subcuenca se caracteriza por poseer una buena cantidad de ríos tributarios.

#### ***2.5.4. Río Tempisque***

El río Tempisque comienza su curso (como el Tempisquito) en las faldas del volcán Orosí y es el tercero más largo del país, aproximadamente 144 km de longitud. Drena desde la Cordillera de Guanacaste hacia las tierras bajas del Pacífico noroccidental de la provincia de Guanacaste, desembocando en el Golfo de Nicoya. Tiene una cuenca hidrográfica que cubre aproximadamente 3 354 km<sup>2</sup> y representa su segunda cuenca más grande después de la Grande de Térraba (Kohlmann et al., 2021). Esta cuenca cubre un 53% de la provincia y el 10.6% de todo el territorio costarricense aproximadamente (Lizano Rodríguez, 2019). Esta cuenca es la más importante del país en materia agropecuaria y cruza tres áreas silvestres protegidas en sus 140 km de longitud aproximada del cauce (Barquero Pizarro, 2019); Área de Conservación Tempisque, Área de Conservación Arenal-Tempisque y el Área de Conservación Guanacaste (Mora Rojas, 2016).

La región experimenta una estación húmeda y una seca por año y tiene una temperatura media de 27.58 ° C. La precipitación media anual de 1 817 mm cae principalmente entre mayo y noviembre, aunque una pausa en la temporada de lluvias o “veranillo” corresponde aproximadamente al mes de julio (Daniels & Cumming, 2008). Lizano Rodríguez, (2019), señala que esta área forma parte de la región denominada Corredor Seco Centroamericano, el cual es un área en la costa Pacífica de América Central propensa a las sequías y una menor precipitación en comparación con el resto de la región. De hecho, Serrano et al., (2019) aporta que, las sequías en Costa Rica son recurrentes pero aperiódicas, en promedio se registra una condición seca extrema cada 8 años. En el 2014, el Gobierno de Costa Rica decretó el estado de emergencia nacional, debido a la situación provocada por la influencia del fenómeno El Niño, específicamente en 11 cantones de Guanacaste y 8 del Pacífico Central, a través del decreto 38642 MP-MAG.

La cuenca del Tempisque se divide en tres secciones: la parte alta, cubierta de bosques, ubicada en la Cordillera Volcánica de Guanacaste; el tramo medio, representado por un terreno ondulado dedicado a la agricultura entre Liberia y Cañas; y los tramos inferiores, compuestos por llanuras y marismas sujetas a inundaciones en muchas áreas (Kohlmann et al., 2021). Lizano Rodríguez, (2019) indica que del cauce del río Tempisque se extrae una importante cantidad de agua para riego de cultivos como el arroz, caña de azúcar y melón, así como para distintas actividades inmobiliarias. De hecho, según el Informe Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible, en Guanacaste hay sembradas aproximadamente 24 000 ha de caña de azúcar, 5 300

ha de melón y el 25% del arroz que se siembra en el país (Mora Rojas, 2016) por lo que las aguas superficiales de esta cuenca son fundamentales para el apropiado desarrollo socioeconómico de la provincia.

En las últimas décadas, la producción tradicional de arroz en esta zona se ha trasladado a la caña de azúcar y la producción de caña de azúcar ha aumentado en Costa Rica. Según LAICA (Liga Industrial Agrícola de la Caña de Azúcar), el número de productores independientes de caña de azúcar ha crecido de seis mil, a principios de los años 90, a doce mil en 2008. Solo la provincia de Guanacaste produce alrededor del 50% del total de la producción nacional. Las extensas plantaciones de caña de azúcar se ubican a lo largo de las riberas de los ríos, como Cañas, Colorado, Las Palmas y la cuenca baja del río Tempisque (Kohlmann et al., 2021).

## **2.6. Estudios previos en el país**

Los estudios a nivel nacional acerca de la contaminación con MP, sus riesgos en la salud o sus consecuencias ambientales son escasos sin embargo cada vez se realizan más. Se procede a hacer un detalle de los más significativos.

Herrera Núñez et al., (2013) analizó por medio de la espectrofotometría de absorción atómica la concentración de diversos MP en los sedimentos superficiales del sector medio del río Pirro ubicado en Heredia y determinó que las concentraciones de estos elementos fueron elevadas en todos los puntos de muestreo seleccionados, esto con una distribución no homogénea. Entre las posibles razones para esto se identificaron el vertido de aguas residuales sin previo tratamiento, la infiltración de aguas negras y el desarrollo de actividades agrícolas, metalúrgicas y metalmeccánicas en la parte alta de la microcuenca.

Salazar Matarrita et al., (2019) determinó la movilidad de metales del suelo al pasto, midiendo las concentraciones de K, Ca, Mn, Fe, Cu y Zn tanto suelo como pasto, en sitios de la región norte de Costa Rica. Los valores de concentración de K fueron superiores en pasto que en el suelo por lo que no se calculó la movilidad con la metodología definida en el trabajo, para los restantes elementos se calculó la movilidad como el porcentaje de transferencia de los metales al pasar del suelo al pasto. Los resultados obtenidos mostraron una transferencia promedio moderada para el Ca de 37.04% y el Zn de 24.75%, y una baja transferencia para el Mn con 1.85%, Fe con 1.35% y Cu con 4.35%.

Furcal-Beriguete & Torres-Morales, (2020) examinaron la presencia de Cd en suelo, partes de la raíz, hoja y granos del árbol de cacao en dos regiones productoras de este cultivo, la zona sur y norte, en el país. El porcentaje de muestras positivas en granos fue mayor en la Región Sur con 89.47%, mientras que en la Norte fue 33.33%. Se encontró mayor presencia en suelos de la Región Sur, lo que sugiere que hubo una bioacumulación de este metal.

Mora-Alvarado et al., (2015) investigó la asociación entre el consumo de agua contaminada con arsénico total (As-total) superior a 10 µg/L y los índices de morbilidad estandarizada (IME) de insuficiencia renal crónica (IRC) en los 59 distritos de los 11 cantones de la provincia de Guanacaste. Los datos indican que, de los 421 acueductos, solo 11 presentaron concentraciones superiores a 10 µg/L y pertenecen a los distritos de Cañas, Bebedero y Bagaces. Los IME de IRC indican que, de los 59 distritos, 32 tenían riesgo de enfermar por IRC mayor al promedio nacional en el periodo 2003-2012. La comparación individual de los distritos demuestra que existen distritos que no estuvieron expuestos a As-total, pero que presentan altos IME de IRC, como lo son los distritos de Mansión, Sámara, Hojancha y Palmira. Además, se presenta la misma situación en los distritos con Muy Baja Exposición, como Liberia, Nicoya, Nacacolo, Nosara, San Antonio, Santa Cruz, Veintisiete de Abril y Diríá. Esto sugiere que el agua contaminada con As-total en los distritos de Guanacaste probablemente no es un factor de riesgo común en las zonas afectadas por la epidemia de IRC.

Sin embargo, la información sobre la contaminación por MP en los ecosistemas del país es poca y a nivel de las subcuencas de los ríos Arenal, Tres Amigos, Toro y Tempisque es nula, por lo que es de suma importancia generar conocimiento sobre este tema, en especial cuando se trata de contaminantes tan nocivos.

### **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

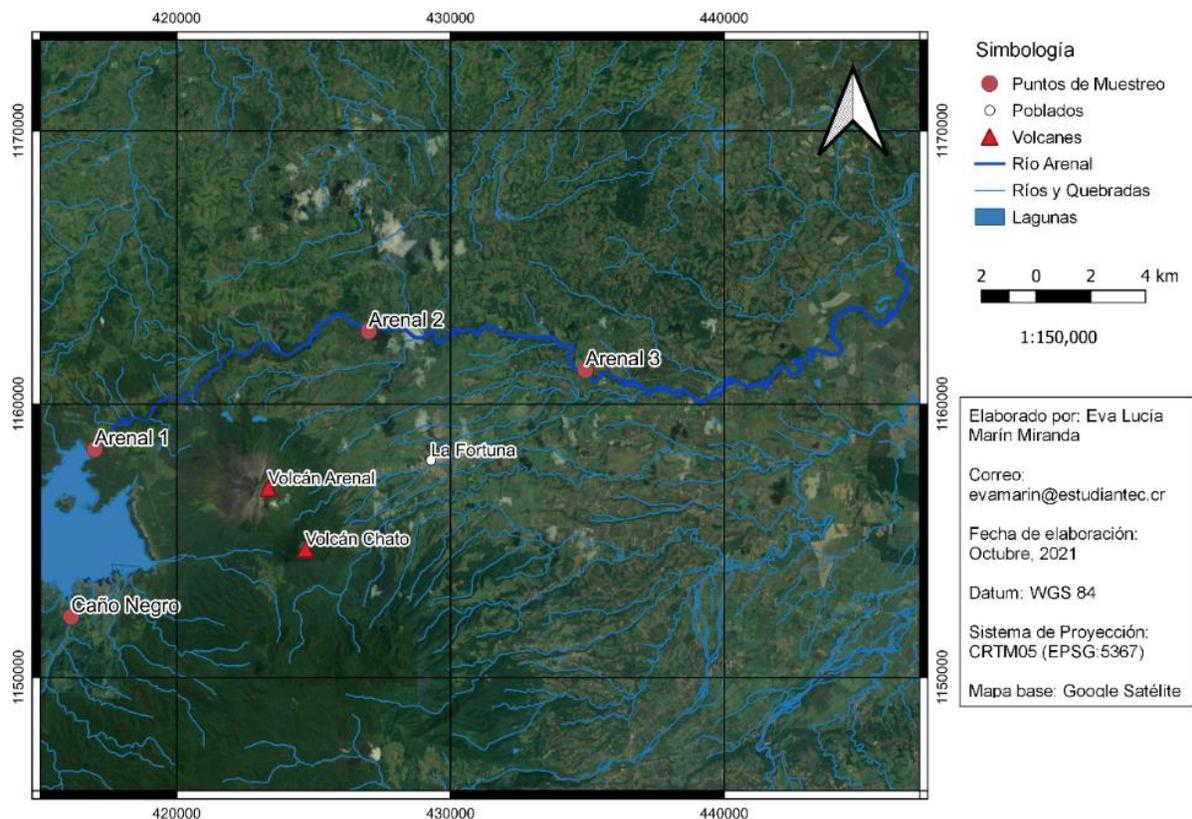
A continuación, se detallan los métodos y procedimientos utilizados para el desarrollo de esta investigación, la cual se puede dividir en 4 grandes secciones, la recolección de las muestras y su caracterización fisicoquímica, la determinación de la concentración de MP en los sedimentos, la evaluación de la contaminación en las cuencas y el análisis estadístico de los MP.

### 3.1. Sitio de estudio

Este estudio es parte del proyecto “*Elaboración de un modelo predictor para predecir la vulnerabilidad de MP en agua y sedimentos en distintas regiones del país*” Vicerrectoría de Investigación y Extensión, en el cual se estudian las subcuencas de los ríos Arenal, Tres Amigos y Toro ubicados en la zona norte, así como el río Tempisque ubicado en el pacífico norte de nuestro país, seguidamente se presentan mapas de los puntos de muestreo para cada subcuenca.

#### 3.1.1. Río Arenal

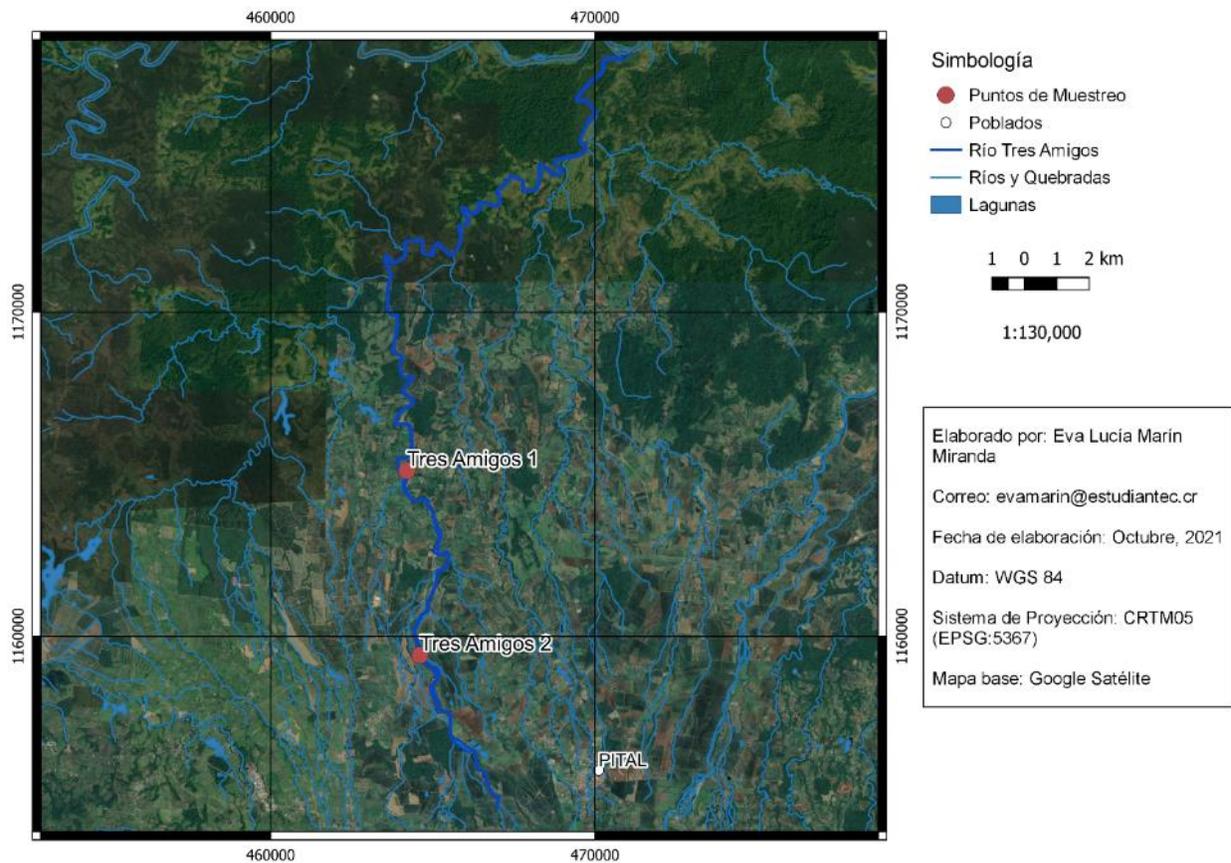
El río Arenal se encuentra ubicado en el cantón de San Carlos de la provincia de Alajuela, se muestrearon 4 puntos ubicados a lo largo de la subcuenca, este río cuenta con la particularidad de iniciar en una laguna por lo que se tiene un punto al inicio (Caño Negro) y al final (Arenal 1) de ella, luego en un punto medio (Arenal 2) y bajo (Arenal 3) de la subcuenca. La localización de estos puntos se puede apreciar en la Figura 3.1.



**Figura 3.1.** Mapa de la ubicación de los sitios de muestreo para el río Arenal.

### 3.1.2. Río Tres Amigos

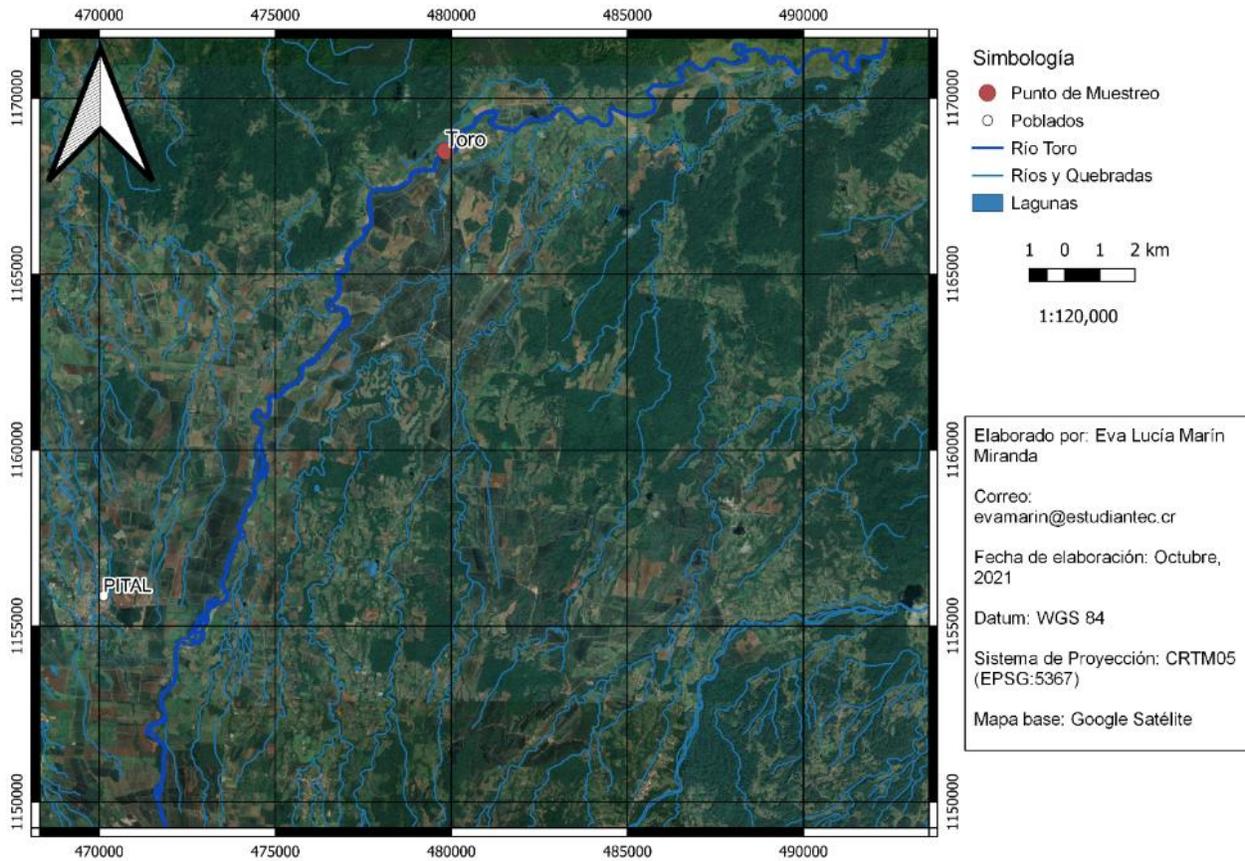
Se encuentra ubicado principalmente en el cantón de San Carlos, sin embargo, nace en el cantón de Sarchí ambos de la provincia de Alajuela, para esta subcuenca se tienen dos puntos de muestreo. Ambos están ubicados en puntos medios de la subcuenca cercanos a plantaciones de cultivos de interés. La localización de estos puntos se puede observar en la Figura 3.2.



**Figura 3.2.** Mapa de la ubicación de los sitios de muestreo para el río Tres Amigos.

### 3.1.3. Río Toro

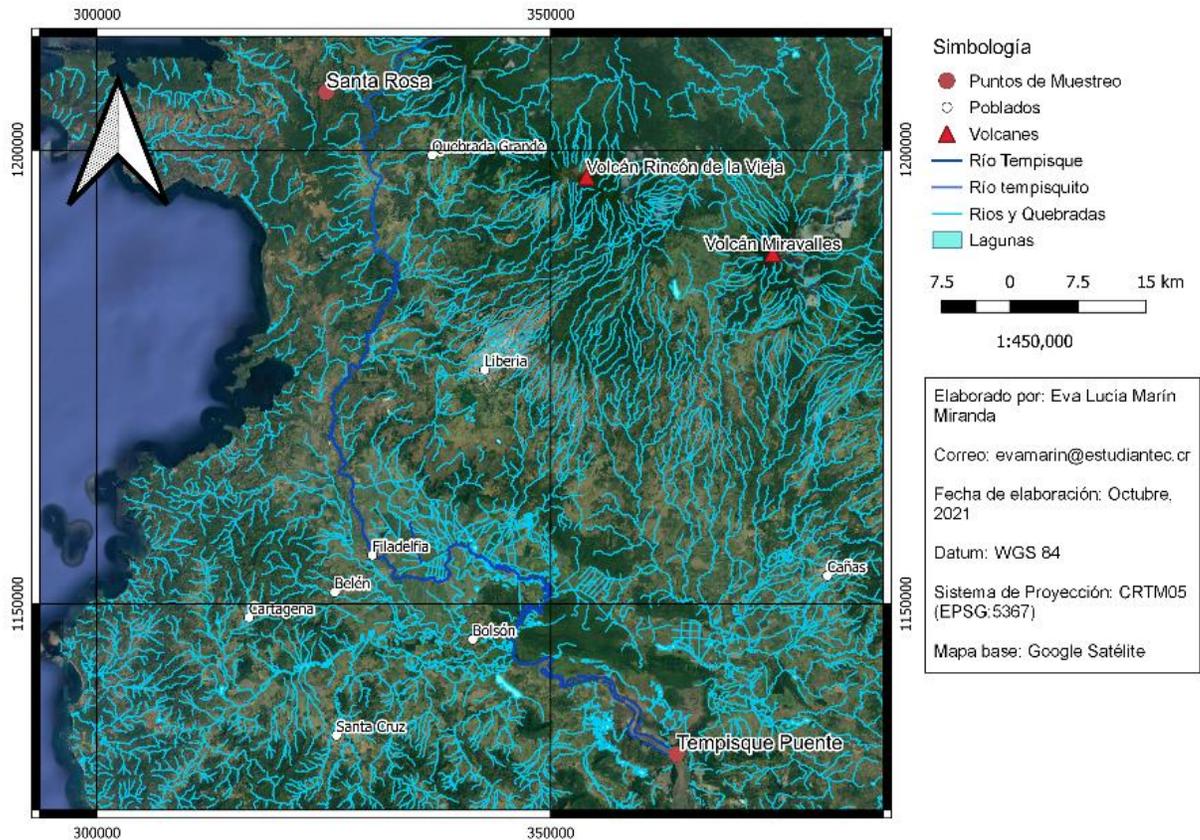
Está ubicado en los cantones de Sarchí, San Carlos y Río Cuarto de Alajuela, para esta subcuenca se tiene un punto de muestreo ubicado en la parte baja de la subcuenca. Como se ve en la Figura 3.3.



**Figura 3.3.** Mapa de la ubicación del sitio de muestreo para el río Toro.

#### **3.1.4. Río Tempisque**

Se extiende a lo largo de la provincia de Guanacaste, para esta subcuenca cuenta con dos puntos de muestreo, uno ubicado en la parte alta de la subcuenca, específicamente en el Parque Nacional Santa Rosa (Santa Rosa) y otro ubicado en la parte baja, cerca de la desembocadura (Puente). La localización de estos puntos se puede apreciar en la Figura 3.4.



**Figura 3.4.** Mapa de la ubicación del sitio de muestreo para el río Tempisque.

### 3.2. Recolección de las muestras y su caracterización

Se realizaron de ocho giras de muestreo entre los meses de septiembre del 2017 a diciembre del 2018 para la mayoría de los puntos, para los puntos de Arenal 3, Pital 2, Toro y Puente se siguieron realizando muestreos nuevamente desde octubre del 2019 hasta agosto del 2020.

El muestreo se realizó por duplicado de manera compuesta recolectando dos bolsas de sedimento superficial en las orillas del cauce, utilizando una espátula plástica y se guardaron en bolsas plásticas de polietileno herméticamente cerradas, se transportaron y almacenaron a temperatura ambiente. De igual manera se realizó el muestreo de suelo a una profundidad de un metro aproximadamente, recolectando dos bolsas de sedimento las cuales se denominaron background o muestra de fondo. Lo cual nos da un total de 192 muestras recolectadas.

#### 3.2.1. Metales pesados estudiados y su criterio de selección

El criterio de selección fue con base al análisis de una serie de estudios internacionales, los cuales han asociado la presencia de estos MP a problemas de contaminación, provenientes de

fuentes tanto naturales como antropogénicas en diferentes partes del mundo, dichos metales analizados y evaluados fueron los siguientes: As, Cd, cromo total (Cr), Cu, Fe, Hg, Ni y Pb.

### 3.2.2. Caracterización fisicoquímica de los sedimentos

La caracterización fisicoquímica de los sedimentos fue realizada en el Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica (UCR). El análisis de textura fue realizado por el Laboratorio de Recursos Naturales a través del método Bouyoucos. En el caso del análisis químico de los sedimentos se realizó en el Laboratorio de Suelos y Foliare. Los métodos empleados para este último análisis se pueden apreciar en la siguiente tabla:

**Tabla 3.1.** Métodos utilizados para los parámetros fisicoquímicos de los sedimentos.

Parámetro	Método
pH del agua	Olsen modificado
Carbono total	Autoanalizador de C/N por combustión seca
Nitrógeno total	Autoanalizador de C/N por combustión seca
Relación carbono-nitrógeno	Autoanalizador de C/N por combustión seca
Conductividad eléctrica	Olsen modificado

Fuente: Centro de Investigaciones Agronómicas, 2017.

### 3.3. Determinación de la concentración de metales pesados en los sedimentos

#### 3.3.1. Tratamiento previo

Debido a que el método de digestión requiere que el sedimento esté en peso seco, se realizó el siguiente tratamiento previo de las muestras. Primeramente, se secaron en recipientes de cerámica, los cuales se introdujeron en una incubadora Thermo Scientific del Centro de Investigación y de Servicios Químicos y Microbiológicos (CEQIATEC) a 45°C por 48 horas, seguidamente se pulverizaron para su homogenización (Montalvo et al., 2014) y luego se realizó un tamizado de < 2 mm de diámetro (Castro-González et al., 2019) y se guardaron en tarritos estériles de tapa roja para el proceso de digestión.

#### 3.3.2. Digestión de las muestras

La digestión se realizó utilizando el método SW-846 3051A de la USEPA (USEPA, 2007). Para las muestras de sedimento se pesaron 0.5 g medidos en una balanza analítica Pioneer 110g X 0.1mg PA114 | E y se les añadieron 9 mL de ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) y 1 mL de ácido clorhídrico

(HCl) concentrados (Castro-González et al., 2019), a los tubos de digestión del horno microondas marca CEM modelo Mars 6 que se aprecie en la Figura 3.5, este horno contiene el método 3051A con una potencia de 1800 W con una rampa de 5 min a una temperatura de 175 °C y luego se mantiene a esta temperatura durante un intervalo de 5 min. Una vez terminada la digestión las muestras fueron trasvasadas y aforadas con una disolución ácida de HNO<sub>3</sub> al 2% en balones de 50 mL utilizando un papel filtro para análisis cuantitativo marca Fisherbrand, posteriormente se almacenaron en tarritos estériles de tapa roja para el proceso de análisis.



**Figura 3.5.** Horno microondas marca CEM modelo Mars 6.

### **3.3.3. Análisis de metales pesados**

Las disoluciones ácidas resultantes de las digestiones fueron analizadas por medio de espectrometría de absorción atómica, utilizando el espectrómetro de absorción atómica marca Perkin-Elmer modelo AAnalyst-800 del CEQIATEC el cual se puede apreciar en la Figura 3.6, utilizando soluciones estándares a diferentes concentraciones de grado analito reconocido.



**Figura 3.6.** Espectrómetro de absorción atómica marca Perkin-Elmer modelo AAnalyst-800.

El Hg fue medido mediante la técnica de generación de hidruros, el Fe fue medido con la técnica de emisión de llama mientras que los metales restantes (As, Cd, Cr, Cu, Ni y Pb) fueron analizados por medio de horno de grafito para la determinación de concentraciones a nivel de trazas, lo anterior siguiendo las metodologías establecidas en el “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater” (Baird & Bridgewater, 2017). Las longitudes de onda, los límites de detección y cuantificación del equipo para cada metal se muestran en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2.** Límites de detección para la técnica utilizada.

<b>Metales</b>	<b>Longitud de onda (nm)</b>	<b>Límite de detección (mg/L)</b>	<b>Límite de cuantificación (mg/L)</b>
<b>As</b>	193.7	0.001	0.005
<b>Cd</b>	228.8	0.001	0.002
<b>Cr</b>	220.05	0.003	0.005
<b>Cu</b>	324.8	0.003	0.01
<b>Fe</b>	248.3	0.1	0.2
<b>Hg</b>	253.7	0.0005	0.001
<b>Ni</b>	232	0.004	0.005
<b>Pb</b>	283.3	0.003	0.010

### 3.3.4. Cálculo de la concentración

Para la determinación de la concentración de metales en mg/L se lleva a cabo mediante regresión lineal, para esto se utiliza la ecuación 3.1:

Ecuación 3.1. Concentración de metales en mg/L

$$Cn_m = \left( \frac{Abs_m - b}{m} \right) fd$$

Donde:

Cn<sub>m</sub>= Concentración de metal obtenida en mg/L.

Abs<sub>m</sub>= Absorbancia determinada para la muestra.

b= intercepto de la curva de calibración.

m=pendiente de la curva de calibración.

fd=factor de dilución utilizado.

Luego se utilizó la ecuación 3.2 para la determinación del metal en mg/kg:

Ecuación 3.2. Concentración del metal en mg/kg

$$Cn_t = \frac{Cn_m \times (V_f) \times 1000}{M_s}$$

Donde:

$Cn_t$ = Concentración de metal obtenida en mg/kg.

$V_f$ = Volumen final.

$M_s$ = Masa del sedimento

Finalmente, los resultados fueron graficados mediante el software Microsoft 365 Excel, utilizando gráficos de cajas y bigotes.

### 3.4. Evaluación de la contaminación

La evaluación de los resultados de los sedimentos se realizó a través de los SQG además de esto se calcularon tres índices distintos, los cuales indican el grado de contaminación de la subcuenca, estos tres índices también fueron calculados utilizando los valores de fondo de la NOAA, los cuales se aprecian en la Tabla 3.3.

**Tabla 3.3.** Valores de fondo para inorgánicos en sedimentos.

<b>Metal</b>	<b>Valor de fondo (mg/kg)</b>
<b>As</b>	1.10
<b>Cd</b>	0.30
<b>Cr</b>	13.00
<b>Cu</b>	25.00
<b>Fe</b>	18 000
<b>Hg</b>	0.05
<b>Ni</b>	9.90
<b>Pb</b>	17

Fuente: (Screening Quick Reference Tables - Squirts, 2008)

#### 3.4.1. Lineamientos de calidad de sedimentos

Como se mencionó anteriormente, las concentraciones de metal obtenidas fueron comparadas a través de los coeficientes dados por MacDonald et al., (2000). En la Tabla 3.4 a

continuación se puede observar la concentración de efecto umbral (TEC) y la concentración de efecto probable (PEC) para evaluar las condiciones de calidad de los sedimentos en función de su capacidad predictiva:

**Tabla 3.4.** Comparación entre los SQG, PEC y TEC, ambos valores expresados en mg/kg.

<b>Metal</b>	<b>TEC</b>	<b>PEC</b>
As	9.79	33
Cd	0.99	4.98
Cr	43.4	111
Cu	31.6	149
Hg	0.18	1.06
Ni	22.7	48.6
Pb	35.8	128

Es importante aclarar que para este lineamiento no existe valor para Fe.

### 3.4.2. Factor de contaminación y grado de contaminación

El factor de contaminación es la relación obtenida de dividir la concentración de cada metal en el sedimento por la línea base o valor de fondo utilizando la ecuación 3.3 (Håkanson, 1980).

Ecuación 3.3. Factor de contaminación

$$CF = \frac{Cn_{Metal}}{Cn_{fondo}}$$

Donde:

CF =Factor de Contaminación

Cn<sub>metal</sub>= Concentración de metal en la muestra

Cn<sub>fondo</sub>= Concentración de valor de fondo.

Para facilitar el control de la contaminación, Håkanson, (1980) también propone un enfoque sedimentológico utilizando una herramienta de diagnóstico. El CD se determina como la suma de los diferentes CF para cada muestra con la ecuación 3.4:

Ecuación 3.4. Grado de contaminación.

$$CD = \sum_{i=1}^{i=n} CF$$

### **3.4.3. Factor de enriquecimiento**

Se calculó el EF para cada metal utilizando la ecuación 3.5 (Taylor S.R, 1964):

Ecuación 3.5. Factor de enriquecimiento.

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

Donde:

C<sub>n</sub>= Concentración del metal en la muestra

C<sub>ref</sub>= Concentración de un elemento de referencia.

## **3.5. Elaboración de mapas de uso de suelo**

La recolección y análisis de datos geográficos, así como la generación de mapas de información geográfica se realizó a través del uso de herramientas de geoprociamiento en el software libre QGIS 3.16.11 utilizando como fuentes de datos el Sistema Nacional de Información Territorial del Registro Nacional, el Atlas 2014 del Instituto Tecnológico de Costa Rica y Google Satélite. El sistema de proyección utilizado fue el WGS84 mientras que los resultados fueron presentados en coordenadas CRTM05.

## **3.6. Análisis estadístico**

Se realizaron tres PCA, el primero fueron las concentraciones de manera general y el segundo y tercero fueron las concentraciones distribuidas por vertiente, además se realizaron pruebas de regresión lineal para los parámetros que se consideraron de interés estos mediante el software Rstudio utilizando las librerías FactoMiner y PerformanceAnalytics.

# **4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

## **4.1. Caracterización y análisis de metales pesados en los sedimentos**

### **4.1.1. Propiedades fisicoquímicas del sedimento**

Las muestras obtenidas de los nueve puntos de muestreo fueron analizadas para determinar las cantidades de arenas, limos y arcillas con el fin de definir la textura de cada una de estas

muestras según el sistema de clasificación de la USDA. Los resultados se pueden observar en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1.** Resultados de textura, pH y porcentaje de materia orgánica (%MO) para los diferentes puntos de muestreo.

<b>Punto de muestreo</b>	<b>Textura</b>			<b>Clase textural</b>	<b>pH</b>	<b>%MO</b>
	<b>Arena (%)</b>	<b>Limo (%)</b>	<b>Arcilla (%)</b>			
<b>Caño Negro</b>	82	11	7	Arena Franca	6.5	2.06
<b>Arenal 1</b>	57	36	7	Franco Arenoso	6.6	4.08
<b>Arenal 2</b>	62	26	12	Franco Arenoso	7.3	1.74
<b>Arenal 3</b>	90	5	5	Arenoso	7.2	0.23
<b>Tres Amigos 1</b>	82	8	10	Arena Franca	6.9	0.72
<b>Tres Amigos 2</b>	92	6	2	Arenoso	6.9	0.46
<b>Toro</b>	65	23	12	Franco Arenoso	4.7	1.13
<b>Santa Rosa</b>	65	10	25	Franco Arenoso Arcilloso	6.6	3.39
<b>Tempisque</b>	20	20	60	Arcilloso	7.6	4.95

Los resultados del análisis de textura para los cuatro puntos del río Arenal presentan un alto porcentaje de arena, con un rango de 57% en el punto de Arenal 1 a 90% en Arenal 3, aumentando al descender en la cuenca, esto produce que las texturas para este río sean Franco Arenosas a Arenosas. En cuanto al pH, todos los puntos presentan pH neutro. Los puntos Caño Negro y Arenal 1 son los que presentan un porcentaje MO mucho más alto que los puntos aguas abajo, esto coincide con el hecho de que estos puntos presentan un orden de suelo andisol, el cual se caracteriza por altos porcentajes de MO (Elizondo-Alvarado, 2015a).

Para los dos puntos del río Tres Amigos, sus porcentajes de arena son superiores a 80%, lo que indica una textura arenosa. El pH para estos puntos cercano a la neutralidad, y presentan bajos porcentajes de MO, esto se puede deber a que ambos puntos presentan un suelo de orden ultisol, el cual presentan una mezcla de arcilla y cuarzo llamada plintita, es rica en hierro y pobre en materia orgánica, la cual, la podemos encontrar en la parte superficial o subsuperficial del suelo (Elizondo-Alvarado, 2016).

Para el punto del río Toro, se tiene una textura franco arenosa, un pH ácido, el cual se relaciona con su orden inceptisol, que se caracterizan por suelos con pH ácidos (Elizondo-Alvarado, 2015c). Esto desfavorece la acumulación de MP, ya que la adsorción de MP se ve influenciada de manera positiva por el pH, es decir, a mayor pH se favorece la acumulación de MP en los sedimentos.

A diferencia de los ríos de la zona norte, los dos puntos del río Tempisque, presentan texturas más arcillosas, lo que favorece la acumulación de metales y la purificación de la calidad de agua (Bing et al., 2016), así mismo presentan porcentajes de MO altos, esto se puede ver relacionado con el orden de suelo que se presenta, el cual es el entisol, caracterizado por su origen muy reciente formados sobre abanicos aluviales, llanuras de inundación, o en las montañas en áreas cuya erosión geológica está en equilibrio con el desarrollo de suelos, lo que favorece la formación de MO (Elizondo-Alvarado, 2015b).

#### ***4.1.2. Concentraciones de metales pesados***

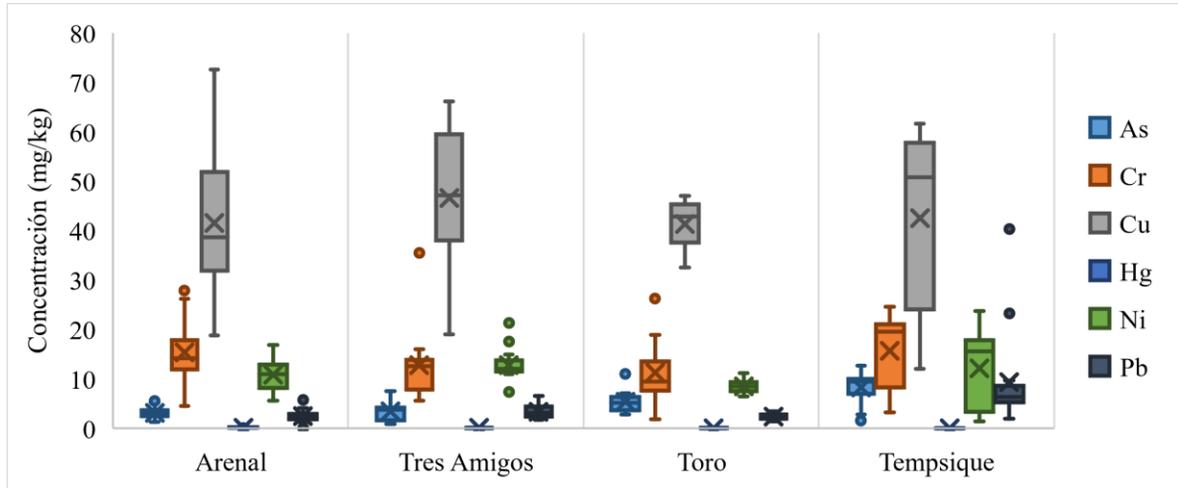
Se determinaron concentraciones para As, Cr, Cu, Fe, Ni y Pb en todas las muestras recolectadas. En el caso de Hg se detectaron concentraciones en 43 de los 85 muestreos analizados, lo que equivale a un 50.6% del total. La concentración de Cd no excedió los límites de detección y cuantificación en ninguno de los cuatro ríos que se analizaron. El resto de los metales se detectó, en el 100% de las muestras analizadas.

Las concentraciones de MP mostraron variaciones en las muestras. Los promedios de MP en los sedimentos siguen un orden decreciente como: Fe > Cu > Cr > Ni > As > Pb > Hg. Es importante resaltar que para el caso del río Tempisque, la concentración promedio de Pb fue superior a la de As, sin embargo, esto se debe a dos concentraciones que se salen del promedio como se aprecia en la Figura 4.1.

Para el caso de las concentraciones de fondo, estas siguen la misma tendencia, sin embargo, para seis de los nueve puntos de muestreo estos valores son superiores al promedio de concentraciones durante los muestreos, debido a esto se decidió utilizar un segundo valor de fondo para realizar comparaciones entre los valores de fondo y los propios de esta investigación. Los valores de fondo utilizados son de la NOAA y se observan en la Tabla 3.3.

Los valores de fondo propios fueron más altos que la referencia norteamericana (Tabla 3.3). Las concentraciones de As fueron en promedio 5.43 veces más altas que las de la referencia

con inclusive un valor de 10.48 veces más alta para el caso del río Tres Amigos. Seguidas por las de Cu (2.04 veces), Fe (1.84 veces), Ni (1.01), Cr (0.96) y Pb (0.35) que es el metal con la concentración más baja como se aprecia en el Apéndice 1.



**Figura 4.1.** Concentraciones de MP (sin Fe) en los ríos Arenal, Tres Amigos, Toro y Tempisque

El río Tres Amigos posee las concentraciones más altas de Fe, Cu, Ni y Hg, mientras que el río Tempisque presenta las concentraciones más altas de Cr, As y Pb. Si se analiza desde la perspectiva de punto de muestreo el más alto para todos los metales menos Fe es Tempisque Puente. A pesar de que se realizaron muestreos en distintas épocas del año, no se observó una tendencia en cuanto a la estación climática en la que se realizaron los muestreos.

#### 4.2. Análisis de los coeficientes de evaluación de sedimentos.

Para evaluar el impacto generado por las concentraciones de MP en los sedimentos de los ríos estudiados se utilizaron cuatro índices distintos, el primero es una comparación con los SQG para los Estados Unidos, el segundo y tercero son índices los cuales indican el nivel de contaminación de los sedimentos y el cuarto es el EF que como su nombre lo indica, hace referencia a el posible enriquecimiento por fuentes externas, ya sean antropogénicas como naturales al contenido de MP en los sedimentos.

#### 4.2.1. Lineamientos de la calidad de los sedimentos

En este estudio se aplicaron dos tipos de valores límite para evaluar el riesgo potencial del ecosistema, basados en la concentración de contaminantes, concentración de efecto umbral (TEC) y concentración de efecto probable (PEC) (Ke et al., 2017).

La concentración de MP en las muestras de sedimento se contrastó con los valores de TEC y PEC. Los resultados se encuentran en la Tabla 4.2 y muestran que únicamente Cu estuvo entre TEC y PEC en un 79%, 86%, 100% y 67% de las muestras de los ríos Arenal, Tres Amigos, Toro y Tempisque, respectivamente, lo que indica que la concentración de Cu exhibirá ocasionalmente efectos adversos en el ecosistema.

**Tabla 4.2.** Porcentaje de muestras de sedimento cuya concentración de MP (mg/kg) que se encuentra en los diferentes rangos de las SQG.

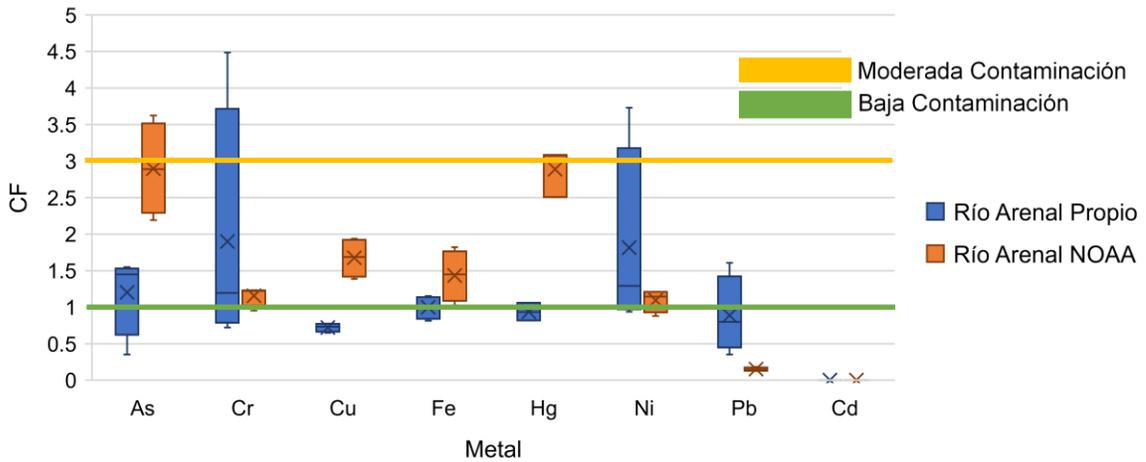
Muestras		As	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Río Arenal	Menor a TEC	100	100	21	64	100	95
	Entre TEC y PEC	0	0	79	12	0	0
	Mayor a PEC	0	0	0	0	0	0
Río Tres Amigos	Menor a TEC	95	100	14	52	100	100
	Entre TEC y PEC	5	0	86	14	0	0
	Mayor a PEC	0	0	0	0	0	0
Río Toro	Menor a TEC	93	100	0	21	100	100
	Entre TEC y PEC	7	0	100	0	0	0
	Mayor a PEC	0	0	0	0	0	0
Río Tempisque	Menor a TEC	72	100	33	0	89	94
	Entre TEC y PEC	28	0	67	6	11	6
	Mayor a PEC	0	0	0	0	0	0

#### 4.2.2. Factor de contaminación y grado de contaminación

Los valores de CF para el río Arenal, Tres Amigos, Toro y Tempisque en sedimentos se resumen en las Figuras 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5 respectivamente, en las cuales la “X” indica la media o promedio de los datos obtenidos, estos fueron comparados con la escala descrita con anterioridad,

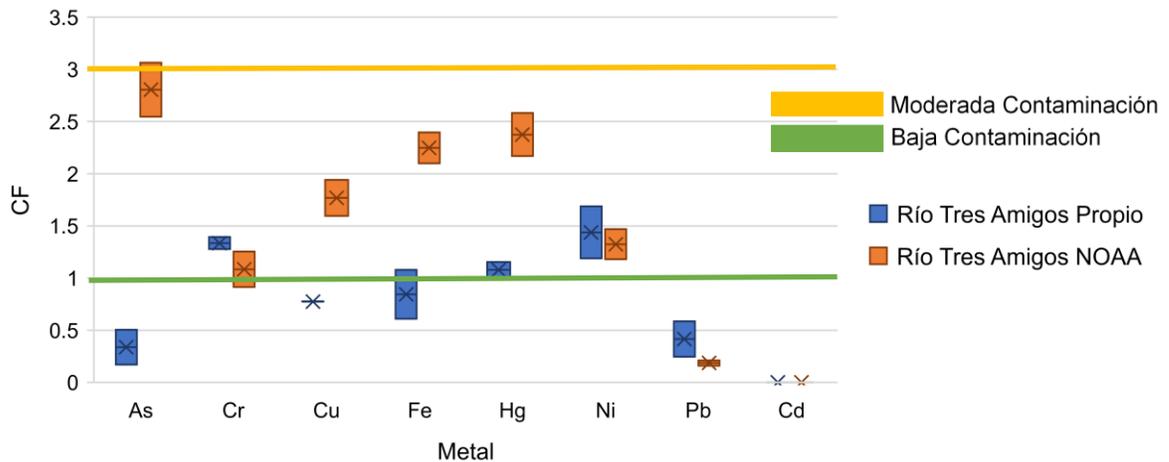
en la cual si el valor CF es inferior a 1 se clasifica como baja contaminación, si el río presenta valores de CF entre 1 y 3 se clasifica como moderada contaminación y con valores entre 3 y 6 se clasifica como alta contaminación y con valores superiores a 6 se clasifica como muy alta contaminación.

Para todos los ríos se realizaron los cálculos utilizando dos valores de fondo distintos, de color azul se ven los CF calculados con el valor de fondo propio de esta investigación y de color naranja los calculados con el valor de fondo de la NOAA, que se dieron en la Tabla 3.3.



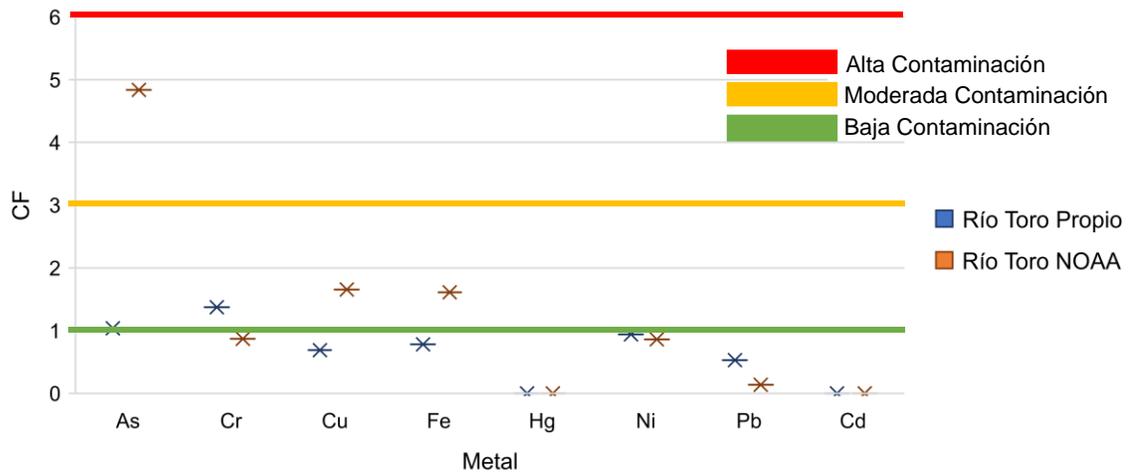
**Figura 4.2.** CF de MP en sedimentos del río Arenal utilizando sus valores de fondo propios y los valores de fondo de la NOAA.

Para el caso del río Arenal, los CF van en el siguiente orden de manera decreciente: As > Cr > Hg > Ni > Fe > Cu > Pb. Para el caso de As, Cr y Ni los valores de CF se encuentran entre 1 y 3 por lo que se presentan una contaminación moderada, esto mismo sucede con Cu, Fe y Hg si se utiliza el valor de fondo de la NOAA. Únicamente Pb da una baja contaminación con los dos valores de fondo, lo que implica que sin importar el valor de fondo que se elija el río Arenal presenta una baja contaminación de Pb, caso contrario a Cu, Fe y Hg, para los cuales únicamente se da con el valor de fondo propio.



**Figura 4.3.** CF de MP en sedimentos del río Tres Amigos utilizando sus valores de fondo propios y los valores de fondo de la NOAA.

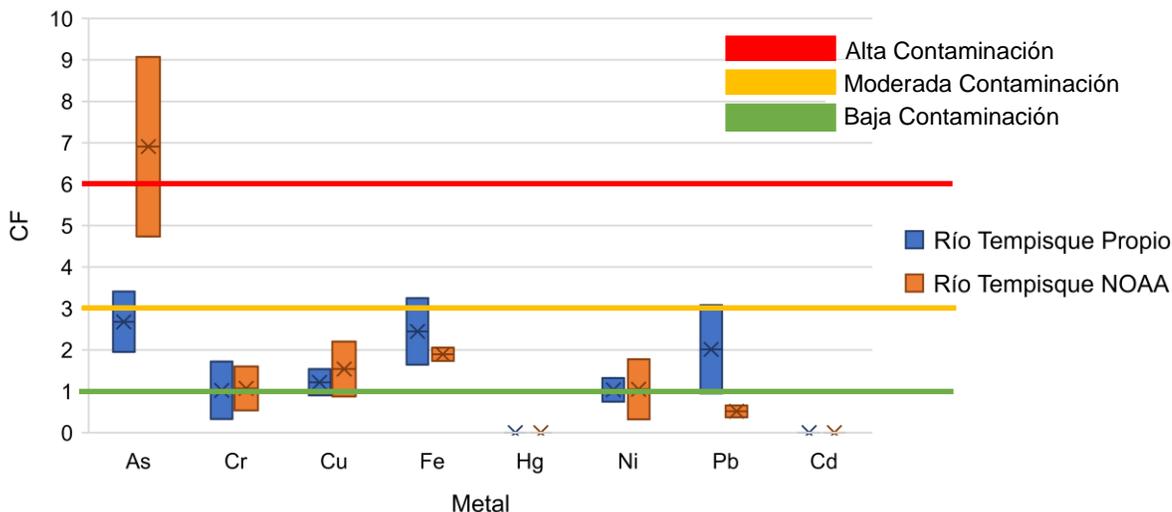
Para el río Tres Amigos, los CF van en el siguiente orden de manera decreciente: Hg> Ni> As> Cr> Fe> Cu >Pb. Para el caso de Hg, Cr y Ni los valores de CF se encuentran entre 1 y 3 por lo que se presentan una contaminación moderada con los dos valores de fondo, esto mismo sucede con As, Cu y Fe si se utiliza el valor de fondo de la NOAA. Nuevamente Pb da una baja contaminación con los dos valores de fondo.



**Figura 4.4.** CF de MP en sedimentos del río Toro utilizando sus valores de fondo propios y los valores de fondo de la NOAA.

Los valores de CF para el río Toro van en el siguiente orden de manera decreciente: As> Cr> Fe> Cu> Ni> Pb. Con el valor de fondo de la NOAA, As tiene una alta contaminación. Para

este río ningún metal presenta valores de CF entre 1 y 3 con los dos valores de fondo, sin embargo, Cr con el valor de fondo propio y Cu y Fe con valor de fondo de la NOAA sí presentan una contaminación moderada. Nuevamente Pb da una baja contaminación con los dos valores de fondo, siendo el único metal que se encuentra en esa categoría para los tres ríos estudiados de la zona norte, de igual manera, Ni tiene una baja contaminación con ambos valores de fondo.



**Figura 4.5.** CF de MP en sedimentos del río Tempisque utilizando sus valores de fondo propios y los valores de fondo de la NOAA.

Para el río Tempisque, los CF van en el siguiente orden de manera decreciente:  $As > Fe > Cu > Pb > Cr > Ni$ . El As en este río presenta una moderada contaminación para el valor de fondo propio y muy alta contaminación, al ser superior a 6, para el valor de fondo de NOAA. Para el caso de Cu y Fe los valores de CF se encuentran entre 1 y 3 por lo que se presenta una contaminación moderada con ambos valores de fondo, esto mismo sucede con Pb si se utiliza el valor de fondo de la NOAA. Los metales que presentan una baja contaminación con los dos valores de fondo son Cr y Ni y Pb con el valor de fondo de NOAA.

El CD fue definido como la suma de los CF para cada subcuenca, estos valores se muestran en la Tabla 4.3. El CD en todo el estudio varió de 5.3 a 14.1 con un promedio de 9.9 lo que confirma que de manera general los sedimentos de los ríos estudiados presentan un moderado grado de contaminación.

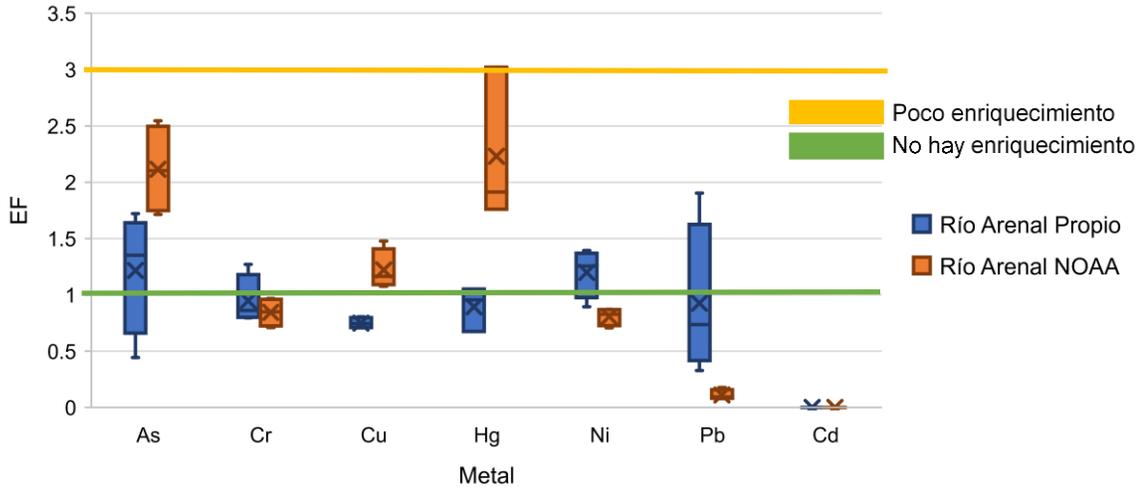
**Tabla 4.3.** CD para los sedimentos de las diferentes cuencas analizadas utilizando sus valores de fondo propios y los valores de fondo de la NOAA.

<b>Río</b>	<b>CD</b>	
	<b>Valor de fondo propio</b>	<b>Valor de fondo NOAA</b>
<b>Arenal</b>	Moderada Contaminación	Moderada Contaminación
<b>Tres Amigos</b>	Moderada Contaminación	Considerable Contaminación
<b>Toro</b>	Baja Contaminación	Moderada Contaminación
<b>Tempisque</b>	Moderada Contaminación	Considerable Contaminación

Por río se tiene que, para el Arenal, ambos valores de fondo arrojan un grado de contaminación moderada, para el resto de los ríos se observa la tendencia de grados de contaminación más altos si se utiliza el valor de fondo de la NOAA, esto se presenta particularmente en el río Toro el cual pasa de una baja contaminación (5.3) a una moderada contaminación (10).

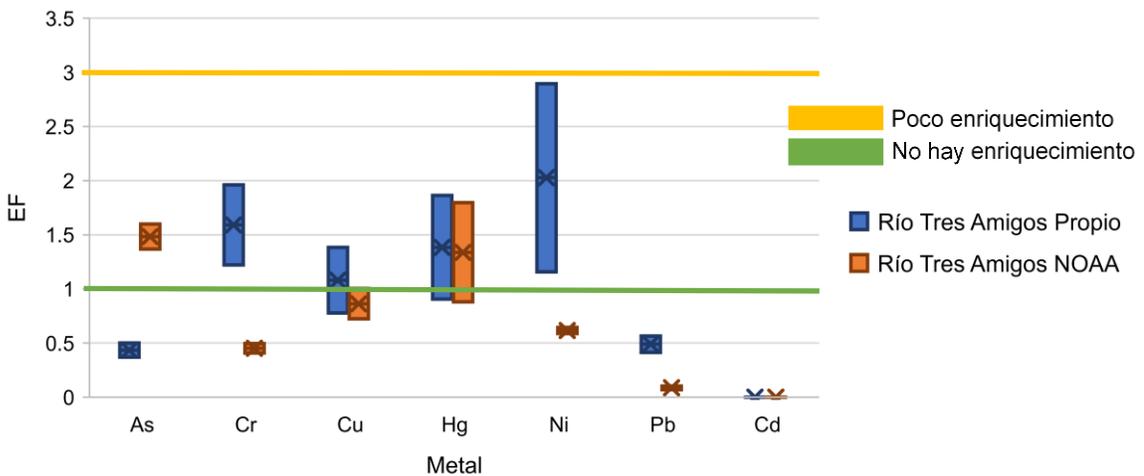
#### **4.2.3. Factor de enriquecimiento**

El EF se utiliza ampliamente para estimar el grado real de contribución de fuentes antropogénicas de suelo (Adimalla et al., 2019). Los valores de EF para el río Arenal, Tres Amigos, Toro y Tempisque en sedimentos se resumen en las Figuras 4.6, 4.7, 4.8 y 4.9 respectivamente. Por río, los valores de EF se encuentran distribuidos de la siguiente manera: Tres Amigos > Arenal > Toro > Tempisque. Para algunos de casos, el EF de los metales estudiados fue superior a 1.5, lo que indica una fuerte influencia humana en la contaminación por metales en los sedimentos (Islam et al., 2015).



**Figura 4.6.** EF de MP en sedimentos del río Arenal utilizando sus valores de fondo propios y los valores de fondo de la NOAA.

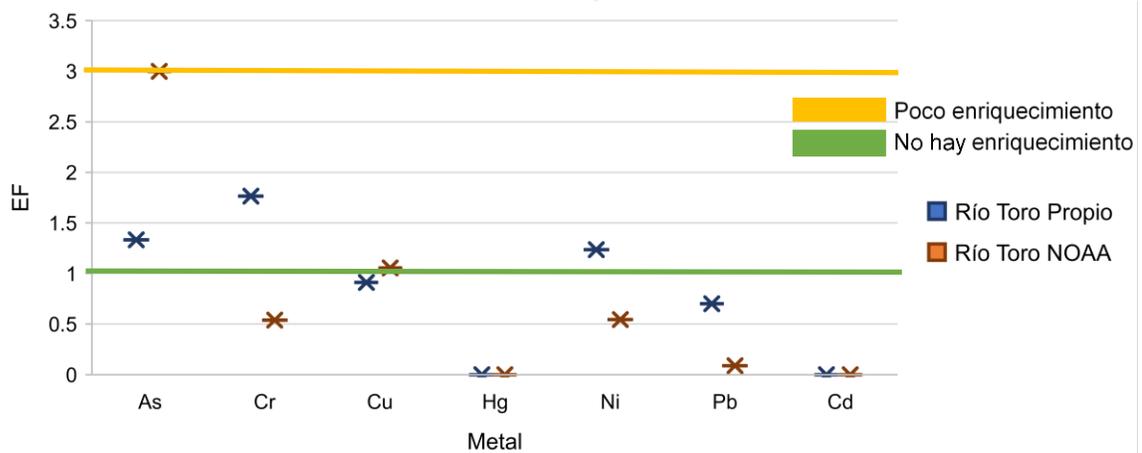
Los metales con el EF más alto en orden descendente fueron: As > Ni > Hg > Cr > Cu > Pb. Los valores de EF inferiores a 3 pero superiores a 1 indican que el sedimento se ha visto enriquecido, para esta cuenca esto se da para As con ambos valores de fondo y para Cu y Hg con valores de fondo de la NOAA y Ni con los valores propios.



**Figura 4.7.** EF de MP en sedimentos del río Tres Amigos utilizando sus valores de fondo propios y los valores de fondo de la NOAA.

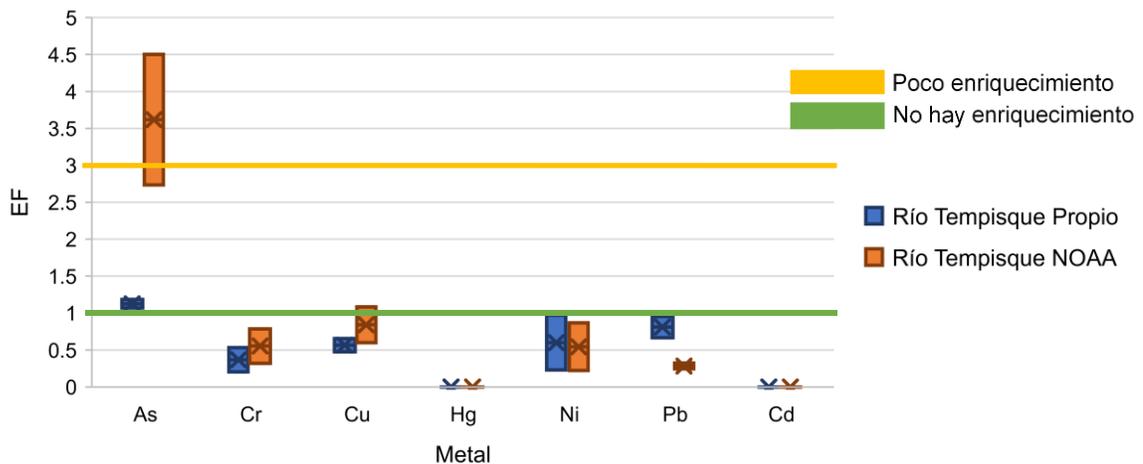
Los metales con el EF más alto en orden descendente fueron: Ni > Hg > As > Cr > Cu > Pb. Este río es el que presenta la mayor cantidad de valores de EF con poco enriquecimiento, esto se da para Hg con ambos valores de fondo y para As con valores de fondo de la NOAA y Cr, Cu y

Ni con los valores propios. De hecho, para el caso de Cr y Ni el promedio de los datos es superior a 1.5, lo que implicaría que el enriquecimiento de MP se debe a fuentes antropogénicas.



**Figura 4.8.** EF de MP en sedimentos del río Toro utilizando sus valores de fondo propios y los valores de fondo de la NOAA.

Los metales con el EF más alto en orden descendente fueron: As > Cr > Cu > Ni > Pb. Valores de EF con poco enriquecimiento se dan para As con ambos valores de fondo y para Cu con valores de fondo de la NOAA y Cr y Ni con los valores propios.



**Figura 4.9.** EF de MP en sedimentos del río Tempisque utilizando sus valores de fondo propios y los valores de fondo de la NOAA.

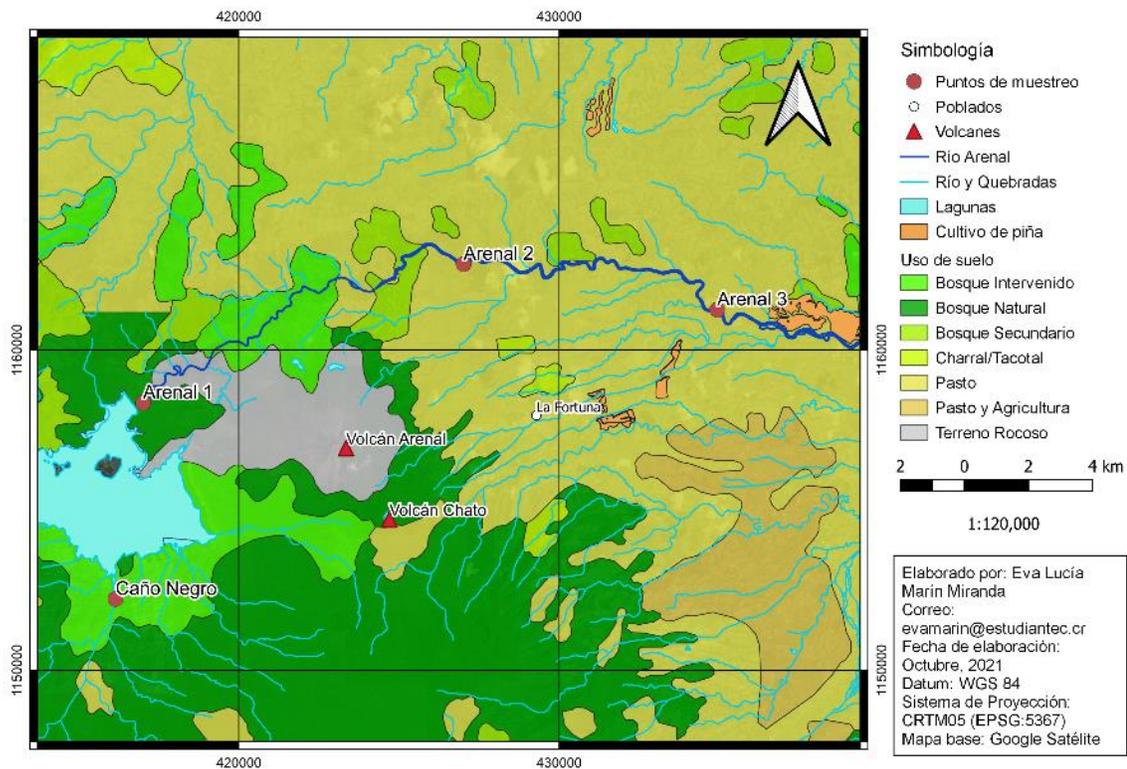
Los metales con el EF más alto en orden descendente fueron: As > Cu > Ni > Cr > Pb. Para todos los ríos Pb presenta un nulo enriquecimiento. Únicamente el As con ambos valores de fondo

presenta de EF mayores a 1 implicando un poco enriquecimiento para el caso de As con valor propio y moderado enriquecimiento para As con valor de fondo de la NOAA.

Es contrastante que a pesar de tener altos valores de CF y CD indicando una moderada contaminación, los EF para esta cuenca indican que dicha contaminación puede no ser debida a una causa antropogénica dado los bajos valores de EF.

#### 4.2.4. Posibles causas de contaminación

Las Figuras 4.10, 4.11, 4.12 y 4.13 presentan los mapas de los diferentes sitios de estudio. En el caso del río Arenal se tiene que 2 de los puntos se encuentran en la represa hidroeléctrica Arenal del ICE, mientras los puntos Arenal 2 y Arenal 3 se encuentran aguas abajo.

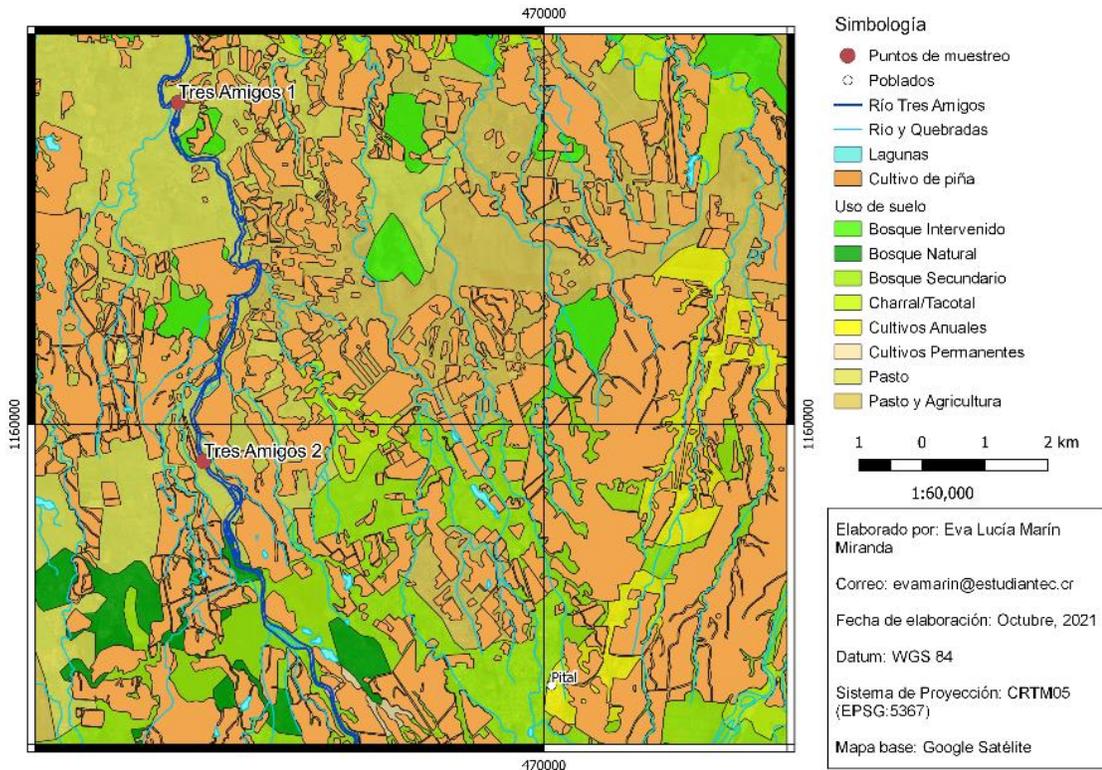


**Figura 4.10.** Uso de suelo para el río Arenal.

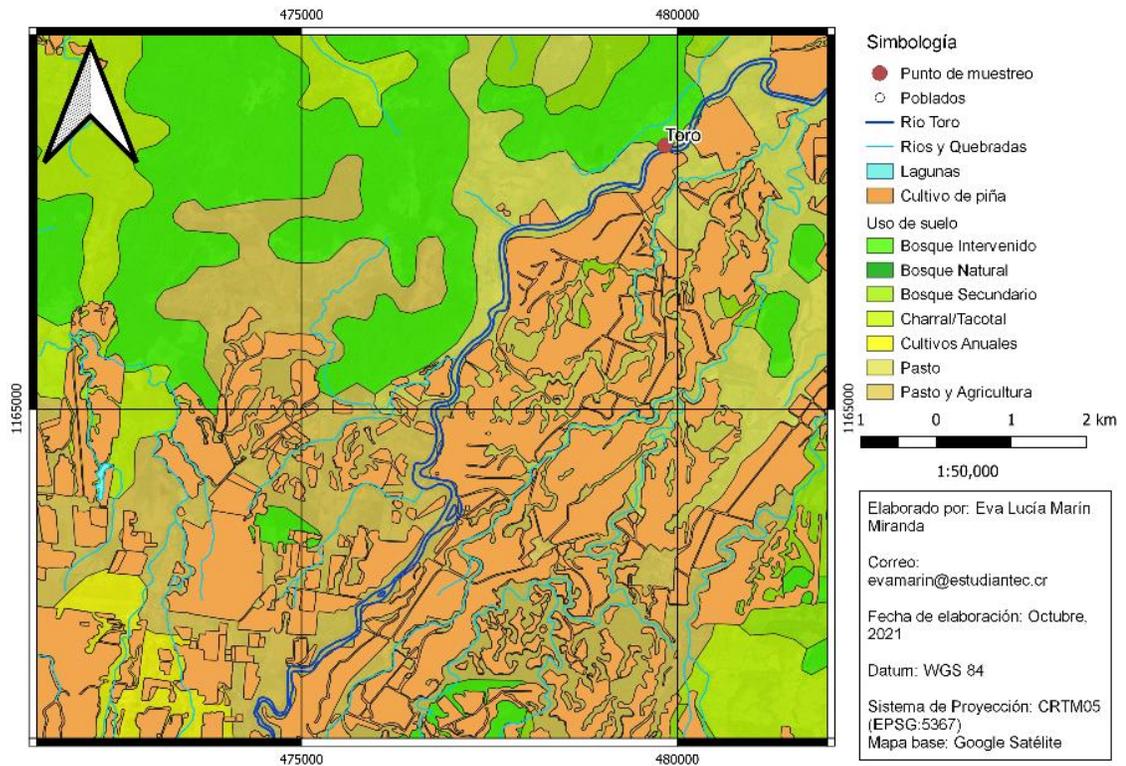
El destino de los metales que ingresan a los ríos y lagos de las cuencas hidrográficas es generalmente la deposición en embalses no naturales. En estos sistemas, dichos metales se acumulan en sedimentos, provocando efectos nocivos a la biota por cambios en las propiedades físicas y bioquímicas del área contaminada (Pereira Cabral et al., 2021). Comparando las

concentraciones de metales entre los puntos de la represa y los del río se encuentra un aumento en las concentraciones de MP en los sedimentos río abajo a los de la represa, esto se da para Cr, Pb, Cu y Ni, similar a lo encontrado por Bai et al., (2009); Sojka et al., (2018) para represas en China y Polonia respectivamente.

En el caso de los ríos Tres Amigos y Toro, como se aprecia en las Figuras 4.11 y 4.12 gran parte del uso de suelo de estas cuencas es destinado al cultivo de piña, Defarge et al., (2018) encontraron que ciertos plaguicidas contienen MP, en el anexo 1, se encuentra una lista de los plaguicidas con autorización de venta libre del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), los cuales según Chacón, (2019) y Defarge et al., (2018) contienen MP, en específico As, Cr y Ni, algunos de estos son utilizados en el cultivo de la piña, lo que podría explicar los moderados niveles de contaminación en estas cuencas para dichos metales.

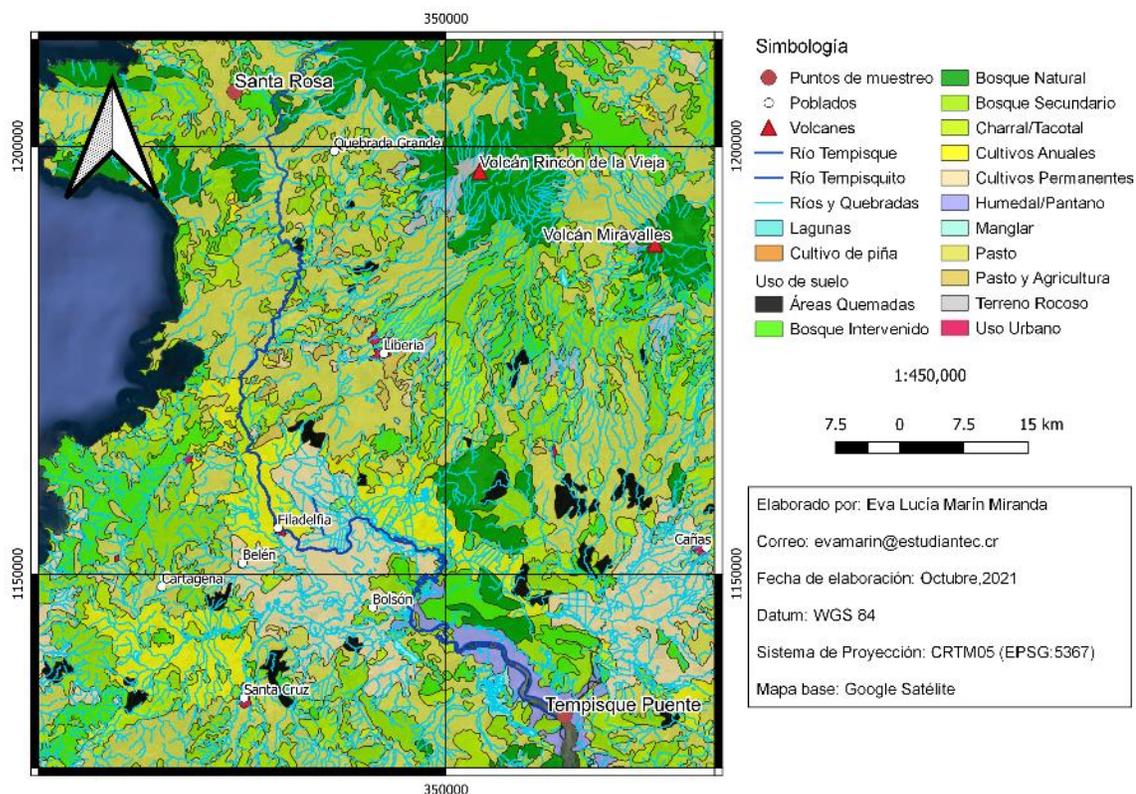


**Figura 4.11.** Uso de suelo para el río Tres Amigos.



**Figura 4.12.** Uso de suelo para el río Toro.

En el caso de los ríos Arenal, Toro y Tempisque el factor de contaminación de As indica una moderada contaminación. Bundschuh et al., (2021) indica que las dos fuentes y mecanismos más importantes y reconocidos para la liberación de As en el medio ambiente de la población latinoamericana son: el vulcanismo y geo termalismo, y la liberación de As fuertemente acelerada de fuentes geogénicas por la minería y actividades relacionadas. Dado que ninguna de las cuencas presenta actividades de minería, se podría indicar que la fuente de contaminación de As para estas cuencas es el vulcanismo y geo termalismo.



**Figura 4.13.** Uso de suelo para el río Tempisque.

Para el punto específico de Puente para el río Tempisque, se tiene una moderada a alta contaminación para Pb utilizando el valor de fondo propio, según Navarrete-Rodríguez et al., (2020) la presencia de Pb en el ambiente puede estar asociada a antiguos usos en la zona, tipos de gasolina, pintura y pesticidas, los cuales han tenido un impacto significativo en la cantidad que se encuentra en el sedimento. En nuestro país el Pb en la gasolina fue eliminado en 1996, con el fin de procurar una mejor calidad de aire para los ciudadanos (RECOPE, 2016). Sin embargo, una vez incorporado el Pb, se adhiere fuertemente a las partículas del suelo o sedimento y permanece en la capa superior del mismo (Navarrete-Rodríguez et al., 2020), lo que explicaría la presencia de Pb tantos años después debido al alto tránsito de automóviles por la zona de muestreo.

### 4.3. Matriz de correlación y Análisis de componentes principales

Para establecer las posibles relaciones entre metales y definir los principales orígenes de los metales en las diferentes vertientes, se realizó la prueba de correlación de Pearson, la cual se puede apreciar en la Tabla 4.4 para los 4 ríos analizados.

Para los 4 ríos seleccionados, la mayoría de los metales no presentan una relación significativa entre sí. Una correlación significativamente positiva se ha observado entre Cr y Ni y Pb y As, indicando un origen similar para estos metales (Ke et al., 2017). Así mismo, se observaron correlaciones relativamente negativas para Hg con As, Cr, Ni y Pb indicando la falta de correlaciones significativas entre estos MP, lo que podría deberse a la presencia de diversas fuentes de contaminación (Adimalla et al., 2019).

**Tabla 4.4.** Coeficiente de correlación de Pearson entre MP para los 4 ríos analizados.

	As	Cr	Cu	Fe	Hg	Ni	Pb
As	1						
Cr	0.19	1					
Cu	0.37**	0.21*	1				
Fe	0.38**	0.38**	0.35**	1			
Hg	-0.29**	-0.01	0.11	0.00	1		
Ni	0.33**	<b>0.66**</b>	0.45	0.40**	-0.02	1	
Pb	<b>0.54**</b>	0.14	0.20	0.23*	-0.18	0.20	1

\*Nivel de significancia de 0.05

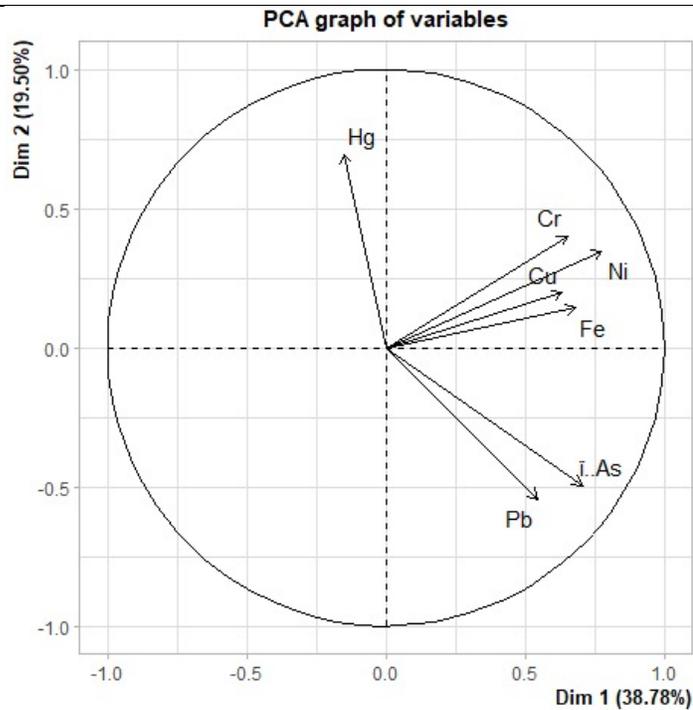
\*\*Nivel de significancia 0.01

Para una evaluación adicional del alcance de la contaminación por metales en el área de estudio y una posible identificación de la fuente, se utilizó un PCA siguiendo el procedimiento estándar informado en la literatura (Marrugo-Negrete et al., 2017). El PCA es una herramienta estadística que se ha utilizado para minimizar los datos de entrada y extraer un número menor de factores independientes que anticipan las relaciones entre las variables estudiadas (Ibrahim et al., 2019).

La Tabla 4.5 y Figura 4.14 se muestran los resultados del PCA realizado para la totalidad de los 4 ríos analizados juntos. En este caso se extrajeron dos componentes principales rotados (PC o Dim) con valores propios > 1, lo cual es necesario para que la prueba se considere significativa (Pejman et al., 2015). Este PCA logró que representara el 58.28% de la varianza de la totalidad de la información suministrada. El PC1 está presente los valores de componentes más altos en As, Cr, Cu, Fe, Ni y Pb y explica el 38.78% de la varianza total, además de exhibir un valor propio de 2.7145. Por otro lado, el PC2 contiene el 19.50% de la varianza total con una carga de Hg y un valor propio de 1.3650.

**Tabla 4.5.** Matriz de componentes rotados para parámetros estudiados en los sedimentos.

	Componente	
	PC1 o Dim 1	PC2 o Dim 2
As	0.429	-0.424
Cr	0.397	0.342
Cu	0.384	0.170
Fe	0.415	0.120
Ni	0.470	0.297
Pb	0.331	-0.466
Hg	-0.091	0.596
Valor propio	2.7145	1.3650
Varianza total (%)	38.78	19.50
Varianza acumulada (%)	38.78	58.28



**Figura 4.14.** Círculo de correlaciones entre variables realizado en Rstudio.

Sin embargo, observando los resultados de la Tabla 4.5, únicamente Hg en la PC2 tiene un valor superior a 0.5, el cual es necesario para poder correlacionar las PC con algún tipo de fuente de contaminación.

Posteriormente se realizaron las pruebas según la zona en la se encuentra ubicada el o los ríos, realizándose dos análisis, uno en la zona norte para los ríos Arenal, Tres Amigos y Toro y otros en el pacífico norte para el río Tempisque, los resultados de dichas pruebas de Pearson se encuentran en las Tablas 4.5 y 4.6 respectivamente. En el caso de la zona norte, de las dos correlaciones encontradas anteriormente, solo Cr y Ni mantienen un r de Pearson superior a 0.5, lo que implica que la correlación es positiva moderada.

**Tabla 4.6.** Coeficiente de correlación de Pearson entre MP en muestras de los ríos de la zona norte.

	<b>As</b>	<b>Cu</b>	<b>Pb</b>	<b>Fe</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Hg</b>
<b>As</b>	1						
<b>Cu</b>	0.36**	1					
<b>Pb</b>	0.24*	0.43**	1				
<b>Fe</b>	0.22	0.34**	0.30*	1			
<b>Cr</b>	-0.19	-0.05	0.01	0.33**	1		
<b>Ni</b>	-0.03	0.14	0.18	0.48**	<b>0.55**</b>	1	
<b>Hg</b>	-0.03	0.13	0.21	0.10	0.04	0.05	1

\*Nivel de significancia de 0.05

\*\*Nivel de significancia 0.01

Para la zona norte también se le realizó el PCA, sin embargo, la varianza acumulada dio 55.3% por lo que refleja muy poca de la información y de manera similar solo uno de los metales presenta un valor superior a 0.5 en alguno de los componentes, pero dado que este valor (0.525) es muy bajo no se puede realizar alguna afirmación de la posible fuente relacionada con dicho componente.

Finalmente, para el río Tempisque, de acuerdo con los valores de los coeficientes de correlación de Pearson encontrados en la Tabla 4.6, a excepción del Pb, el resto de los MP están todos correlacionados positivamente. Existe una fuerte correlación positiva entre Cu y Cr ( $r = 0.93$ ,  $p < 0.01$ ), Ni y Cu ( $r = 0.92$ ,  $p < 0.01$ ) y Ni y Cr ( $r = 0.91$ ,  $p < 0.01$ ) estos resultados indican que Cr, Cu y Ni podrían tener su origen en fuentes comunes, similar a lo encontrado por Ke et al., (2017) y Maanan et al., (2015). As muestra correlaciones moderadas positivas con Cr, Cu, Ni y Fe y Cr con Fe.

**Tabla 4.7.** Coeficiente de correlación de Pearson entre MP en muestras del pacifico norte.

	<b>As</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>Fe</b>
<b>As</b>	1					
<b>Cr</b>	<b>0.88**</b>	1				
<b>Cu</b>	<b>0.78**</b>	<b>0.93**</b>	1			
<b>Ni</b>	<b>0.73**</b>	<b>0.91**</b>	<b>0.92**</b>	1		
<b>Pb</b>	0.39	0.20	0.28	0.18	1	
<b>Fe</b>	<b>0.64**</b>	<b>0.51*</b>	0.42	0.30	0.18	1

\*Nivel de significancia de 0.05

\*\*Nivel de significancia 0.01

Para el caso del PCA del pacífico norte, se tiene que la varianza acumulada es 82.3%, sin embargo, solo el PC1 da un valor propio superior a 1, lo que hace que el PC2 no sea significativo y es este componente donde Pb tiene un valor de 0.880, siendo el único metal que presenta un valor superior a 0.5 en alguno de los componentes. Los resultados de estos PCA se encuentran en el apéndice 3.

## 5. CONCLUSIONES

- Se evaluó el estado de la calidad de distintos ríos en la Zona Norte y Pacífico Norte del país y se encontró la presencia de As, Cr, Cu, Fe, Ni y Pb en un 100% de las muestras analizadas, para el caso de Hg fue en el 51% y Cd un 0% de las muestras.
- Los promedios de concentraciones en mg/kg de MP en los sedimentos siguen la siguiente tendencia: Fe > Cu > Cr > Ni > As > Pb > Hg.
- El río Tres Amigos presenta las concentraciones más altas de Fe, Cu, Ni y Hg, mientras que el río Tempisque las más altas en Cr, As y Pb.
- Únicamente Cu presenta la mayoría de las concentraciones superiores a TEC, pero inferiores al PEC para los 4 ríos estudiados, lo que indica que la concentración de Cu está en un rango donde los efectos adversos en el ecosistema ocurren de manera ocasional.
- En tres de los cuatro ríos analizados presentaron valores de CF superiores a 1, lo que indica que en estos ríos se presenta una moderada contaminación
- Utilizando el CD la mayoría de los ríos presentan una moderada contaminación con la excepción del río Toro, el cual presenta una baja contaminación si se utiliza el valor de fondo propio.
- Para los ríos Arenal, Toro y Tempisque, solo As presenta poco enriquecimiento utilizando ambos valores de fondo. En el caso del río Tres Amigos, esto se da únicamente con Hg, lo que implica que estos sedimentos se han visto enriquecidos de estos metales, sin embargo, al tener valores inferiores a 1.5 no se puede afirmar que este enriquecimiento sea de una fuente antropogénica.
- De acuerdo con la información encontrada en la literatura, las posibles causas de la presencia de MP en los sedimentos se deben a la influencia de la represa Arenal en el río Arenal, lo que incrementa las concentraciones de Cr, Pb, Cu y Ni.
- Para los ríos Tres Amigos y Toro, estudios tanto nacionales como internacionales indican que una posible fuente de contaminación para As, Cr y Ni son los plaguicidas utilizados en los cultivos de la zona.

- En el caso del Río Tempisque, la posible causa de contaminación por Pb para el punto de Puente es la geoacumulación de Pb dado al antiguo uso de este en las gasolinas.
- Dado que ninguna de las cuencas presenta actividades de minería, se podría indicar que una fuente de contaminación de As para las cuencas es el vulcanismo y geotermalismo.
- Según los coeficientes de Pearson, de manera general Cr y Ni y Pb y As se correlacionan significativamente. Para la zona norte, solo Cr y Ni se correlacionan y para el pacífico norte, As y Cr se correlacionan significativamente con todos los metales menos Pb, además de Cu y Ni entre ellos. Por su parte, los tres PCA realizados resultaron inconclusos.

## **6. RECOMENDACIONES**

- Para futuras investigaciones, se recomienda contar con más puntos de muestreo a lo largo del río para que se logren resultados más representativos.
- Seguir realizando investigaciones de este tipo en otras cuencas del país para observar la influencia que otras actividades productivas tendrán en los sedimentos.
- Para obtener mejores resultados y en menor tiempo, se recomienda el uso de la técnica ICP-masas, cuyos límites de detección y cuantificación son más bajos y permitirían la evaluación de otros metales peligrosos para el ser humano como Cd.
- Para posteriores estudios, se recomienda la caracterización fisicoquímica de todas las muestras, para conocer los cambios en pH y porcentaje de MO, los cuales podrían influir en la concentración de MP.
- Realizar un estudio que permita una estandarización de los valores de fondo para las diferentes regiones del país.
- Determinar cuáles son los plaguicidas que se usan en la zona de estudio y analizarlos para determinar su contenido en MP.

## 7. REFERENCIAS

- Abdeldayem, R. (2020). A preliminary study of heavy metals pollution risk in water. *Applied Water Science*, 10(1), 1–4. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-1058-x>
- Adimalla, N., Qian, H., & Wang, H. (2019). Assessment of heavy metal (HM) contamination in agricultural soil lands in northern Telangana, India: an approach of spatial distribution and multivariate statistical analysis. *Environmental Monitoring and Assessment*, 4, 191–246. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7408-1>
- Adlard, B., Lemire, M., Bonefeld-Jørgensen, E. C., Long, M., Ólafsdóttir, K., Odland, J. O., Rautio, A., Myllynen, P., Sandanger, T. M., Dudarev, A. A., Bergdahl, I. A., Wennberg, M., Berner, J., & Ayotte, P. (2021). MercuNorth—monitoring mercury in pregnant women from the Arctic as a baseline to assess the effectiveness of the Minamata Convention. *International Journal of Circumpolar Health*, 80(1), 1–12. <https://doi.org/10.1080/22423982.2021.1881345>
- Ali, H., & Khan, E. (2018). Bioaccumulation of non-essential hazardous heavy metals and metalloids in freshwater fish. Risk to human health. *Environmental Chemistry Letters*, 16(3), 903–917. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0734-7>
- Amador, J. A., Laporte, S., & Chacón, R. E. (2000). Cuenca del Río Arenal : Análisis de los eventos Niño de los años. *Temas Meteorológicos y Oceanográficos*, 7(1), 1–20.
- Arguedas, A. G., & Villalobos, D. V. (2020). Hydroelectric projects and community resistance in defense of the rivers of Costa Rica: A geographic analysis. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 29(1), 133–151. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v29n1.75271>
- Bai, J., Cui, B., Xu, X., Ding, Q., & Gao, H. (2009). Heavy metal contamination in riverine soils upstream and downstream of a hydroelectric dam on the Lancang river, China. *Environmental Engineering Science*, 26(5), 941–946. <https://doi.org/10.1089/ees.2008.0136>
- Baird, R., & Bridgewater, L. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. (23rd ed.). American Public Health Association.
- Barquero Pizarro, G. (2019). *Análisis Hidrológico De Cauces De La Cuenca Del Río Tempisque Involucrados En El Proyecto Abastecimiento De Agua Para La Cuenca Media Del Río Tempisque Y Comunidades Costeras (Paacume)*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Bhaskar, M., Kumar Dixit, A., Kumar Ojha, K., Dubey, S., Singh, A., & Abhishek, A. (2020). The impact of anthropogenic organic and inorganic pollutants on the Hasdeo River Water Quality

- in Korba Region, Chhattisgarh, India. *Bioinformation*, 16(4), 332–340.  
<https://doi.org/10.6026/97320630016332>
- Bing, H., Zhou, J., Wu, Y., Wang, X., Sun, H., & Li, R. (2016). Current state, sources, and potential risk of heavy metals in sediments of Three Gorges Reservoir, China. *Environmental Pollution*, 214, 485–496. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.04.062>
- Boluda, R., Roca-Pérez, L., & Marimón, L. (2011). Soil plate bioassay: An effective method to determine ecotoxicological risks. *Chemosphere*, 84(1), 1–8.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.02.013>
- Screening Quick Reference Tables - Squirts, NOAA 34 (2008).
- Bundschuh, J., Schneider, J., Alam, M. A., Niazi, N. K., Herath, I., Parvez, F., Tomaszewska, B., Guilherme, L. R. G., Maity, J. P., López, D. L., Cirelli, A. F., Pérez-Carrera, A., Morales-Simfors, N., Alarcón-Herrera, M. T., Baisch, P., Mohan, D., & Mukherjee, A. (2021). Seven potential sources of arsenic pollution in Latin America and their environmental and health impacts. *Science of the Total Environment*, 780.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146274>
- Bussing, W. A., & López S, M. I. (1977). Distribución y aspectos ecológicos de los peces de las cuencas hidrográficas de Arenal, Bebedero y Tempisque, Costa Rica. *International Journal of Tropical Biology and Conservation*, 25(1), 13–37.  
<https://doi.org/10.15517/rbt.v25i1.25842>
- Carías Vega, D., & Zamora Bolaños, E. (2009). Estudio de valoración económica por la posible afectación del Proyecto Hidroeléctrico Toro 3 sobre el Centro Turístico Recreo. *ICAP-Revista Centroamericana de Administración Pública*, 56–57, 389–418.
- Carvache-Franco, M., Carvache-Franco, W., Viquez-Paniagua, A. G., Carvache-Franco, O., & Pérez-Orozco, A. (2021). The role of motivations in the segmentation of ecotourism destinations: A study from costa rica. *Sustainability*, 13(17).  
<https://doi.org/10.3390/su13179818>
- Castillo-Muñoz, R. (2019). *Atlas geoquímico de Costa Rica* (1st ed.). EDiNexo.  
<https://www.ucr.ac.cr/noticias/2019/11/19/el-atlas-geoquimico-de-costa-rica-ya-es-una-realidad.html>
- Castro-González, N. P., Calderón-Sánchez, F., Moreno-Rojas, R., Tamariz-Flores, J. V., & Reyes-Cervantes, E. (2019). Heavy metals pollution level in wastewater and soils in the alto balsas

- sub-basin in tlaxcala and puebla, Mexico. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 35(2), 335–348. <https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.02.06>
- CATIE. (2016). *Informe final: PLAN DE GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO, ESTUDIO DE CASO CUENCA DEL RÍO ARENAL, CON EL FIN DE LOGRAR LA GESTIÓN INTEGRAL DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA.*
- Chacón, V. (2019, January 15). Herbicidas de libre distribución pueden ser cancerígenos. *Seminario Universidad*. <https://semanariouniversidad.com/pais/herbicidas-de-libre-distribucion-pueden-ser-cancerigenos/>
- Chakraborty, P., Sarkar, A., Vudamala, K., Naik, R., & Nath, B. N. (2015). Organic matter - A key factor in controlling mercury distribution in estuarine sediment. *Marine Chemistry*, 173, 302–309. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2014.10.005>
- Chen, H., Teng, Y., Lu, S., Wang, Y., & Wang, J. (2015). Contamination features and health risk of soil heavy metals in China. *Science of the Total Environment*, 512–513, 143–153. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.025>
- Chowdhury, S., Mazumder, M. A. J., Al-Attas, O., & Husain, T. (2016). Heavy metals in drinking water: Occurrences, implications, and future needs in developing countries. *Science of the Total Environment*, 569–570, 476–488. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.06.166>
- Córdoba, J. (2018, June 14). UCR revela que agua en la zona norte registran contaminación con agroquímicos. *Seminario Universidad*. <https://semanariouniversidad.com/pais/fuentes-de-agua-en-la-zona-norte-registran-contaminacion-con-agroquimicos/>
- Daniels, A. E., & Cumming, G. S. (2008). Conversion or conservation? Understanding wetland change in northwest Costa Rica. *Ecological Applications*, 18(1), 49–63. <https://doi.org/10.1890/06-1658.1>
- Defarge, N., Spiroux de Vendômois, J., & Séralini, G. E. (2018). Toxicity of formulants and heavy metals in glyphosate-based herbicides and other pesticides. *Toxicology Reports*, 5(December 2017), 156–163. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2017.12.025>
- Dong, W., Zhang, Y., & Quan, X. (2020). Health risk assessment of heavy metals and pesticides: A case study in the main drinking water source in Dalian, China. *Chemosphere*, 242, 125113. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125113>
- Elizondo-Alvarado, M. J. (2015a). Suelos de Costa Rica orden Andisol. In *Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnológica Agropecuaria*.

- Elizondo-Alvarado, M. J. (2015b). *Suelos de Costa Rica Orden Entisol: Vol. 2 ed.*  
<http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/Av-1822.PDF>
- Elizondo-Alvarado, M. J. (2015c). Suelos de Costa Rica orden inceptisol. In *Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnológica Agropecuaria.*  
<http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/Av-1825.PDF>
- Elizondo-Alvarado, M. J. (2016). Suelos de Costa Rica Orden Ultisol. In *Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnológica Agropecuaria.*  
<http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/Av-1604.PDF>
- Furcal-Beriguete, P., & Torres-Morales, J. L. (2020). Determinación de concentraciones de cadmio en plantaciones de Theobroma cacao L. en Costa Rica. *Tecnología En Marcha*, 33, 122–137. <https://doi.org/10.18845/tm.v33i1.5027>
- Gao, B., Gao, L., Xu, D., Zhang, M., Qu, X., & Li, Y. (2019). A novel method for evaluating the potential release of trace metals associated with rainfall leaching/runoff from urban soils. *Science of the Total Environment*, 664, 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.418>
- Guan, Q., Zhao, R., Wang, F., Pan, N., Yang, L., Song, N., Xu, C., & Lin, J. (2019). Prediction of heavy metals in soils of an arid area based on multi-spectral data. *Journal of Environmental Management*, 243(May), 137–143. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.109>
- Håkanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach. *Water Research*, 14(8), 975–1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
- Herrera-Murillo, J., Mora-Campos, D., Suarez-Serrano, A., Chaves-Villalobos, M., Salas-Jiménez, P., Gamboa-Jiménez, A., & Anchía-Leitón, D. (2019). Determinación de los niveles de arsénico presentes en sistemas de abastecimiento de agua de las regiones Chorotega y Huetar Norte de Costa Rica, América Central. *Revista Geográfica de América Central*, 4(61E), 101. <https://doi.org/10.15359/rgac.61-4.5>
- Herrera Núñez, J., Rodríguez Corrales, J., Coto Campos, J. M., Salgado Silva, V., & Borbón Alpizar, H. (2013). Evaluación de metales pesados en los sedimentos superficiales del río Pirro. *Tecnología En Marcha*, 26(1), 27–36. <https://doi.org/10.18845/tm.v26i1.1119>
- Hou, S., Zheng, N., Tang, L., Ji, X., & Li, Y. (2019). Effect of soil pH and organic matter content on heavy metals availability in maize (*Zea mays* L.) rhizospheric soil of non-ferrous metals smelting area. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(10).

<https://doi.org/10.1007/s10661-019-7793-5>

- Huang, Z., Liu, C., Zhao, X., Dong, J., & Zheng, B. (2020). Risk assessment of heavy metals in the surface sediment at the drinking water source of the Xiangjiang River in South China. *Environmental Sciences Europe*, 32(1). <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00305-w>
- Hübner, R., Brian Astin, K., & Herbert, R. J. H. (2009). Comparison of sediment quality guidelines (SQGs) for the assessment of metal contamination in marine and estuarine environments. *Journal of Environmental Monitoring*, 11(4), 713–722. <https://doi.org/10.1039/b818593j>
- Ibrahim, M. I. A., Mohamed, L. A., Mahmoud, M. G., Shaban, K. S., Fahmy, M. A., & Ebeid, M. H. (2019). Potential ecological hazards assessment and prediction of sediment heavy metals pollution along the Gulf of Suez, Egypt. *Egyptian Journal of Aquatic Research*, 45(4), 329–335. <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2019.12.003>
- ICE. (2019). *ARENAL, 40 AÑOS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA RENOVABLE*. <https://grupoiccr.com/40-anos-generar-electricidad-renovable/>
- Islam, M. S., Ahmed, M. K., Raknuzzaman, M., Habibullah -Al- Mamun, M., & Islam, M. K. (2015). Heavy metal pollution in surface water and sediment: A preliminary assessment of an urban river in a developing country. *Ecological Indicators*, 48, 282–291. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.08.016>
- Jeon, S. kyung. (2021). Assessment of metal contamination in sediments induced by small ships around lighters wharf in Southwest Korea. *Environmental Earth Sciences*, 80(18), 1–9. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09848-4>
- Jha, D. K., Dharani, G., Verma, P., Ratnam, K., Kumar, R. S., & Rajaguru, S. (2021). Evaluation of factors influencing the trace metals in Puducherry and Diu coasts of India through multivariate techniques. *Marine Pollution Bulletin*, 167(March), 112342. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112342>
- Jing, F., Chen, X., Yang, Z., & Guo, B. (2018). Heavy metals status, transport mechanisms, sources, and factors affecting their mobility in Chinese agricultural soils. *Environmental Earth Sciences*, 77(3), 1–9. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7299-4>
- Ke, X., Gui, S., Huang, H., Zhang, H., Wang, C., & Guo, W. (2017). Ecological risk assessment and source identification for heavy metals in surface sediment from the Liaohe River protected area, China. *Chemosphere*, 175, 473–481. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.02.029>

- Keshavarzi, A., & Kumar, V. (2019). Ecological risk assessment and source apportionment of heavy metal contamination in agricultural soils of Northeastern Iran. *International Journal of Environmental Health Research*, 29(5), 544–560. <https://doi.org/10.1080/09603123.2018.1555638>
- Kohlmann, B., Vásquez, D., Arroyo, A., & Springer, M. (2021). Taxonomic and Functional Diversity of Aquatic Macroinvertebrate Assemblages and Water Quality in Rivers of the Dry Tropics of Costa Rica. *Frontiers in Environmental Science*, 9(August), 1–19. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.660260>
- Kumar, V., Sharma, A., Kaur, P., Singh Sidhu, G. P., Bali, A. S., Bhardwaj, R., Thukral, A. K., & Cerda, A. (2019). Pollution assessment of heavy metals in soils of India and ecological risk assessment: A state-of-the-art. *Chemosphere*, 216, 449–462. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.10.066>
- Le Gall, M., Ayrault, S., Evrard, O., Lacey, J. P., Gateuille, D., Lefèvre, I., Mouchel, J. M., & Meybeck, M. (2018). Investigating the metal contamination of sediment transported by the 2016 Seine River flood (Paris, France). *Environmental Pollution*, 240, 125–139. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.04.082>
- Leão, L. P., Costa, R. D. V. F. Da, Leite, M. G. P., Júnior, H. A. N., & Fonseca, R. M. F. (2021). Distribution and assessment of trace elements contamination in sediments of conceição river basin, brazil. *Geosciences (Switzerland)*, 11(6), 1–16. <https://doi.org/10.3390/geosciences11060236>
- Lee, J. G., Hwang, J. Y., Lee, H. E., Kim, T. H., Choi, J. D., & Gang, G. J. (2019). Effects of food processing methods on migration of heavy metals to food. *Applied Biological Chemistry*, 62(1). <https://doi.org/10.1186/s13765-019-0470-0>
- Li, Y., Yu, Y., Yang, Z., Shen, Z., Wang, X., & Cai, Y. (2016). A comparison of metal distribution in surface dust and soil among super city, town, and rural area. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(8), 7849–7860. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5911-7>
- Liu, Y., Li, H., Cui, G., & Cao, Y. (2020). Water quality attribution and simulation of non-point source pollution load flux in the Hulan River basin. *Scientific Reports*, 10(1), 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59980-7>
- Lizano Rodríguez, O. (2019). El calentamiento global y su relación con el impacto en la pesquería en el Golfo de Nicoya, Costa Rica. *InterSedes*, 20(41), 190–207.

<https://doi.org/10.15517/isucr.v20i41.38837>

- Maanan, M., Saddik, M., Maanan, M., Chaibi, M., Assobhei, O., & Zourarah, B. (2015). Environmental and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Nador lagoon, Morocco. *Ecological Indicators*, *48*, 616–626. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.09.034>
- MacDonald, D. D., Ingersoll, C. G., & Berger, T. A. (2000). Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, *39*(1), 20–31. <https://doi.org/10.1007/s002440010075>
- Mao, L., Liu, L., Yan, N., Li, F., Tao, H., Ye, H., & Wen, H. (2020). Factors controlling the accumulation and ecological risk of trace metal(loid)s in river sediments in agricultural field. *Chemosphere*, *243*, 125359. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125359>
- Marrugo-Negrete, J., Pinedo-Hernández, J., & Díez, S. (2017). Assessment of heavy metal pollution, spatial distribution and origin in agricultural soils along the Sinú River Basin, Colombia. *Environmental Research*, *154*(January), 380–388. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.01.021>
- Martínez Mera, E. A., Espinosa-Torregroza, A. C., Crissien Borrero, T. J., Marrugo Negrete, J. L., & González Márquez, L. C. (2019). Evaluation of contaminants in agricultural soils in an Irrigation District in Colombia. *Heliyon*, *5*(8). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02217>
- Meynell, P. J., Metzger, M., & Stuart, N. (2021). Identifying ecosystem services for a framework of ecological importance for rivers in south east asia. *Water*, *13*(11). <https://doi.org/10.3390/w13111602>
- Mi Kim, B. S., Friedmann Angeli, J. L., Lima Ferreira, P. A., Michaelovich de Mahiques, M., & Lopes Figueira, R. C. (2018). Critical evaluation of different methods to calculate the Geoaccumulation Index for environmental studies: A new approach for Baixada Santista – Southeastern Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, *127*(December 2017), 548–552. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.12.049>
- Montalvo, C., Aguilar, C. A., Amador, L. E., Ceron, J. G., Ceron, R. M., Anguebes, F., & Cordova, A. V. (2014). Metal Contents in Sediments (Cd, Cu, Mg, Fe, Mn) as Indicators of Pollution of Palizada River, Mexico. *Environment and Pollution*, *3*(4), 89–98. <https://doi.org/10.5539/ep.v3n4p89>
- Mora-Alvarado, D., Urbina-Campos, A., & Chamizo-García, H. (2015). Estudio ecológico sobre

- insuficiencia renal crónica y arsénico en las aguas para consumo humano por distritos en Guanacaste. *Tecnología En Marcha*, 28(2), 102–115. <https://doi.org/10.18845/tm.v28i2.2337>
- Mora Rojas, J. (2016). *El río Tempisque, un gigante que muere en silencio en Costa Rica*. Latinclima. <https://latinclima.org/articulos/el-rio-tempisque-un-gigante-que-muere-en-silencio-en-costa-rica>
- Mukate, S. V., Panaskar, D. B., Wagh, V. M., & Baker, S. J. (2020). Understanding the influence of industrial and agricultural land uses on groundwater quality in semiarid region of Solapur, India. In *Environment, Development and Sustainability* (Vol. 22, Issue 4). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00342-3>
- Municipalidad de San Carlos. (2020). *Datos Generales*. <https://www.munisc.go.cr/Paginas/Visitantes/DatosGenerales.aspx>
- Navarrete-Rodríguez, G., Castañeda-Chávez, M. del R., & Lango-Reynoso, F. (2020). Geoaccumulation of Heavy Metals in Sediment of the Fluvial – Lagoon – Deltaic System of the Palizada River, Campeche, Mexico. *International Journal of Environmental Reseach and Public Health*, 17(969).
- Pejman, A., Nabi Bidhendi, G., Ardestani, M., Saeedi, M., & Baghvand, A. (2015). A new index for assessing heavy metals contamination in sediments: A case study. *Ecological Indicators*, 58, 365–373. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.06.012>
- Pereira Cabral, J. B., Ferreira Oliveira, S., Ferreira dos Santos, F., Becegato, V. A., Becegato, V. R., & Paulino, A. T. (2021). Potentially toxic metal environmental pollution in sediments of a model hydroelectric plant water reservoir in Brazil. *Environmental Earth Sciences*, 80(16), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09808-y>
- Converio de Minamata sobre el Mercurio, 73 (2019). [https://www.mercuryconvention.org/sites/default/files/documents/information\\_document/Minamata-Convention-booklet-Sep2019-SP.pdf](https://www.mercuryconvention.org/sites/default/files/documents/information_document/Minamata-Convention-booklet-Sep2019-SP.pdf)
- Rani, S., Ahmed, M. K., Xiongzi, X., Keliang, C., Islam, M. S., & Habibullah-Al-Mamun, M. (2021). Occurrence, spatial distribution and ecological risk assessment of trace elements in surface sediments of rivers and coastal areas of the East Coast of Bangladesh, North-East Bay of Bengal. *Science of the Total Environment*, 801, 149782. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149782>
- RECOPE. (2016). *Gasolina sin plomo desde hace dos décadas*.

<https://www.recope.go.cr/gasolina-sin-plomo-desde-hace-dos-decadas/>

- Ren, Z., Xiao, R., Zhang, Z., Lv, X., & Fei, X. (2019). Risk assessment and source identification of heavy metals in agricultural soil: a case study in the coastal city of Zhejiang Province, China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, *33*(11–12), 2109–2118. <https://doi.org/10.1007/s00477-019-01741-8>
- Rodríguez Barrientos, F. (2005). Uso del suelo, prácticas culturales, sistemas productivos y sostenibilidad en las fincas de la subcuenca del río Tres Amigos, cuenca del río San Carlos. *Revista Pensamiento Actual (San José)*, *5*(6), 23–31.
- Salazar Matarrita, A., Cubero Campos, M., & Durán Jiménez, B. (2019). Movilidad de metales del suelo al pasto en la región norte de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, *44*(1), 123–132. <https://doi.org/10.15517/rac.v44i1.40018>
- Santana Costa, H., Tejerina-Garro, F. L., & Rocha, C. (2017). Trace elements: water-sediment interactions in tropical rivers. *Environmental Science and Pollution Research*, *24*(27), 22018–22025. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9698-6>
- Serrano, A. S., Garro, Á. B., Sanabria, G. D., Conejo, J. R., Cantillano, D. R., & Watson, A. G. (2019). Seguridad hídrica: Gestión del agua en comunidades rurales del Pacífico Norte de Costa Rica. *Revista de Ciencias Ambientales*, *53*(2), 25–46. <https://doi.org/10.15359/rca.53-2.2>
- Snousy, M. G., Morsi, M. S., Elewa, A. M. T., Ahmed, S. A. E. fattah, & El-Sayed, E. (2020). Groundwater vulnerability and trace element dispersion in the Quaternary aquifers along middle Upper Egypt. *Environmental Monitoring and Assessment*, *192*(3). <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8109-5>
- Sojka, M., Siepak, M., Jaskuła, J., & Wicher-Dysarz, J. (2018). Heavy metal transport in a river-reservoir system: A case study from central Poland. *Polish Journal of Environmental Studies*, *27*(4), 1725–1734. <https://doi.org/10.15244/pjoes/76916>
- Song, Y., & Choi, M. S. (2017). Assessment of heavy metal contamination in sediments along the coast of South Korea using Cs-normalized background concentrations. *Marine Pollution Bulletin*, *117*(1–2), 532–537. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.02.019>
- Sungur, A., Soylak, M., Yilmaz, E., Yilmaz, S., & Ozcan, H. (2015). Characterization of Heavy Metal Fractions in Agricultural Soils by Sequential Extraction Procedure: The Relationship Between Soil Properties and Heavy Metal Fractions. *Soil and Sediment Contamination*, *24*(1),

1–15. <https://doi.org/10.1080/15320383.2014.907238>

- Taylor S.R. (1964). Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 28, 1273–1285.
- Trujillo-González, J. M., Torres-Mora, M. A., Keesstra, S., Brevik, E. C., & Jiménez-Ballesta, R. (2016). Heavy metal accumulation related to population density in road dust samples taken from urban sites under different land uses. *Science of the Total Environment*, 553, 636–642. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.101>
- Vargas-González, H. H., Arreola-Lizárraga, J. A., García-Hernández, J., Mendoza-Salgado, R. A., Zenteno-Savín, T., & Méndez-Rodríguez, L. C. (2017). Calidad de sedimentos asociada a actividades antrópicas en lagunas costeras semiáridas subtropicales de la costa central este del Golfo de California. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 33(Special Issue 1), 7–22. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.esp02.01>
- Verma, F., Singh, S., Singh, J., Singh Dhaliwal, S., Parkash, C., Kumar, V., & Kumar, R. (2021). Assessment of heavy metal contamination and its effect on earthworms in different types of soils. *International Journal of Environmental Science and Technology*, Bouché 1977. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03297-z>
- Vieira, L. M., Rizzi, J., V. do Couto, E., Souza, D. C., Ferreira, P. A. L., Figueira, R., & Froehner, S. (2019). Historical Pollution of an Urban Watershed Based in Geochemical, Geoaccumulation, and EROD Activity in PLHC-1 Analyses in Sediment Cores. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 76(2), 191–205. <https://doi.org/10.1007/s00244-018-0573-3>
- Wang, G., Hu, X., Zhu, Y., Jiang, H., & Wang, H. (2018). Historical accumulation and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of a drinking water lake. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(25), 24882–24894. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2539-4>
- Xie, W., Peng, C., Wang, H., & Chen, W. (2018). Bioaccessibility and source identification of heavy metals in agricultural soils contaminated by mining activities. *Environmental Earth Sciences*, 77(17), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7783-x>
- Zhang, Y., Li, H., Yin, J., & Zhu, L. (2021). Risk assessment for sediment associated heavy metals using sediment quality guidelines modified by sediment properties. *Environmental Pollution*, 275, 115844. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115844>
- Zhang, Z., Juying, L., Mamat, Z., & QingFu, Y. (2016). Sources identification and pollution

evaluation of heavy metals in the surface sediments of Bortala River, Northwest China.  
*Ecotoxicology and Environmental Safety*, 126, 94–101.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.12.025>



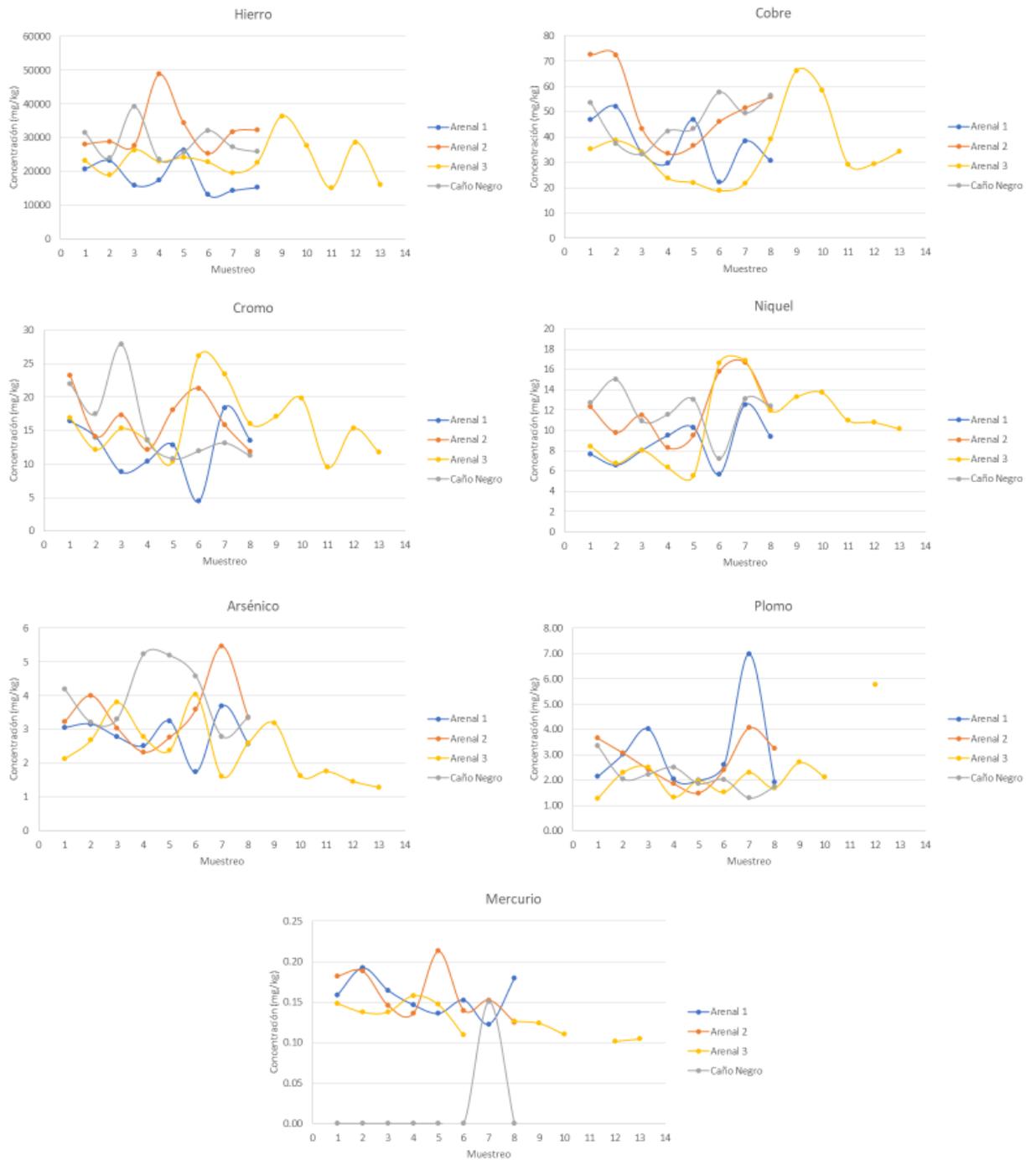
## 8. APÉNDICES

**Apéndice 1: Tabla comparativa entre los valores de fondo propios y los valores de fondo de la NOAA.**

**Tabla 8.1.** Razones entre los valores de fondo propios y los de la NOAA.

<b>Río</b>	<b>As</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>Hg</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>
<b>Arenal</b>	4.04	1.12	2.28	1.61	NA	0.86	0.27
<b>Tres Amigos</b>	10.48	0.81	2.28	2.83	2.74	0.97	0.57
<b>Toro</b>	4.66	0.63	2.40	2.07	NA	0.91	0.26
<b>Tempisque</b>	2.55	1.29	1.20	0.84	NA	1.31	0.30
<b>Promedio</b>	5.43	0.96	2.04	1.84	NA	1.01	0.35

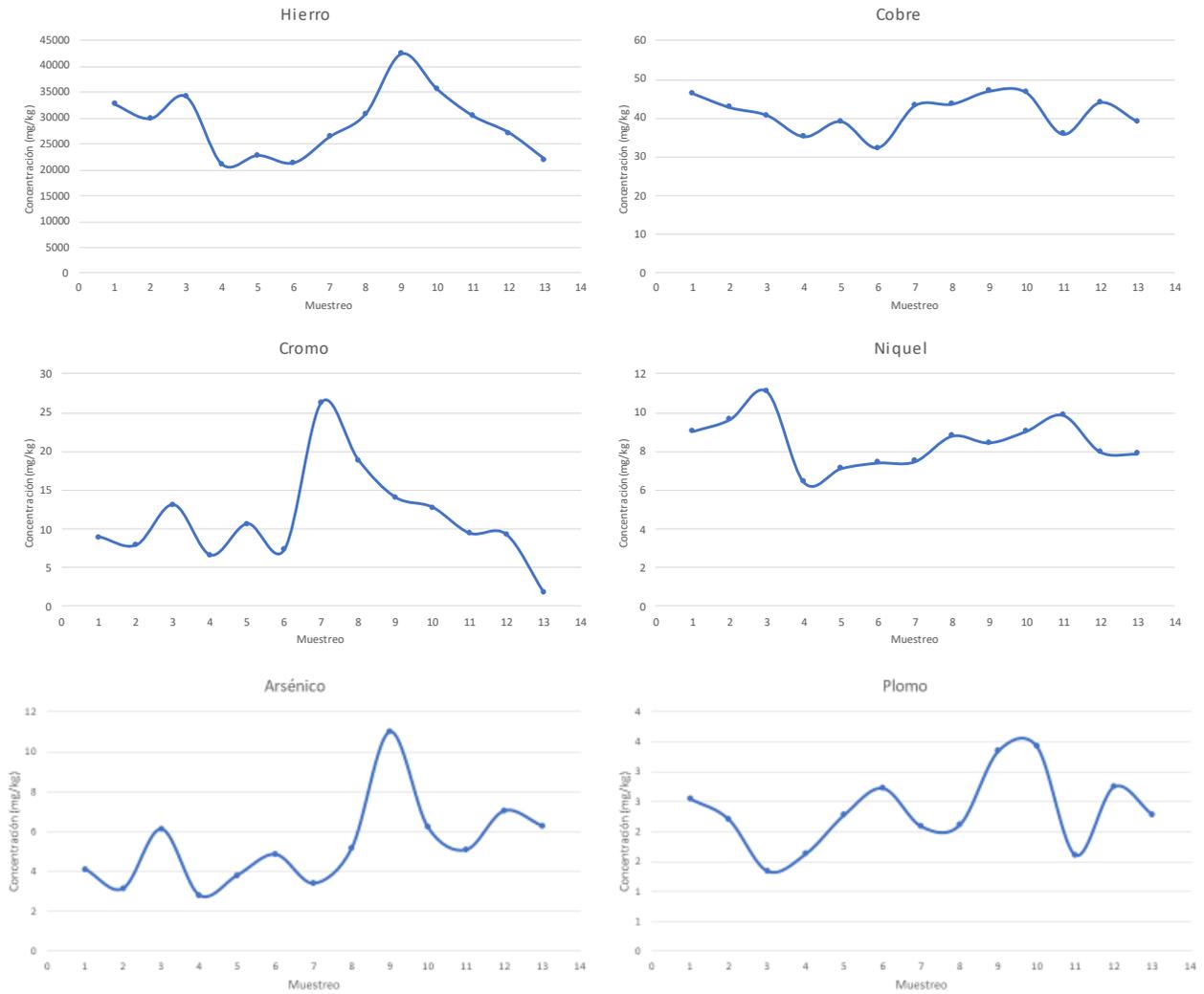
## Apéndice 2: Distribución de las concentraciones para los ríos estudiados.



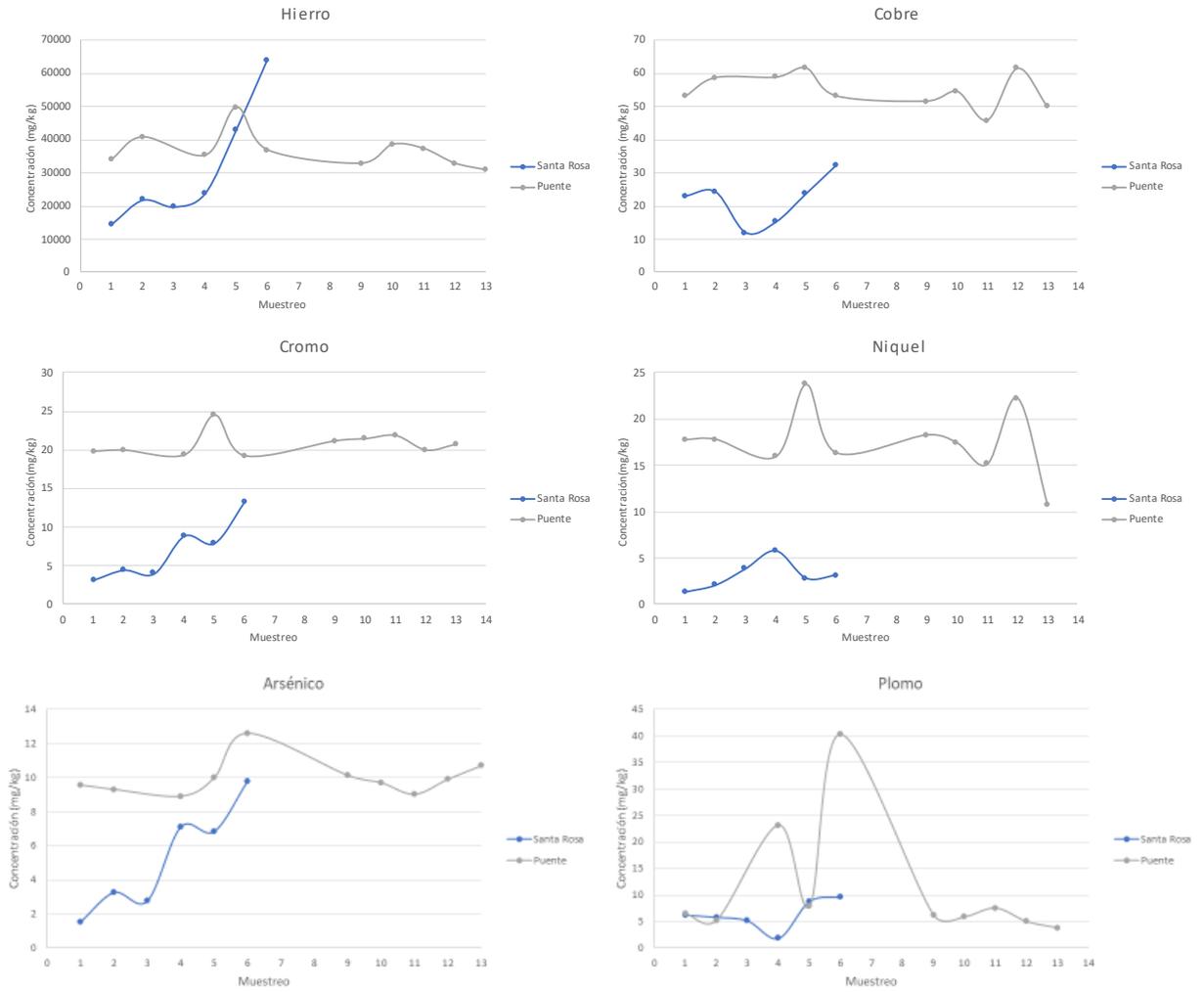
**Figura 8.1.** Distribución de las concentraciones de MP a lo largo de los muestreos para el Río Arenal.



**Figura 8.2.** Distribución de las concentraciones de MP a lo largo de los muestreos para el Río Tres Amigos.



**Figura 8.3.** Distribución de las concentraciones de MP a lo largo de los muestreos para el Río Tres Amigos

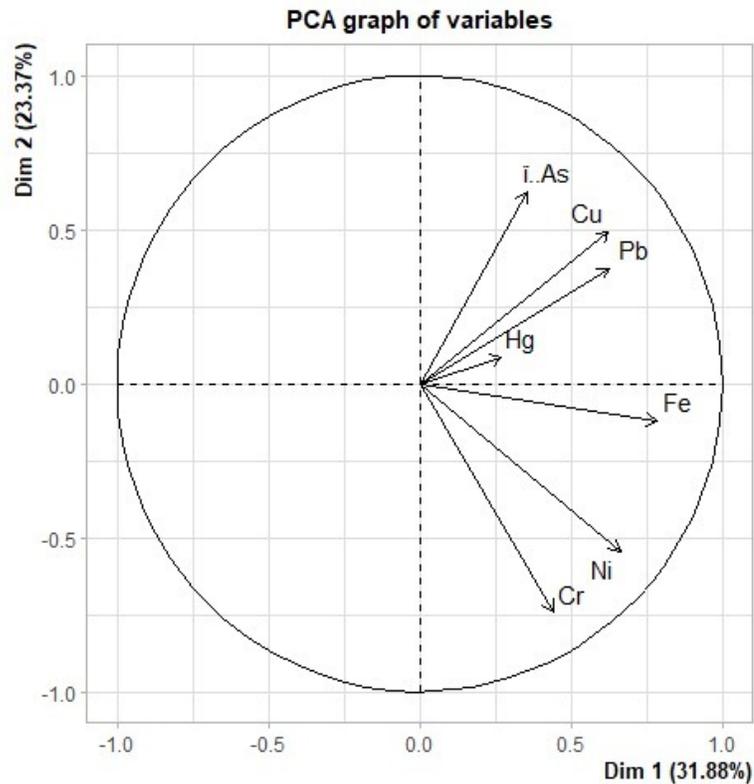


**Figura 8.4.** Distribución de las concentraciones de MP a lo largo de los muestreos para el Río Tempisque.

### Apéndice 3. Resultados PCA realizados

**Tabla 8.2.** Matriz de componentes rotados para parámetros estudiados en los sedimentos de la zona norte.

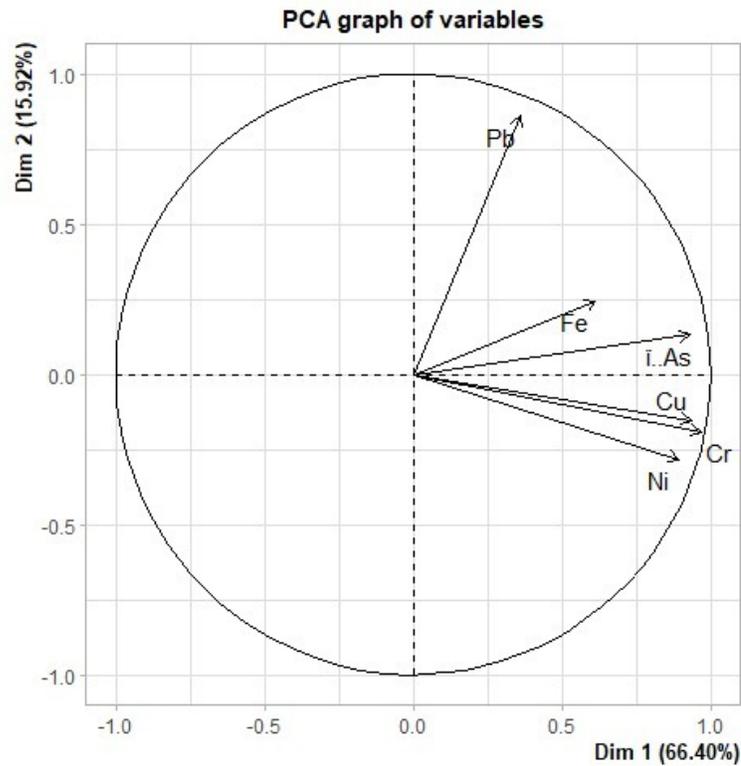
	Componente		
	PC1 o Dim 1	PC2 o Dim 2	PC3 o Dim 3
As	0.238	0.485	0.385
Cr	0.295	-0.579	0.025
Cu	0.418	0.384	0.031
Fe	0.525	-0.097	0.163
Ni	0.444	-0.427	0.111
Pb	0.419	0.293	-0.210
Hg	0.419	0.069	-0.876
Valor propio	2.2326	1.6362	1.0316
Varianza total (%)	0.319	0.234	0.147
Varianza acumulada (%)	0.319	0.553	0.700



**Figura 8.5.** Círculo de correlaciones para la zona norte.

**Tabla 8.3.** Matriz de componentes rotados para parámetros estudiados en los sedimentos del pacífico norte.

	Componente	
	PC1 o Dim 1	PC2 o Dim 2
As	0.465	0.134
Cr	0.485	-0.194
Cu	0.470	-0.156
Fe	0.307	0.247
Ni	0.488	-0.291
Pb	0.182	0.880
Valor propio	3.9843	0.9554
Varianza total (%)	0.664	0.159
Varianza acumulada (%)	0.664	0.823



**Figura 8.6.** Círculo de correlaciones para el pacífico norte.

## 9. ANEXOS

### Anexo 1. Plaguicidas de venta libre en el país con posible contenido de Metales Pesados.

**Tabla 9.1.** Metales encontrados a nivel internacional en diferentes plaguicidas de venta libre en Costa Rica.

<b>Cultivo</b>	<b>Marca Comercial</b>	<b>Componentes</b>	<b>Posibles Metales</b>
<b>Piña, Naranja y Arroz</b>	PYRINEX 48 EC // Keton 48 EC RIMAXATO 35.6 SL //	Clorpirifós	Arsénico, Cromo y Níquel
<b>Piña, Caña de Azúcar y Arroz</b>	Cañaxato 35.6 SL // Green Go Glifosato 35.6 SL // Glyphogan 35.3	Glifosato	Arsénico, Cobalto y Cromo
<b>Piña, Caña de Azúcar y Arroz</b>	Roundup 35.6 SL	Glifosato	Níquel
<b>Piña y Arroz</b>	EVIGRAS 35.6 SL	Glifosato	Níquel
<b>Caña de Azúcar</b>	FOLPAN 48 SC	Folpet	Arsénico, Cromo y Níquel
<b>Caña de azúcar</b>	Roundup Max 68 SG	Glifosato	Níquel
<b>Arroz</b>	Opus 12.5 SC	Epoconazol	Cromo y Níquel