

**EVALUACIÓN DEL RIESGO AMBIENTAL ASOCIADO A METALES EN LOS
SEDIMENTOS DE LA CUENCA ALTA Y BAJA DEL RÍO SORORIA UBICADO
EN LA JAGUA DE IBIRICO - CESAR**



**SANDRA MILENA CAMPO DUQUE
MARÍA FERNANDA MARTÍNEZ MURGAS**

**UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLÓGICAS
INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
VALLEDUPAR, CESAR**

2019

**EVALUACIÓN DEL RIESGO AMBIENTAL ASOCIADO A METALES EN LOS
SEDIMENTOS DE LA CUENCA ALTA Y BAJA DEL RÍO SORORIA UBICADO
EN LA JAGUA DE IBIRICO - CESAR**



**SANDRA MILENA CAMPO DUQUE
MARÍA FERNANDA MARTÍNEZ MURGAS**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de Ingeniero
Ambiental y Sanitario**

DIRECTOR:

YIM JAMES RODRÍGUEZ DÍAZ

CODIRECTOR:

LUIS HERNANDO MONTOYA ARMENTA

**UNIVERSIDAD POPULAR DEL CESAR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLÓGICAS
INGENIERÍA AMBIENTAL Y SANITARIA
VALLEDUPAR, CESAR**

2019

NOTA DE ACEPTACIÓN: _____

PRESIDENTE DEL JURADO: _____

JURADO 1: _____

JURADO 2: _____

FECHA: _____

AGRADECIMIENTOS

Mis agradecimientos van dirigidos en primer lugar a Dios, por ser la luz y guiarnos en este camino de aprendizaje, proporcionándonos la sabiduría necesaria para llegar a la meta; usando como canal a mis maestros a quien también quiero expresarles mi gratitud, a los Ingenieros Yim Rodríguez y Luis Montoya, quien con entrega desmedida fueron parte indispensable en el desarrollo de este trabajo, dejando una huella imborrable en nuestros corazones.

Gracias a mi amiga y compañera de proyecto María Fernanda por su comprensión y esfuerzo, me enseñaste el valor que tiene la paciencia. No hubiera sido posible llevar a cabo una investigación profunda sin las instituciones que nos prestaron sus instalaciones. A la Universidad Popular del Cesar y al laboratorio de Toxicología Ambiental en la Universidad de Córdoba por su aporte esencial.

Finalmente, por quienes he aprendido a luchar y seguir adelante, quienes me han apoyado y me han regalado la esencia del amor: mis padres Inés Beatriz Duque y Jhon Hurtado, gracias por ser mi fuerza, mi motor y mi sustento.

Sandra Milena Campo Duque

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia quiero agradecer a Dios, por mostrarnos su disciplina y orden, resaltando lo esencial que es el amor, sin él todo es vano. En este proceso no ha sido casualidad encontrarme con personas a quien quiero agradecerles por su compromiso y entrega, a nuestros maestros gracias por ser el manantial de sabiduría, a los Ingenieros Yim Rodríguez y Luis Montoya, gracias por entregar sus conocimientos, tiempo, experiencia y sobre todo motivarme a seguir adelante depositando su confianza en mí, han dejado una huella inconfundible en mi vida que va más allá de los límites profesionales.

Quiero agradecerle a mi amiga y compañera de proyecto Sandra Campo, me siento complacida no solo por esta experiencia sino por tu preciosa amistad. A las instituciones que hicieron posible el desarrollo de esta investigación: Universidad Popular del Cesar por entregarnos 5 años de esfuerzo y crecimiento académico y al Laboratorio de Toxicología Ambiental en la Universidad de Córdoba por su aporte esencial en este trabajo.

La motivación de mi vida ha sido mi familia, a ellos quiero agradecerle por su paciencia, esfuerzo y por todos los valores enseñados; a mi padre José Julián Martínez por ser mi guía y mi motor y a mi madre Pierina Murgas por ser mi sustento, sin ustedes no hubiera sido posible culminar este proceso.

María Fernanda Martínez Murgas

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	8
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
2. JUSTIFICACION	11
3. OBJETIVOS	13
3.1 OBJETIVO GENERAL	13
3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	13
4. MARCO REFERENCIAL	14
4.1 ANTECEDENTES	14
4.2 MARCO TEÓRICO	18
4.2.1 Metales	18
4.2.2 Limitaciones de la evaluación de riesgos ambientales	18
4.2.3 Toxicidad de los metales	19
4.2.5 Transporte y vías de entrada de los metales en el medio ambiente	23
4.2.5 Utilidades de la evaluación de riesgos ambientales	24
4.2.6 Índices ambientales	25
4.2.6.1 Factor de enriquecimiento	25
4.2.6.3 Índice de carga contaminante (PLI)	25
4.2.6.4 Comparación de los valores de concentración de efecto limite (TEC) y concentración de efecto probable (PEC)	26
4.2.6.5 Índice de riesgo ecológico potencial	26
4.2.6.6 Índices de toxicidad ERMQ y PELQ	27
4.3 MARCO CONCEPTUAL	28
4.4 MARCO CONTEXTUAL	30
4.5 MARCO LEGAL	33
5. METODOLOGÍA	38
5.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN	38
5.2 POBLACIÓN Y MUESTRA	38
5.3 DESARROLLO METODOLÓGICO	38
5.3.1 TRABAJO DE CAMPO	38

5.3.2 TRABAJO DE LABORATORIO	40
5.3.3 TRATAMIENTO DE DATOS	42
5.3.3.2 Cálculo de indicadores de contaminación en los sedimentos	43
6. RESULTADOS Y ANÁLISIS	49
6.2 Características de los sedimentos y la columna de agua	49
6.2.1 Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos	49
6.2.2 Características granulométricas	52
6.2.3 Concentración de metales pesados	53
6.3 Valores permisibles para metales en sedimentos establecidos por las Guías de Calidad Ambiental Canadiense (CEQG).....	54
6.4 Indicadores de contaminación en los sedimentos	56
6.4.1 Factor de enriquecimiento	56
6.4.2 Índice de carga contaminante	59
6.4.3 Índice de toxicidad ERMQ	60
6.4.4 Índice de toxicidad PELQ	61
6.4.5 Índice de riesgo ecológico potencial.....	62
6.5 Análisis estadístico	62
6.5.1 Correlación de Pearson.....	62
6.5.2 Análisis de Componentes Principales (ACP).....	67
7. CONCLUSIONES	73
8. RECOMENDACIONES	76
BIBLIOGRAFÍA	77

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Pautas canadienses de calidad de sedimentos para la protección de la vida acuática.....	36
Tabla 2. Screening Quick Reference Table for Inorganics in Freshwater Sediment.....	37
Tabla 3. Recolección de sedimentos.....	39
Tabla 4. Valores de referencia del factor de enriquecimiento.....	44
Tabla 5. Valores de referencia en ($\mu\text{g g}^{-1}$) de los índices ERM.....	45
Tabla 6. Interpretación del índice de toxicidad ERMQ.....	46
Tabla 7. Interpretación del índice de toxicidad PELQ.....	46
Tabla 8. Concentración de fondo de metales de fondo.....	47
Tabla 9. Coeficientes de toxicidad T_i para metales pesados.....	48
Tabla 10. Riesgo ecológico potencial de metales pesados.....	48
Tabla 11. Resultados del porcentaje de materia orgánica.....	49
Tabla 12. Resultados del pH.....	50
Tabla 13. Resultados de coliformes totales.....	51
Tabla 14. Resultados de la Conductividad Eléctrica.....	52
Tabla 15. Resultados de las características granulométricas.....	53
Tabla 16. Resultados de la concentración de los metales.....	54
Tabla 17. Valores permisibles según ISQG y PEL.....	55
Tabla 18. Factor de enriquecimiento.....	57
Tabla 19. Índices de cargas contaminantes.....	59
Tabla 20. Índices de toxicidad ERMQ.....	60
Tabla 21. Índices de toxicidad PELQ.....	61
Tabla 22. Índices de riesgo ecológico.....	62
Tabla 23. Correlación de Pearson.....	63
Tabla 24. Varianza total explicada de los parámetros analizados.....	68
Tabla 25. Matriz de componentes rotados de los parámetros analizados.....	69

LISTA DE ILUSTRACIONES

	Pág.
Ilustración 1. Ubicación del departamento del Cesar, Colombia.....	30
Ilustración 2. Ubicación de la Jagua de Ibirico, Cesar.....	31
Ilustración 3. Ubicación del río Sororia, Cesar.....	31
Ilustración 4. Análisis de componentes principales basado en las correlaciones entre los factores I - II.	70
Ilustración 5. Análisis de componentes principales basado en las correlaciones entre los factores II – III.	71
Ilustración 6. Análisis de componentes principales basado en las correlaciones entre los factores I – III.	72

INTRODUCCIÓN

Muchos de los metales que ingresan a un cuerpo de agua superficial, provienen en gran medida de fuentes antropogénicas, como desechos domésticos, agrícolas e industriales y constituyen un peligro para la biota acuática y el ser humano, así como un factor de deterioro ambiental. Estos contaminantes se acumulan principalmente en los sedimentos superficiales de los ríos, aunque pueden encontrarse concentraciones relativamente elevadas a una profundidad de 15 cm (Acosta et al., 2002).

Este proyecto se desarrolló en el río Sororia, el cual está ubicado en el municipio de la Jagua de Ibirico y hace parte de la cuenca del río Cesar; en este río existe contaminación de origen antrópico, debido a los residuos provenientes de la explotación carbonífera en el área cercana al municipio y al uso de sus aguas para cultivos industriales los cuales usan insumos tóxicos (PBOT, 2000); este panorama es determinante para inferir la presencia de metales pesados en la columna de agua y sedimentos del río. Debido a este cuadro que se presenta, la información que proporciona la evaluación de riesgo puede apoyar decisiones de control ambiental, evaluar y jerarquizar la importancia ambiental de una medida, así como estimar cuantitativamente los daños a la salud humana o a los ecosistemas derivados de la exposición a un contaminante ambiental (Ize et al., 2010).

El objetivo de esta investigación es evaluar el riesgo ambiental que está asociada con los metales (Níquel, Cobre, Hierro, Cromo, Zinc, Cadmio, Aluminio, Arsénico y Plomo) presentes en los sedimentos del río, lo cual se realizó mediante los cálculos de los siguientes indicadores: concentración de efecto límite, concentración de efecto probable, índice de cargas contaminantes, factor de contaminación, índice de riesgo ecológico potencial, factor de enriquecimiento y el índice de toxicidad ERMQ.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La subcuenca del río Sororia está ubicada en el municipio de la Jagua de Ibirico, departamento del Cesar; se conforma desde su parte más alta de las quebradas Sororia norte y Sororia sur, y recibe en el transcurso de su recorrido afluentes importantes como los caños Manizales, Pojuiles, Caudaloso, Santiago y María Rosario, este último es muy cercano al municipio de la jagua de Ibirico (Consortio Calenturitas, 2016).

Concretamente el problema de los metales pesados es que no pueden ser degradables y, una vez depositados, permanecerán en el medio acuático prácticamente sin ningún cambio cualitativo. La gran importancia de este grupo de elementos sobre el medio ambiente radica en su resistencia a la biodegradación, su tendencia a la bioacumulación en los organismos y, en ciertos casos, a su elevada toxicidad a bajas concentraciones, constituyendo, por tanto, un riesgo muy destacado para la flora y la fauna (El Mai, 2013).

Por otra parte, la contaminación por metales constituye un serio problema de salud para las poblaciones que se sirven de dichos ríos, lo cual implica elevar los gastos en tratamientos médicos, disminución de la capacidad productiva de la comunidad y desde luego repercusiones económicas a nivel local y nacional (Contreras et al., 2004).

Por último, según el Consortio Calenturitas (2016), la contaminación en el río Sororia se debe principalmente a la confluencia de nuevos proyectos mineros en la parte baja de la subcuenca del río Sororia; por otra parte, la calidad del agua en el río Sororia desde la Mina Cerro Largo a la unión con el río Tucuy es regular a mala. En el tramo que va desde la unión del río Sororia con el río Tucuy y de éste con el río Maracas la calidad es regular. También en la parte baja de la cuenca: Río Calenturitas, la calidad del agua es regular a aceptable.

Partiendo de lo planteado anteriormente, la pregunta de investigación es la siguiente: ¿Qué riesgos ambientales se pueden asociar a la concentración de metales (Ni, Cu, Fe, Cr, Zn, Cd, Al, As y Pb) en los sedimentos del río Sororia?

2. JUSTIFICACION

Las metodologías empleadas en la evaluación de riesgos, son un elemento esencial para contar con criterios objetivos que permitan integrar una política ambiental nacional respecto de las sustancias peligrosas, tomando en cuenta la dimensión de los problemas asociados con su manejo, poniendo estos problemas en perspectiva respecto de otros problemas ambientales empleando términos comunes de comparación y con un enfoque basado en prioridades al establecer planes para su control y asignar presupuestos para su ejecución.

Según Contreras (2014), es importante considerar, que elevadas concentraciones de dichos metales en el organismo de los seres vivos alteran los procesos bioquímicos y fisiológicos ocasionando diversas patologías en el ser humano y en los animales; por tanto, los principales beneficiarios de este estudio serían los habitantes de la cabecera municipal de la Jagua de Ibirico y los de la vereda San Isidro ya que la fuente de abastecimiento del acueducto es el río Sororia.

Es preciso mencionar que en Colombia no hay norma que establezca el valor máximo permisible de metales presentes en los sedimentos, por lo cual en esta investigación los resultados no se pueden comparar con una norma colombiana, en este sentido, es preciso desarrollar estudios que evalúen el comportamiento de los metales pesados asociados con el sedimento viario y los efectos sobre la salud a partir de las concentraciones metálicas detectadas. De esta manera se podrá tener un punto de partida para el establecimiento de normas de regulación para este tipo de contaminantes.

Esta información servirá de línea base para el conocimiento científico del área de estudio y permitirá sustentar los niveles de contaminación por metales pesados de la cuenca alta y baja del río Sororia; iniciar programas de evaluación de riesgos ambientales que permita prevenir y minimizar posibles efectos que se puedan

presentar, implementar planes de gestión y manejo ambiental por parte de las autoridades gubernamentales y de las Corporaciones Autónomas Regionales correspondientes al área de influencia, evitando consecuencias negativas sobre el entorno natural, humano y socioeconómico.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el riesgo ambiental asociado a metales en los sedimentos de la cuenca alta y baja del río Sororia ubicado en la Jagua de Ibirico, Cesar.

3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

Determinar la concentración de metales (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Al, Fe), y las características fisicoquímicas y granulométricas presentes en los sedimentos de la cuenca alta y baja del río Sororia.

Identificar la incidencia de los parámetros fisicoquímicos y granulométricos de los sedimentos sobre la concentración de metales.

Determinar el riesgo ambiental por metales pesados utilizando indicadores de contaminación (índice de cargas contaminantes, índice de riesgo ecológico potencial, factor de enriquecimiento y el índice de toxicidad ERMQ y PELQ).

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 ANTECEDENTES

Ortiz, Delgado, Pardo, Murillo y Guio, (2015). Determinación de metales pesados e índices de calidad en aguas y sedimentos del río Magdalena – tramo Tolima, Colombia.

Este trabajo centró su interés en evaluar en época lluviosa y en período seco la concentración de elementos mayores (Na, K, Ca, Mg) y de metales pesados (Cd, Cr, Pb, Hg), en las aguas y sedimentos del río Magdalena, considerado como la más importante arteria fluvial de Colombia. La cuantificación de estas entidades químicas se realizó a través de espectroscopia de absorción atómica. Un análisis por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas sirvió para reconocer la presencia de pesticidas organoclorados en dichas matrices del río, en su paso por los municipios de Purificación, Flandes, Ambalema y Honda, considerados como de mayor importancia pesquera en el departamento del Tolima. Se encontró que los atributos de calidad y contaminación del agua en todos los puntos muestreados evidenciaron un agua poco recomendable para el consumo humano, al plomo como el mayor contaminante de éstas, al índice de contaminación por sólidos suspendidos (ICOSUS) como el indicador de contaminación de mayor relevancia en Flandes, Ambalema y Honda. Los sedimentos del río deben ser tenidos en cuenta como grandes reservorios de información de la calidad del cuerpo de agua. Esta investigación se convierte en un punto de apoyo importante para posteriores estudios sobre monitoreo, biorremediación y toma de medidas integrales para la protección ambiental del río Magdalena.

Espitia (2014) Determinación de metales pesados en sedimentos superficiales en cuerpos de agua del canal del Dique en las poblaciones de Gambote y Soplaviento (Bolívar).

Los metales pesados muchas veces se encuentran en depósitos de sedimentos como contaminantes de las aguas. Por dicha razón en presente estudio se llevó a cabo la determinación de metales pesados (Hg, Cd, Pb, Cr, Ni, Fe), en sedimentos superficiales en Cuerpos de Agua del Canal del Dique, (brazo artificial del Río Magdalena) mediante el método de digestión suave, empleando la metodología de Chester y Voutsinou, encontrándose niveles normales de dichos metales en estos cuerpos de agua, pese a tener aportes del río Magdalena, y a estar con influencia de zonas mineras. Se halló un nivel ligeramente superior de Níquel en la Ciénaga Grande de Lorica (sitio control, sin fuentes antropogénicas de contaminación por metales pesados) con relación a los demás puntos de muestreo debido a que es un sitio rico en Níquel, pero sus valores están dentro de los valores permisibles, por lo demás es un buen sitio para utilizarlo como control de los demás metales, el Plomo no fue detectado mediante el empleo de esta metodología.

Montoya, L. H. (2013). Efectos de las crecidas en el transporte de material particulado y contaminantes asociados: aplicación al caso del río Oka (Urdanivia), País Vasco.

El objetivo principal de esta investigación fue estudiar los efectos de los eventos de crecidas en el transporte de material particulado y la degradación de la calidad fisicoquímica del agua y sedimentos en la cuenca del río Oka (España), durante los años hidrológicos de 2009 a 2012. Esta investigación realizó gran hincapié en la determinación del riesgo ambiental de estos metales presentes en los sedimentos de fondo, a partir del uso del factor de enriquecimiento, el índice de carga contaminante (PLI) y los índices de toxicidad ERMQ y PELQ.

Espinosa, Parra y Villamil, (2011). Determinación del contenido de metales pesados en las fracciones geoquímicas del sedimento superficial asociado a los manglares de la ciénaga grande de Santa Marta, Colombia.

El ecosistema de manglar de la Ciénaga Grande de Santa Marta (CGSM) ha estado sometido a fuertes presiones antropogénicas que han ocasionado, entre otros, cambios en las características fisicoquímicas de sus sedimentos. En condiciones normales, los sedimentos asociados al manglar generan equilibrios que permiten la retención de metales pesados en distintas formas químicas, al romperse este equilibrio los metales que no son retenidos en la matriz sedimentaria pueden ser movilizados y hacerse biodisponibles. Con el propósito de establecer el potencial de movilidad y biodisponibilidad de los metales Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Cd, As y Pb en sedimentos superficiales asociados al manglar en la CGSM, se analizaron sus contenidos en cuatro áreas con diferente grado de cobertura de manglar. Los metales fueron extraídos siguiendo el esquema de extracción secuencial de Tessier y se midieron por la técnica de Espectrometría de Plasma Inductivamente Acoplado. En general, las mayores concentraciones de los metales estudiados se encontraron en formas no biodisponibles. Los metales Mn, Ni, Cu, Cd, As y especialmente Zn, podrían ser potencialmente movilizados por cambios del potencial redox del sedimento principalmente. No obstante, las concentraciones de los elementos encontradas en las fracciones móviles son muy bajas y no representan riesgo ambiental.

Guevara y Romero, (2011). Evaluación de los impactos ambientales ocasionados por la contaminación de cadmio y plomo en suelo, agua y sedimento, de los municipios Tabio y Tenjo, pertenecientes a la subcuenca del río Chicú.

Esta investigación estuvo enfocada a determinar las concentraciones de carga contaminante de los metales pesados cadmio y plomo en suelo, agua y sedimento en los municipios de Tabio y Tenjo pertenecientes a la subcuenca del Río Chicú, esto, con el fin de evaluar los impactos ambientales de estos metales sobre esta área. También se determinó cómo se encontraba la sub-cuenca del Río Chicú frente a los objetivos planteados por el Acuerdo 043 de 2006 de la CAR para el Río Bogotá

y frente a la normatividad ambiental legal vigente nacional e internacional a través de la implementación de listas de chequeo. Finalmente se concluyó que respecto a la calidad ambiental de agua para la sub-cuenca del Río Chicú, con respecto a los valores esperados por el Acuerdo 043 de 2006 de la CAR, hay que tener presente que las autoridades ambientales deben concentrarse en bajar las concentraciones de DBO después del vertimiento de la planta de tratamiento de aguas residuales del municipio de Tabio hasta la desembocadura, puesto que los niveles de este contaminante sobrepasa lo estipulado por dicho acuerdo; así mismo, de mantener en monitoreo y control los valores de plomo.

Sánchez, León, Saravia y De Mena, (2009). Determinación de la concentración de solidos suspendidos totales (SST) y metales pesados en la cuenca del rio Morote, Nicoya, Guanacaste.

En este estudio se determinó la concentración de solidos suspendidos totales y metales pesados en la cuenca del río Morote. El estudio abarco seis campañas de muestreo entre abril del 2003 y mayo del 2005. Los puntos de muestreos seleccionados corresponden a lugares desde la cuenca alta hasta la desembocadura del río Morote en el Golfo de Nicoya. La concentración de sólidos suspendidos totales (SST) en la desembocadura durante la época lluviosa en promedio superó los 200 mg/L. En los sedimentos del lecho del río se encontró enriquecimiento de metales como Cu, Ni, Cd y Fe, no así en Pb. En cuanto al Zn, en la época seca la concentración estuvo cerca del valor límite (200 mg/kg) establecido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés).

4.2 MARCO TEÓRICO

4.2.1 Metales

Por lo general se define a los metales como elementos sólidos que comparten ciertas propiedades físicas, químicas y mecánicas que los distinguen. Además del brillo, la maleabilidad, ductilidad, dureza, tenacidad y elasticidad, son buenos conductores de calor y electricidad y tienen una elevada capacidad de reflexión de la luz.

Estas características se deben a que poseen una estructura interna cristalina con átomos dispuestos y enlazados de manera ordenada y específica, distribuidos en planos que permiten el deslizamiento de los átomos cuando se produce algún tipo de fuerza sobre ellos. La posibilidad de deslizamiento es la que permite la maleabilidad. Adicionalmente, su conductividad eléctrica se debe también a su estructura atómica: tienen un núcleo con carga positiva y electrones con carga negativa en movimiento alrededor, lo que permite la transmisión de calor y electricidad (Banco de la Republica, 2010).

4.2.2 Limitaciones de la evaluación de riesgos ambientales

Según Cabezas, la conjugación del principio de prevención con la evaluación y la gestión de riesgos es, en cierta medida, difícil. Su aplicación supone asumir una postura totalmente preventiva, es decir, puesto que no existe certeza, se llevan a cabo todas las acciones que hipotéticamente podrían prevenir las consecuencias del proceso. Esto se constata ante problemas como el del calentamiento de la tierra, pues, aunque la ausencia de medidas puede tener consecuencias enormes, la acción necesaria para prevenir dicho calentamiento conlleva importantes repercusiones sociales, políticas y económicas, por lo que, en este caso, es inviable conjugar la prevención con la evaluación y la gestión de riesgos ambientales.

En ese sentido, ante un problema determinado, la evaluación de riesgos requiere identificar las partes en que se puede dividir, para centrarse en cada una de estas más que en el conjunto del problema. Las evaluaciones de riesgos más frecuentes son las que se ocupan de un agente específico. Las evaluaciones de riesgos, pero cada uno de ellos se debe aislar para su estudio, pues no existen todavía datos fiables que permitan ocuparse de una combinación de varios agentes.

Así mismo, la evaluación de riesgos puede propiciar un exceso de dependencia y de confianza en los resultados. Esta desventaja se manifiesta sobre todo en los segmentos de riesgo de gran incertidumbre y en los que es frecuente encontrar enfoques conservadores y factores de seguridad. Los que cuestionan la certeza de los métodos de evaluación de riesgos suelen alegar que no es adecuado depender de evaluaciones de riesgos basadas en una metodología incierta.

4.2.3 Toxicidad de los metales

Según Nordberg, (1998)., los metales pesados objeto de estudio tienen los siguientes efectos sobre la salud y el ambiente:

- **Cromo (Cr)**

El cromo se absorbe rápidamente después de la ingestión o la inhalación. Los efectos irritantes y corrosivos del Cr se producen inmediatamente después de la absorción a través de la mucosa, que es muy rápida. La exposición profesional a los compuestos de Cr puede producir irritación o corrosión cutáneo-mucosa, reacciones cutáneas de tipo alérgico o ulceraciones de la piel. Pueden producir úlceras de cromo, dermatitis, efectos respiratorios agudos, ulceración del tabique nasal, efectos cancerígenos y en otros órganos.

- **Plomo (Pb)**

Los efectos biológicos del plomo son los mismos independientemente de que entre en el organismo por inhalación o ingestión. El plomo interfiere con la función celular normal y con varios procesos fisiológicos. Causa efectos negativos en las neuronas, efectos hematológicos, efectos endocrinos, efectos renales, efectos sobre la reproducción y el desarrollo, efectos cancerígenos.

- **Níquel (Ni)**

Los riesgos para el hombre derivados de la exposición profesional a los compuestos de níquel pueden dividirse en tres categorías principales: (1) alergias; (2) rinitis, sinusitis y enfermedades respiratorias; (3) cánceres de las cavidades nasales, de pulmón y de otros órganos.

- **Cobre (Cu)**

El cobre es otro elemento esencial para el organismo humano, siendo necesario un aporte de 30 a 80 $\mu\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{día})$. En el organismo se encuentra fundamentalmente complejo con proteínas, además de formar parte de importantes enzimas que participan en diversos procesos de oxidación (Pérez, 2005). La inhalación de polvos, humos o nieblas de sales de cobre puede causar congestión nasal o de las mucosas, además de ulceración con perforación del tabique nasal (Ministerio de Trabajo e Inmigración, 1998). La exposición aguda por ingestión a sales solubles de cobre, como el sulfato, puede producir necrosis hepática con consecuencia de muerte. La exposición crónica al cobre por ingestión de alimentos conservados en recipientes de este metal se ha asociado a la aparición de lesiones hepáticas en niños (OMS, 1996; Moreno, 2003). No existen evidencias de efectos cancerígenos del cobre o sus compuestos por ninguna vía de exposición. En los ambientes acuáticos el cobre existe en sus dos estados de oxidación más estables: Cu^+ y Cu^{2+} . Este elemento traza esencial para la vida puede ser perjudicial para la biota en concentraciones elevadas. El cobre es un biocida de amplio espectro, que puede

estar asociado con la toxicidad aguda y crónica, reducción en el crecimiento, interferencia con los procesos de esmoltificación en salmónidos y una amplia variedad de efectos subletales (Hafida el Mai et al., 2013).

- **Hierro (Fe)**

El hierro es un nutriente esencial para los organismos vivos y es tóxico a concentraciones altas. La inhalación de polvo que contenga óxido de hierro por vía respiratoria puede originar neumoconiosis, y su ingesta por vía oral hemocromatosis o cirrosis. La deficiencia de este metal aumenta la absorción de algunos metales tóxicos, como el cadmio. El hierro es un elemento importante en la vida de los peces, ya que es parte de la hemoglobina de su sangre. Cuando el hierro se presenta con una concentración demasiado alta en el agua, puede causar daño a los peces. Este metal se puede adherir a las branquias del pez sofocándolo, produciéndole falta de oxígeno y por ende la muerte (Hafida el Mai et al., 2013).

- **Arsénico (As)**

La contaminación de fuentes hídricas subterráneas por arsénico es una grave amenaza para la humanidad, ya que el arsénico puede incorporarse con gran facilidad en la cadena alimenticia y favorecer su distribución de amplia difusión en todo el reino animal y vegetal (Mandal & Susuki, 2002; Rakib & Bhuiyan, 2014). Dependiendo de las condiciones físicas y químicas del ambiente, algunos compuestos de arsénico se pueden solubilizar fácilmente en el agua y, para posteriormente ser tomados por los microorganismos, dando lugar a altos niveles de biodisponibilidad (Tsai et al., 2009).

Debido a su toxicidad, la Organización Mundial de la Salud (OMS) considera perjudicial para el ser humano el consumo de agua con una concentración de arsénico superior a 10 mg L⁻¹. La arsenicosis o hidroarsenicismo crónico es una

enfermedad que se presenta por elevadas concentraciones de (As) inorgánico y presenta diferentes afectaciones en la salud humana tales como problemas respiratorios, enfermedades cardiovasculares, gastrointestinales y efectos cancerígenos (pulmón, vejiga y piel) entre otras (Marruecos et al., 1993).

- **Cadmio (Cd)**

El cadmio es un metal pesado que puede ingresar por vía respiratoria o por vía oral, se transporta a la sangre y se concentra en el hígado y el riñón. El cadmio tiene la capacidad de bioacumularse en estos órganos vitales, lo que produce daños irreversibles incluso en bajas concentraciones. Además de esto, el tiempo de permanencia en estos órganos puede ser muy elevado, por lo que el tiempo de vida media del cadmio en el riñón puede alcanzar los 30 años (Reyes et al., 2016). Al cadmio es reconocido como uno de los metales pesados con mayor tendencia a acumularse en las plantas. Esta causa severos desequilibrios en los procesos de nutrición y transporte de agua en las plantas (Singh & Tewari, 2006).

- **Zinc (Zn)**

A pesar de que el zinc es uno de los elementos necesarios para el mejoramiento de la salud humana, este en exceso puede producir problemas neurológicos que incluyen entumecimiento y debilidad en los brazos y las piernas (NIH, 2016). En el ambiente no se tiene un 100% de certeza de los impactos que este elemento genera sobre el ambiente cuando se encuentra en altas concentraciones.

Es ampliamente conocido que, en las zonas altamente mineralizadas, el ambiente tiene una gran capacidad de adaptación a altas concentraciones de este mineral, pero en otras zonas (Suelos), esto no ocurre (Wolley, 2008). Lo que permite afirmar que la capacidad de fijación del metal y de reducción de la concentración del metal absorbido por un organismo la cual puede ser toxico para el medio, no ocurre en

todos los medios. Debido a esta razón se puede afirmar que el zinc puede o no ser tóxico, esto depende del medio en el que se encuentre y las características que esté presente (Van Assche & Green, 2006).

- **Aluminio (Al)**

El aluminio es el metal más abundante en la corteza terrestre. Siempre se encuentra combinado con otros elementos como oxígeno, silicio y flúor. Por lo general, la exposición al aluminio no es perjudicial, pero la exposición a niveles altos puede afectar la salud. Los trabajadores que inhalen grandes cantidades de polvo de aluminio pueden tener problemas en los pulmones tales como tos o radiografías de tórax anormales. Algunos trabajadores que respiran polvo o gases de aluminio tienen un desempeño más bajo en algunas pruebas que miden funciones del sistema nervioso. Algunas personas con enfermedades renales almacenan una gran cantidad de aluminio en su cuerpo y, a veces, contraen enfermedades de los huesos o del cerebro que pueden deberse al exceso de aluminio (ATSDR, 2008).

4.2.5 Transporte y vías de entrada de los metales en el medio ambiente

Los metales, que forman parte de los minerales de la corteza terrestre, se transportan de forma cíclica a través del medio ambiente. Los procesos de erosión facilitan su eliminación de las rocas, posteriormente los metales emitidos son transportados siguiendo distintos mecanismos, algunos de los cuales incluyen la ingesta y transformación por parte de plantas y microorganismos. Los ciclos biogeoquímicos naturales de los metales se ven frecuentemente alterados por las actividades humanas (Spiro & Stigliani, 2004).

Teniendo en cuenta este ciclo general, los metales tienen tres vías principales de entrada en el medio acuático:

Vía atmosférica: Se produce debido a la sedimentación de partículas emitidas a la atmósfera por procesos naturales o antropogénicos (principalmente combustión de materiales fósiles y procesos de fundición de metales).

Vía directa: Como consecuencia de los vertidos directos de aguas residuales industriales y urbanas a los cauces fluviales.

Vía terrestre: Producto de la escorrentía superficial de terrenos contaminados (minas, utilización de lodos como abono, lixiviación de residuos sólidos, precipitación atmosférica...) y otras causas naturales.

4.2.5 Utilidades de la evaluación de riesgos ambientales

Según la Guía Técnica Colombiana (GTC 104, 2009), la evaluación de riesgos ambientales se utiliza:

- Cómo instrumento para identificar los riesgos a tratar con mayor urgencia y elaborar una jerarquía de prioridades sobre las necesidades de investigación y actuación.
- Como mecanismo de ayuda en el proceso de toma de decisiones sobre riesgos, especialmente en la elección entre las distintas opciones de actuación, como por ejemplo las opciones de reducción de riesgos. Una vez establecido los criterios, los métodos de evaluación y gestión de riesgos ayudarán en el proceso de decisión.
- Como medio de comparación entre distintos riesgos, para determinar si existe proporcionalidad entre la actuación realizada o a realizar y el riesgo planteado.

4.2.6 Índices ambientales

Los índices ambientales son herramientas matemáticas los cuales tienen como objetivo el facilitar el entendimiento del estado del ambiente, a partir de la toma de valores de las diferentes variables o parámetros físicos, químicos y biológicos de la zona de estudio. Los índices ambientales objeto de estudio en esta investigación son:

4.2.6.1 Factor de enriquecimiento

El factor de enriquecimiento es un índice que tiene como finalidad la identificación y cuantificación de la intervención humana en los ciclos naturales de los elementos a evaluar, este se basa en la premisa de que en los sedimentos existe una aproximación geoquímica en la cual se supone una relación lineal entre un elemento de referencia o normalizador y el elemento a evaluar, siempre y cuando este bajo condiciones de sedimentación natural (Planas, 2010).

En el factor de enriquecimiento se considera que si la concentración del elemento de referencia varía con respecto a un factor ambiental, la concentración de los elementos a estudiar variará también con respecto al mismo factor, debido a que presentan una geoquímica similar por ser metales traza. Según Planas (2010), es preferible que el elemento de referencia cumpla algunos requerimientos incluyendo:

- ✓ Existencia en los sedimentos a altas concentraciones.
- ✓ Encontrarse libre de contaminación de origen antropogénico.
- ✓ Ser fácilmente determinable con un número elevado de técnicas analíticas.
- ✓ No haber sido contaminado durante la recogida de muestras.

4.2.6.3 Índice de carga contaminante (PLI)

El índice de carga contaminante PLI (siglas en inglés de Pollution Load Index) es una herramienta comparativa para evaluar el nivel de contaminación por metales pesados, la cual ha sido utilizada por diversos autores como (Montoya, 2013; Varol, 2011). El PLI se propone como un sistema estandarizado para la detección de la contaminación, que permite una comparación de los niveles de contaminación entre diferentes sitios (Angulo, 1996), a partir de los factores de contaminación correspondientes a cada metal estudiado.

4.2.6.4 Comparación de los valores de concentración de efecto limite (TEC) y concentración de efecto probable (PEC)

Para la clasificación de los sedimentos en función de sus posibles efectos, estos índices fueron propuestos por MacDonald et al., (2000), quienes desarrollaron una guía basada en consenso para valores de Concentración de Efecto Limite (TEC) y Concentración de Efecto Probable (PEC) para sedimentos de agua dulce. El primero identifica concentraciones por debajo del cual no se esperan efectos biológicos adversos para el medio, mientras que el segundo (PEC) sugiere las concentraciones por encima del cual los efectos biológicos adversos pueden ser frecuentes.

4.2.6.5 Índice de riesgo ecológico potencial

El método de índice de riesgo ecológico potencial (PERI) fue propuesto por el científico sueco (Hakanson, 1980), como un método de índice utilizado para evaluar cuantitativamente el potencial de los peligros ecológicos generados por metales pesados en los sedimentos según las características de los metales pesados y su comportamiento ambiental. Debido a que considera la toxicidad de los metales pesados, este método ha sido ampliamente utilizado para evaluar los impactos ecológicos generados por los metales pesados en los sedimentos de ríos, lagos, embalses y zonas intermareales (Song et al., 2015; Guo et al., 2010).

4.2.6.6 Índices de toxicidad ERMQ y PELQ

Las concentraciones de toxicidad ERM (effects range median) y PEL (probable effect level), indican respectivamente los efectos de rango medio y el nivel de efecto probable sobre la biota en el sedimento. Estas concentraciones han sido diseñadas para evaluar la toxicidad de los sedimentos en los diferentes puntos de muestreo de una cuenca y así determinar los impactos producto de las contribuciones antropogénicas sobre el medio acuático (Montoya, 2013). Los valores (ERM o PEL) representan concentraciones límites, que al ser superadas indican que es probable que se produzcan efectos adversos sobre la biota (Violintzis et al., 2009). La principal diferencia entre ERM y el PEL, es que este último valor se determinó al utilizar efectos sin datos de estos; mientras el ERM se basa solo en los datos de efectos (Roach, 2005).

Los índices de toxicidad ERMQ y PELQ, que parten de las concentraciones límites ERM y PEL respectivamente, se consideran herramientas útiles para reducir la valoración de una gran cantidad de contaminantes en un solo número. De esta manera se evalúan los riesgos a los cuales está expuesta la biota en los diferentes puntos de muestreo. Una de las limitaciones que presenta estos índices es que este no considera todos los productos químicos presentes en los sedimentos, sino solo aquellos incluidos en la lista que son: Ag, As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb y Zn (Long et al., 1995; Violintzis et al., 2009).

4.3 MARCO CONCEPTUAL

Afluente: Arroyo o río secundario que lleva sus aguas a otro mayor o principal.

Contaminación: Se entiende por contaminación la presencia en el aire, agua o suelo de sustancias o formas de energía no deseables en concentraciones tales que puedan afectar al confort, salud y bienestar de las personas, y al uso y disfrute de lo que ha sido contaminado (Encinas, 2014)

Cuenca: Área de aguas superficiales o subterráneas, que vierten a una red natural con uno o varios cauces naturales, de caudal continuo o intermitente, que confluyen en un curso mayor que, a su vez, puede desembocar en un río principal, en un depósito natural de aguas, en un pantano o directamente en el mar.

Demanda química de oxígeno (DQO): Es un parámetro que mide la cantidad de oxígeno necesario para degradar sustancias bioquímicamente (incluye degradación de materia orgánica e inorgánica) en una muestra líquida. Se utiliza para medir el grado de contaminación y se expresa en miligramos de oxígeno diatómico por litro (mg O₂/L).

Efluente: Agua o cualquier otro líquido, en su estado natural o tratado total o parcialmente, que sale de un tanque de almacenamiento, depósito o planta de tratamiento. La salida o flujos salientes de cualquier sistema que despacha flujos de agua. Este es el agua producto dada por el sistema.

Evaluación del riesgo ambiental: Es el proceso mediante el cual se determina si existe una amenaza potencial que comprometa la calidad del agua, aire o suelo, poniendo en peligro la salud del ser humano como consecuencia de la exposición a todos los productos tóxicos presentes en un sitio, incluyendo aquellos compuestos tóxicos presentes que son producto de actividades industriales ajenas al sitio o

cualquier otra fuente de contaminación, y define un rango o magnitud para el riesgo (MINAN, 2009)

Impacto Ambiental: Obando (2009), se refiere al impacto ambiental como la alteración del medio ambiente, provocada directa o indirectamente por acciones humanas (labores mineras) o actividad en un área determinada. Este autor, opina que los impactos ambientales pueden ser positivos o negativos, es decir, beneficiosos o no deseados.

Indicador: Cualquier entidad biológica o proceso, o comunidad cuyas características muestren la presencia de las condiciones ambientales específicas o contaminación.

Índices de toxicidad: Son los parámetros toxicológicos que se utilizan en la evaluación de riesgos y se obtienen de los estudios de dosis-respuesta. Se estiman en forma diferente los índices para cancerígenos y los índices para no cancerígenos.

Punto de muestreo: Sitio específico destinado para tomar una muestra representativa del cuerpo de agua (Rodríguez et al., 2011).

Riesgo ambiental: Resultado de una función que relaciona la probabilidad de ocurrencia de un determinado escenario de accidente y las consecuencias negativas del mismo sobre el entorno natural, humano y socioeconómico.

Vertimiento: Cualquier descarga final de un elemento, sustancia o compuesto, que, contenido en un líquido residual de cualquier origen, ya sea agrícola, minero, industrial, de servicios, aguas residuales a un cuerpo de agua, canal, al suelo o el subsuelo.

4.4 MARCO CONTEXTUAL

El río Sororia está ubicado en la Jagua de Ibirico y hace parte de la cuenca del río Cesar, es de tipo permanente en todas las épocas del año y su caudal es variable según el periodo climático; esta corriente se encuentra reglamentada según la Resolución No. 0064 del 19 de enero de 1981 del INDERENA, con un caudal base de reparto de 3770 L/s.

A continuación, se observa la ubicación del departamento del Cesar dentro del territorio colombiano.

Ilustración 1. Ubicación del departamento del Cesar, Colombia.



Fuente: Página de gobernación del Cesar.

Ilustración 2. Ubicación de la Jagua de Ibirico, Cesar.



Fuente: Página de la gobernación del Cesar.

Ilustración 3. Ubicación del río Sororia, Cesar.



Fuente: Google Earth.

El río Sororia, cuenta con una cobertura vegetal que va desde bosque de galería y/o ripario, bosque denso y vegetación secundaria o en transición. La principal exposición a eventos amenazantes es la confluencia de nuevos proyectos mineros en la parte baja de la subcuenca del río Sororia, esto representará un indicador de posible riesgo en las áreas de amenaza alta y media. Se prevé la ejecución de siete (7) proyectos mineros destinados a la exploración o explotación del carbón en el municipio de La Jagua de Ibirico, de los cuales aproximadamente 1215,4 ha podrían verse afectadas por la ocurrencia de deslizamientos.

En el río Sororia, desde la Mina Cerro Largo a la unión con el río Tucuy, la calidad de agua es regular a mala. En el tramo que va desde la unión del río Sororia con el río Tucuy y de éste con el río Maracas la calidad es Regular, también en la parte baja de la cuenca: río Calenturitas, la calidad del agua es regular a aceptable. (Consorcio Calenturitas, 2016).

4.5 MARCO LEGAL

Constitución política de Colombia

Artículo 79. Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines.

Artículo 80. El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. Además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados. Así mismo, cooperará con otras naciones en la protección de los ecosistemas situados en las zonas fronterizas.

LEY 9 DE 1979: Código sanitario nacional, donde se establecen Las normas de protección de la calidad de las aguas. Y de manera detallada en el Artículo 3° se establecen las ordenanzas para el control sanitario de los usos del agua tales como: Consumo humano, domestico, preservación de flora y fauna, agrícola y pecuario, recreativo, industrial, transporte.

Ley 99 de 1993: Ley del Medio Ambiente

Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones. “Establecer los límites máximos permisibles de emisión, descarga,

transporte o depósito de sustancias, productos, compuestos o cualquier otra materia que pueda afectar el medio ambiente o los recursos naturales renovables; del mismo modo, prohibir, restringir o regular la fabricación, distribución, uso, disposición o vertimiento de sustancias causantes de degradación ambiental. Los límites máximos se establecerán con base en estudios técnicos, sin perjuicio del principio de precaución” (Artículo 25).

Decreto 3930 del 2010

Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9ª de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones.

Resolución 0631 del 17 marzo de 2015

Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de agua superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y dictan otras disposiciones.

Los parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de Aguas Residuales Domésticas, (ARD) y de las Aguas Residuales no Domésticas (ARND), de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cuerpos de aguas superficiales (Artículo 8).

Resolución 1514 del 2012

Por el cual se adoptan los términos de referencia para la elaboración del plan de gestión del riesgo para el manejo de vertimientos. Propender por la seguridad técnica y operacional del sistema de gestión del vertimiento, para evitar la afectación de las condiciones ambientales y sociales del área de influencia, ante la ocurrencia

de una descarga en condiciones que impidan o limiten el cumplimiento de la norma de vertimientos.

En Colombia no existen normas que establezcan específicamente límites máximos permisibles para metales en sedimentos; por lo tanto, las concentraciones de compuestos metálicos registradas en la investigación se compararon con las guías canadienses CEQG que establecen valores de referencia de metales en sedimentos de cuerpos de agua continental y finalmente, se compararon los resultados de metales en sedimentos con los niveles de fondo (background levels) establecidos en la tabla de referencia (Screening Quick Reference Table for Inorganics in Freshwater Sediment) emitida por la Administración Oceanográfica y Atmosférica de los Estados Unidos (NOAA, por sus siglas en inglés, National Oceanic and Atmospheric Administration). Ver tablas 1 y 2.

Pautas canadienses de calidad de sedimentos para la protección de la vida acuática (CEQG)

La norma canadiense de calidad de sedimentos para la protección de la vida acuática "Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life" es una herramienta que sintetiza las relaciones entre la concentración de químicos en sedimentos y cualquier efecto biológico adverso que se pueda suscitar por la exposición a los químicos en cuestión. La evaluación efectiva de este riesgo requiere un entendimiento acabado de las relaciones entre los químicos presentes en los sedimentos y la ocurrencia de efectos biológicos.

Esta norma, entrega puntos o valores de referencia para la evaluación de efectos biológicos adversos en sistemas acuáticos y se deriva de la información toxicológica disponible, generada según el protocolo formal establecido por el Canadian Council of Ministers of the Environment.

Estas guías no incluyen al Ni y para el As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb y Zn establece dos valores: (1) el llamado Guía Provisional de Calidad del Sedimento (ISQG, por sus siglas en inglés, Interim Sediment Quality Guideline), que representa la concentración por debajo de la cual no se espera que ocurran efectos biológicos adversos, y (2) el llamado Nivel de Efecto Probable (PEL, por sus siglas en inglés, Probable Effect Level), que es la concentración sobre la cual aparecen con frecuencia efectos biológicos adversos, ver tabla 1.

Tabla 1. Pautas canadienses de calidad de sedimentos para la protección de la vida acuática.

Metal	ISQG (mg/kg)	PEL (mg/kg)	% ≤ ISQG (mg/kg)	ISQG < % < PEL	% ≥ PEL
Arsénico	5,9	17	5	25	12
Cadmio	0,6	3,5	11	12	47
Cromo	37,3	90	2	19	49
Cobre	35,7	197	4	38	44
Plomo	35	91,3	5	23	42
Zinc	123	315	5	32	36

Fuente: Consejo Canadiense de Ministros del Medio Ambiente, 1995.

Dentro de la guía se establecen tres rangos de concentraciones de químicos: el primero ($\% \leq \text{ISQG}$) es el rango de efecto mínimo dentro del cual los efectos adversos raramente ocurren, aproximadamente un 25% o menos de efectos adversos bajo el ISQG, el segundo rango de efectos posibles dentro del cual los efectos adversos ocurren ocasionalmente ($\text{ISQG} < \% < \text{PEL}$). Y por último el rango de efecto probable ($\% \geq \text{PEL}$) dentro del cual efectos biológicos adversos ocurrirán frecuentemente (más de del 50% de los efectos adversos ocurre sobre el PEL).

Screening Quick Reference Table for Inorganics in Freshwater Sediment, NOAA

Tabla 2. Screening Quick Reference Table for Inorganics in Freshwater Sediment.

Metal	Background (mg/kg)
Arsénico	1,1
Cadmio	0,1 - 0,3
Cromo	(7 – 13)
Cobre	(10 – 25)
Plomo	(4 – 17)
Níquel	9,9
Zinc	(7 – 38)

Fuente: National Oceanic and Atmospheric Administration, 1993.

Se compararon los resultados de metales en sedimentos con los niveles de fondo establecidos en la tabla de referencia (Screening Quick Reference Table for Inorganics in Freshwater Sediment) emitida por la Administración Oceanográfica y Atmosférica de los Estados Unidos (NOAA, por sus siglas en inglés, National Oceanic and Atmospheric Administration). Estos valores se utilizan para identificar posibles impactos en los recursos costeros y hábitats potencialmente afectados por sitios de desechos peligrosos (Ver tabla 2).

5. METODOLOGÍA

5.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

Esta investigación se determina como investigación descriptiva ya que busca que los autores de este proyecto describan situaciones y eventos. En ella se destacan las características o rasgos de la situación, fenómeno u objeto de estudio (Sierra, 2012).

Los estudios descriptivos buscan especificar las propiedades importantes de personas, grupos, comunidades o cualquier otro fenómeno que sea sometido a análisis, miden o evalúan diversos aspectos, dimensiones o componentes del fenómeno o fenómenos a investigar (Ibarra, 2011).

5.2 POBLACIÓN Y MUESTRA

Para este caso de estudio, la población objeto de estudio fue el sedimento del río Sororia; la muestra correspondió a los sedimentos extraídos (muestras representativas) en los diferentes puntos del río.

5.3 DESARROLLO METODOLÓGICO

Para darle cumplimiento a los objetivos de esta investigación se implementaron tres fases las cuales fueron: Trabajo de campo, trabajo de laboratorio y tratamiento de datos.

5.3.1 TRABAJO DE CAMPO

En esta primera fase fue necesario trasladarse hasta la cuenca alta y baja del río Sororia, estando allí se procedió a:

5.3.1.1 Selección de los puntos de muestreo

Se seleccionaron tres puntos de muestreo de la cuenca baja a la altura del PUENTE y de la cuenca alta a la altura de la BOCATOMA del río Sororia; la selección de los puntos de muestreo obedeció a aspectos como distancia entre puntos y facilidad de acceso.

5.3.1.2 Recolección de los sedimentos

El 8 de abril del 2018 (época de verano), se tomaron las primeras muestras en la cuenca alta ubicada en la bocatoma (punto 1) y la cuenca baja ubicada en el puente (punto 2), teniendo en cuenta un radio aproximado de 10 m a partir del punto de referencia seleccionado, para así obtener una única muestra compuesta. El sedimento fue recolectado manualmente con palas o muestreadores plásticos y se tomaron a 5 cm de capa superficial. El 20 de mayo del 2018 (época de invierno), se tomaron las segundas muestras siguiendo el procedimiento anterior.

. **Tabla 3.** Recolección de sedimentos.

Determinación	Recipiente	Cantidad mínima de muestra	Preservación	Almacenamiento máximo recomendado
Metales pesados en sedimentos	Bolsa plástica	3 kg.	Refrigerar	6 meses muestra seca

Fuente: IDEAM, 2009.

*Refrigerar = almacenar a 4°C en ausencia de luz.

*Bolsas polietileno previamente lavadas con ácido nítrico al 10 % y enjuagadas con agua destilada.

5.3.1.3 Medición de parámetros fisicoquímicos *in situ*

Se midieron *in situ* la conductividad eléctrica del agua con un equipo multiparámetro YSI Pro-DS, este procedimiento se realizó siguiendo los lineamientos del Standard Methods establecidos para cada uno de los parámetros a evaluar.

5.3.2 TRABAJO DE LABORATORIO

El trabajo de laboratorio fue de gran importancia, ya que de estos depende la confiabilidad de los resultados por lo cual fue necesario ceñirse a la normatividad.

5.3.2.1 Pretratamiento de las muestras de sedimentos

Las muestras se transportaron al laboratorio de la Universidad Popular del Cesar en bolsas plásticas de cierre hermético previamente rotuladas, luego, fueron secadas a temperatura ambiente (25°C) en bandejas plásticas, que previamente han pasado por un proceso de limpieza con agua, jabón, ácido y enjuagadas con agua destilada, durante 3 semanas (sin embargo, para la época de invierno el proceso de secado demoró cinco semanas debido a la baja temperatura y lluvias que se presentaron en esa época). Asimismo, se seleccionaron unas muestras de sedimento por punto para la determinación de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos así: 100 g de sedimento para la determinación de coliformes totales en el Laboratorio especializado Bioindalab, y 50 g para la determinación del porcentaje de humedad, y porcentaje de materia orgánica y análisis granulométrico.

5.3.2.2 Análisis granulométrico

Para la realización de las características granulométricas de los sedimentos se empleó una serie de tamices que iban desde la malla de 3/8 hasta la malla de < 63 µm.

5.3.2.3 Determinación de materia orgánica

El procedimiento se hizo por duplicado, se determinó considerando la pérdida de masa por ignición que tuvo la muestra, en donde se asume que el material volatilizado es la fracción orgánica de los sedimentos. Primeramente, se tomaron 8 crisoles, se lavaron y se secaron en un horno a 105° C por 15 minutos, se pusieron en un desecador, luego se pesaron con papel aluminio, se tararon y se pesaron 1,1 g de sedimento, se colocaron en el horno a 105° C por 1 hora, pasado este tiempo, se sacaron y se colocaron en el desecador durante 15 minutos hasta secarse para la determinación del contenido de humedad. Posteriormente se colocó en un horno de calcinación o mufla a 550 °C durante 4 horas. Al momento de retirar las muestras tanto del horno como de la mufla, se dejan enfriar dentro de un desecador con agente secante activo para posteriormente registrar sus respectivos pesos en una balanza de precisión con exactitud 0,01 g (Zagal & Sadzawka, 2007).

5.3.2.4 Determinación de coliformes totales

La determinación de coliformes totales se realizó siguiendo los lineamientos establecidos en los protocolos dispuestos por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). En la realización de esta prueba se contó con el apoyo del Laboratorio especializado Bioindalab, ubicado en la ciudad de Valledupar.

5.3.2.5 Determinación del pH

Se tomó un vaso de precipitado o beaker, se lavó y se secó, luego se pesó, se taró y se pesaron 10 g de sedimento, el cual se diluyó en 50 ml de agua destilada, seguido de esto, con un pH-metro se determinó el pH de cada muestra.

5.3.2.6 Determinación de la concentración de metales

La concentración de los metales aluminio (Al), Cadmio (Cd), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Arsénico (As), Hierro (Fe), Níquel (Ni), Plomo (Pb) y Zinc (Zn) en los sedimentos, se determinó por espectrofotometría de absorción atómica con horno de grafito (GFAAS), Generación de hidruro de absorción atómica espectrométrica (HGAAS) y espectroscopia de absorción atómica de flamas (FLAA). Primeramente, las muestras pasaron por un proceso de digestión ácida (HNO_3 / HCl), con relación 3:1 (v/v), luego se someten durante 3 horas a 95 °C. (Rocha, 2000). Para el análisis de metales en las muestras de sedimento, el grupo de investigación Estudios Sanitarios y Ambientales – E.S.A. de la Universidad Popular del Cesar contó con el apoyo del laboratorio de Toxicología y Gestión Ambiental de la Universidad de Córdoba.

5.3.3 TRATAMIENTO DE DATOS

Una vez conocidas las características físicas, químicas y microbiológicas de las muestras de sedimento, se realizó un análisis estadístico.

5.3.3.1 Tratamiento estadístico de datos

En investigaciones relacionadas al análisis de ecosistemas, el PCA permite la identificación de posibles fuentes de metales en suelos y sedimentos de la zona objeto de estudio. PCA reduce el tamaño de los datos extrayendo un pequeño número de factores latentes (Componentes Principales, PCs) que permiten explorar las similitudes del comportamiento de la distribución entre metales y analizar las relaciones entre las variables observadas. El análisis de significancia de los resultados de la correlación de Pearson permite determinar así mismo las correlaciones entre metales que reflejan el origen de dichos elementos; en caso de

no existir correlación entre elementos los metales no están controlados por un simple factor (Chowdhury et al., 2016).

Teniendo en cuenta lo dicho en el párrafo anterior, se realizó una matriz de correlación, utilizando el coeficiente de correlación de Pearson, y con el fin de evaluar las asociaciones entre el comportamiento de todas las variables analizadas, se realizó el análisis multivariado de componentes principales (ACP) con rotación Varimax. Además, se utilizó valores de probabilidades de 0,05, con nivel de confianza del 95 %. El tratamiento estadístico de los resultados fue realizado mediante el paquete estadístico IBM® SPSS® statistics versión 24 y Excel.

5.3.3.2 Cálculo de indicadores de contaminación en los sedimentos

Para evaluar el riesgo ambiental de los metales en sedimentos, se calcularon los siguientes indicadores de contaminación:

- **Factor de enriquecimiento**

Para determinar el factor de enriquecimiento (EF) en los diferentes puntos de muestreo, las concentraciones de los metales existentes en el entorno se compararon con las que normalmente existirían si se excluyera la contribución antrópica. Con base en lo anterior, se tomó como concentraciones de fondo las determinadas por Cáceres y Osorio (2018) para As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Al y Fe en el río Sororia. El factor de enriquecimiento se calcula mediante la siguiente relación:

$$EF = \frac{(C_e/C_n)_{muestra}}{(C_e/C_n)_{Fondo}}$$

Donde C_e es la concentración en ($\mu\text{g/g}$) del elemento a estudiar y C_n es la concentración en ($\mu\text{g/g}$) del elemento de normalización. El hierro (Fe) y Aluminio

(Al), pueden ser utilizados como elemento de normalización geoquímica debido a las siguientes razones:

1. Está asociado con las partículas finas.
2. Su geoquímica es similar a la de muchos metales traza.
3. Su contenido natural en los sedimentos tiende a ser uniforme.

De acuerdo con Sakan et al. (2009), los valores de EF se interpretan de la siguiente manera:

Tabla 4. Valores de referencia del factor de enriquecimiento.

Rango de EF	Inferencia
EF < 1	Indica que no hay enriquecimiento
EF < 3	Menor enriquecimiento
EF < 3 – 5	Enriquecimiento moderado
EF < 5-10	Enriquecimiento moderadamente grave
EF < 10 – 25	Enriquecimiento grave
EF < 25 – 50	Enriquecimiento muy grave
EF > 50	Enriquecimiento extremadamente grave

Fuente: Sakan et al., 2009.

- **Índice de cargas contaminantes (PLI)**

El índice de carga contaminante PLI (siglas en inglés de Pollution Load Index) es otra herramienta sencilla y comparativa para evaluar el nivel de contaminación por metales pesados, la cual es utilizada por diversos autores. El PLI se ha calculado con la fórmula presentada a continuación, donde n es el número de metales (nueve en el presente estudio: Ni, Cu, Fe, Cr, Zn, Cd, Al, As y Pb) y CF es el factor de contaminación. El factor de contaminación (CF) se obtiene dividiendo el contenido de cada metal en las muestras (Montoya, 2013).

$$PLI = (CF_1 * CF_2 \dots CF_n)^{1/n}$$

Cuando $PLI > 1$, significa que existe una contaminación, de lo contrario, si $PLI < 1$, no hay contaminación por metales.

- **Índice de toxicidad ERMQ**

Los índices de toxicidad ERM (effects range median) y PEL (probable effect level), denotan respectivamente los efectos de rango medio y el nivel de efecto probable sobre la biota en el sedimento. Estos índices diseñados para evaluar la toxicidad de los sedimentos en diferentes puntos de muestreo de una cuenca y determinar el impacto de las contribuciones antropogénicas sobre el medio acuático, han sido utilizados en numerosas investigaciones (Montoya, 2013).

$$ERMQ \text{ o } PLEQ = \frac{\sum (C_i / ERM_i \text{ o } PEL_i)}{n}$$

Donde C_i es el contenido del elemento i en el sedimento. ERM_i y PEL_i son valores de referencia para cada metal y n que representa el número de metales. Se debe resaltar que estos índices contemplan solo valores de referencia para los metales Ag, As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb y Zn.

Tabla 5. Valores de referencia en ($\mu\text{g g}^{-1}$) de los índices ERM.

Metal	ERM ($\mu\text{/kg}$)	PEL ($\mu\text{/kg}$)
Cu	270	108
Ni	51,6	42,8
Cr	370	160
Pb	218	112
Zn	410	271
As	70	41.6

Fuente: Long et al, 1995.

Los valores obtenidos a través de los índices ERMQ y PELQ, representan la probabilidad de generar efectos adversos sobre la biota. Dicha interpretación de la probabilidad se determina por medio de las tablas 6 y 7.

Tabla 6. Interpretación del índice de toxicidad ERMQ.

Valores de ERMQ	Posibilidad de generar efectos adversos sobre la biota (%)	Nivel de probabilidad
< 0,1	< 10	Baja
0,11 – 0,5	25 – 30	Media – baja
0,51 – 1,5	50	Media – alta
> 1,5	> 75	Alta

Fuente : Long et al., 1995.

Tabla 7. Interpretación del índice de toxicidad PELQ.

Valores de PELQ	Probabilidad de toxicidad en la biota (%)	Nivel de prioridad
< 0,1	10	Baja
0,11 – 1,5	25	Media – baja
1,51 – 2,3	50	Media – alta
> 2,3	76	Alta

Fuente : Long et al., 1995.

- **Índice de riesgo ecológico potencial**

Este índice permitirá estimar el daño ambiental generado por los metales pesados en los sedimentos. Tomando como objeto la toxicidad de estos y la respuesta del ambiente. Este método fue propuesto por el científico sueco (Hakanson, 1980) y para su cálculo se utiliza la siguiente ecuación:

$$RI = \sum E_i = \sum T_i F_i = \sum T_i \frac{C_i}{C_b}$$

Donde E_i es el coeficiente del riesgo ecológico potencial de cada metal; T_i es el coeficiente de toxicidad de cada metal. F_i es el coeficiente de contaminación del metal pesado, que se calcula a través del cociente entre la concentración de cada metal en la muestra de sedimento (C_i) y el valor de referencia (C_b) de la muestra de fondo (Ver tabla 8).

Tabla 8. Concentración de fondo de metales de fondo.

Elemento	Concentración de fondo (mg/kg)
As	3,67
Cr	14,19
Ni	15,81
Cu	20,91
Zn	82,88
Cd	0,17
Pb	6,16
Al	7658,48

Fuente: Hakazon, 1980.

El coeficiente de toxicidad de metales pesados (T_i) ha sido estandarizado por (Hakanson, 1980), los valores para cada metal varían de la siguiente manera (Tabla 9).

Tabla 9. Coeficientes de toxicidad T_i para metales pesados.

Elemento	Valor T_i
Cu	5
Ni	5
Cr	2
Pb	5
Zn	1
As	10
Cd	30

Fuente: Hakazon, 1980.

Según Song et al., (2015), los valores obtenidos del coeficiente de riesgo ecológico potencial de cada metal (E_i) y el índice de riesgo ecológico potencial de múltiples metales pesados (R_i), determinan el nivel de contaminación de dicho ecosistema (Tabla 10).

Tabla 10. Riesgo ecológico potencial de metales pesados.

E_i	R_i	Nivel de contaminación
< 30	< 50	No contaminado
30 – 60	50 – 100	Moderadamente contaminado
60 – 120	100 – 200	Fuertemente contaminado
120 – 240	> 400	Muy fuertemente contaminado
> 240	-	Extremadamente contaminado

Fuente: Song et al., 2015.

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

6.2 Características de los sedimentos y la columna de agua

6.2.1 Parámetros fisicoquímicos y microbiológicos

Humedad y materia orgánica

En la tabla 11, se encuentran los resultados del porcentaje de materia orgánica encontrados en los diferentes puntos de muestreo de la cuenca alta y baja del río Sororia.

Tabla 11. Resultados del porcentaje de materia orgánica.

Punto de Muestreo	% de MO
P.1 Verano	7,39
P.2 Verano	5,2
P.1 Invierno	1,77
P.2 Invierno	2,96

Fuente: Autores, 2019.

Se observa un aumento muy notable en los porcentajes de materia orgánica de la época de verano. Esto pudo deberse a que en verano, la materia orgánica se acumula por la descomposición de hojas y otros materiales y se depositan en los sedimentos, mientras que en invierno, aguas abajo se encuentran sedimentos más sueltos ya que las lluvias lo removilizan y los microorganismos lo degradan, por esta razón se encuentra materia orgánica en menor proporción. Esta situación es muy diferente a la que muestran los resultados de la investigación de Fontalvo (2017) quien afirma que en época de lluvia los porcentajes de la materia orgánica aumentaron con relación al periodo seco.

Además, se espera una mayor concentración de metales en la época de verano, lo cual puede deberse a las condiciones en las que se encuentran estos sitios, bajo

contenido de oxígeno disuelto y ambientes reductores que promueven la formación de nuevas sustancias químicas, la liberación y biodisponibilidad de los metales (Poot, A. *et al* citado por Feria *et al.*, 2010).

Este resultado corrobora que los metales pesados se unen a la materia orgánica de los sedimentos por procesos de adsorción y que esta tiene un papel importante en la presencia y distribución de estos. (Hernández-García *et al.*, 2008). La materia orgánica incorpora a los metales a su estructura mediante fenómenos de atracción y generación de compuestos organometálicos, limitando la biodisponibilidad de estos, arrastrándolos y depositándolos en los sedimentos.

PH

Se observa en la tabla 12 que el pH es básico tanto en verano como en invierno.

Tabla 12. Resultados del pH.

Punto de Muestreo	pH
P.1 Verano	8,87
P.2 Verano	8,39
P.1 Invierno	8,6
P.2 Invierno	8,75

Fuente: Autores, 2019.

La especiación iónica es el rol más importante que desempeña el pH en la adsorción de iones metálicos. Los metales de transición, entre los cuales se encuentran la mayoría de los metales pesados, se caracterizan por su habilidad en la formación de complejos de coordinación con ligandos que poseen pares de electrones libres, en busca de la estabilización de sus vacantes o parcialmente llenos orbitales d. La molécula de agua es catalogada como un excelente ligando. Y la formación de acuo complejos con cationes metálicos en solución acuosa es inevitable. A mayor número de ligandos rodeando un catión metálico, mayor será su radio iónico y volumen,

convirtiendo al catión en una especie estéricamente impedida para una eficiente interacción con la superficie del adsorbente. La formación de complejos con el agua es regulada por el pH, ya que a altos valores de pH, la concentración de iones oxhidrilo aumenta en la solución y es capaz de formar hidroxocomplejos, los cuales no sólo aumentan el volumen del catión sino que disminuyen su carga neta, disminuyendo también su afinidad con el adsorbente (Navarro et al, 2005).

Dicho de otro modo, la capacidad de adsorción decae grandemente a pH bajos, de esta manera se espera que los metales tengan una buena capacidad de absorción teniendo que los pH encontrados en los sedimentos del sistema lotico del área de estudio son alcalinos como se puede observar en la tabla 12.

Coliformes totales

Para la realización de esta prueba se contó con el apoyo del Laboratorio especializado Bioindalab, ubicado en la ciudad de Valledupar. Los resultados se muestran en la tabla 13.

Tabla 13. Resultados de coliformes totales

Punto de Muestreo	Coliformes Totales (NPM/g)
P.1 Verano	3×10^7
P.2 Verano	11×10^8
P.1 Invierno	10×10^7
P.2 Invierno	22×10^8

Fuente: Laboratorio bioindalab, 2019.

Como se puede observar en la tabla 13, son similares los comportamientos en la concentración de Coliformes totales, siendo menor en época de verano. Esto puede deberse a la sedimentación registrada en el punto 1 por el arrastre de sedimento de la fuente principal y en el punto 2 registra un aumento dado a que hace un mayor

recorrido la fuente principal, recogiendo sedimentos por todo el lecho de la misma. Por otro lado, en temporada de invierno en el punto 1, no solo se concentra en los sedimentos el aporte del lecho principal sino también el aporte de los mismos por parte de sus tributarios, registro que es superior en el punto 2 porque en este se generan mayor número de tributarios arrastrando sedimentos.

Conductividad eléctrica

En la tabla 14 se presenta los resultados de la conductividad eléctrica, se observan valores constantes en época de verano e invierno. Este resultado cobra relevancia teniendo en cuenta que los metales son excelentes conductores de electricidad.

Tabla 14. Resultados de la Conductividad Eléctrica

Punto de Muestreo	Conductividad ($\mu\text{S/cm}$)
P.1 Verano	150
P.2 Verano	149
P.1 Invierno	146
P.2 Invierno	128

Fuente: Autores, 2018.

Estos valores de conductividad eléctrica se deben principalmente a la baja actividad de iones de hidrógenos (valores altos de pH) que son componentes mayoritarios de aguas básicas de fuentes hidrográficas superficiales. En estas condiciones, no viabiliza la solubilidad de los metales que se encuentran en los sedimentos.

6.2.2 Características granulométricas

Los resultados de las características granulométricas de los sedimentos se observan en la tabla 15.

Tabla 15. Resultados de las características granulométricas.

Tamaño del tamiz	Verano punto 1	Invierno punto 1	Verano punto 2	Invierno punto 2
	Gr			
3/8	17,1	10,4	18,5	1,5
No. 4	30,7	29,9	41,8	17,7
No. 10	89,7	61,6	68,7	28,1
No. 40	664,8	722,7	511,8	679,3
No. 200	190,5	236,9	368,2	294,9
No. 230	50,8	16	53,2	28,8
< 63 µm	37	11,3	31	19,8
Total	1080,6	1088,8	1093,2	1070,1

Fuente: Autores, 2019.

La granulometría del material (tamaño de grano), es un factor importante en la capacidad de retención de los metales. Existe una fuerte correlación positiva entre la disminución del tamaño de grano y la concentración de metales (Horowitz, 1986). Se observó que la cantidad de partículas con diámetros menores o iguales a 63 micras (pasa 230) que representan la fracción más fina del sedimento, se presentaron en mayor proporción en la época de verano, mientras que en la época de invierno esta fracción de sedimento disminuyó proporcionalmente entre punto y punto, siendo este el de menor cantidad de partículas finas. Según Forstner & Wittmann (1982), por lo general la concentración de metales traza en los sedimentos están asociados con la cantidad de partículas finas, lo que en este caso representa una mayor probabilidad de encontrar una mayor concentración de elementos metálicos en los sedimentos de la época de verano.

6.2.3 Concentración de metales pesados

Los resultados se muestran en la tabla 16.

Tabla 16. Resultados de la concentración de los metales.

		Ni	Cu	Fe	Cr	Al	Zn	Pb	As
		mg/kg							
Cuenca Alta	Verano	0	38,94	25519,46	12,48	955,09	103,62	14,51	5,59
Cuenca baja	Verano	11,25	39,54	21141,78	14,79	897,66	143,36	11,08	5,50
Cuenca alta	Invierno	10,41	30,5	16842,07	12,76	320,84	60,73	11,86	6,73
Cuenca baja	Invierno	11,61	18,82	19651,23	12,37	1382,79	86,35	12,55	5,62

Fuente: Unicórdoba.

Nota: Las concentraciones de cadmio en los sedimentos superficiales de las poblaciones estudiadas y del punto control, no fueron detectadas por la metodología empleada (límite de detección = 25 µg kg⁻¹).

6.3 Valores permisibles para metales en sedimentos establecidos por las Guías de Calidad Ambiental Canadiense (CEQG).

En la tabla 17 se observan los límites permisibles para metales en sedimentos establecidos por dos normas canadiense, la primera conocida como ISQG Guía Provisional de Calidad del Sedimento (Interim Sediment Quality Guidelines), y la segunda, como PEL Nivel de Efecto Probable (Probable Effect Level).

Tabla 17. Valores permisibles según ISQG y PEL.

NORMA	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
	mg/kg							
ISQG	5,9	0,6	37,3	35,7	0,17	-	35	123
PEL	17	3,5	90	197	0,486	35,9	91,3	315

Tabla 17. Guanes *et al.*, 2015.

Arsénico

De acuerdo con la concentración de arsénico en la cuenca alta y baja para la época de verano, los valores se encuentran dentro del límite permisible establecido en la norma ISQG (5,9 mg/kg) y PEL (17 mg/kg). Sin embargo, para este mismo elemento en la cuenca alta en época de invierno no cumple con la norma ISQG al tener un valor de 6,8 mg/kg, aunque sí cumple con la norma PEL que establece como valor permisible 17 mg/kg; de igual forma el arsénico en la cuenca baja para la época de invierno cumple con el valor de las dos normas.

Cromo

Las concentraciones del cromo para la cuenca baja y alta en época de verano e invierno se encuentran dentro del rango 12,37 a 14,79 mg/kg estos valores no sobrepasan el permitido por el ISQC que establece un valor de 37,3 mg/kg, de igual forma cumple con la concentración de 90 mg/kg establecidas por la norma PEL.

Cobre

Al comparar las concentraciones de cobre de los sedimentos del río Sororia con el valor permisible según la norma ISQG se puede decir que solo el cobre en la cuenca baja (30,5 mg/kg) en época de invierno y cuenca alta para la misma época (18,82 mg/kg) cumple con el valor de la norma que es de 35,7 mg/kg.

Las concentraciones de cobre en todos los puntos de muestreo para las dos épocas del año analizadas cumplen con la norma PEL.

Níquel

El níquel cumple totalmente con los valores de norma canadiense PEL, ya que según los resultados de la tabla 17, la concentración de este elemento está dentro del rango 0 a 11,61 mg/kg teniendo como valor permisible por la norma 35,9 mg/kg.

Plomo

El plomo cumple totalmente con los valores de la norma ISQG y PEL, ya que según los resultados de la tabla 17, la concentración de este elemento no sobrepasa la concentración de 35 mg/kg y 91,3 mg/kg.

Zinc

La concentración de este elemento no puede sobrepasar el valor de 123 mg/kg según la norma ISQG, los resultados de las concentraciones de zinc de esta investigación para la cuenca alta de verano y para la cuenca alta y baja de invierno cumplen a cabalidad con el valor permisible, sin embargo, no es el caso de la cuenca baja en época de verano, en este punto la concentración de este elemento es de 143,36 mg/kg sobrepasando el valor permitido.

Con respecto a la norma PEL establece que el valor permisible para este elemento es 315 mg/kg, si se compara con los resultados de la tabla 17, se encontró que sí cumplen con este valor.

6.4 Indicadores de contaminación en los sedimentos

6.4.1 Factor de enriquecimiento

En la tabla 18 se presenta el factor de enriquecimiento para los periodos de muestreo de invierno y verano de los metales objeto de estudio.

Tabla 18. Factor de enriquecimiento.

Factor de enriquecimiento	Cuenca alta	Cuenca baja	
Níquel	0,00	0,65	Verano
	0,76	0,73	Invierno
Cobre	1,41	1,73	Verano
	1,67	0,89	Invierno
Cromo	0,67	0,95	Verano
	1,03	0,86	Invierno
Arsénico	1,16	1,37	Verano
	2,11	1,51	invierno
Plomo	1,78	2,06	Verano
	2,21	2,01	Invierno
Zinc	0,95	1,58	Verano
	0,84	1,03	Invierno

Fuente: Autores, 2018.

Se destaca de la anterior tabla que para el elemento níquel no hay enriquecimiento en la cuenca alta ni en invierno ni verano ya que se observa que los valores para este factor de enriquecimiento son menores a 1 ($EF < 1$) la misma situación se observa con el elemento cobre en la cuenca baja en época de invierno, y con el cromo en cuenca alta y baja en época de verano y cuenca baja en época de invierno, y finalmente, el zinc es un elemento en el que no se presenta enriquecimiento en la cuenca alta para la época de verano e invierno.

Por otra parte, el cobre tiene un enriquecimiento menor ya que tanto en cuenca baja como alta en época de verano e invierno se presentan valores dentro del rango de $1 < EF < 3$, asimismo, el cromo en la cuenca alta en época de invierno presenta un enriquecimiento menor; y la misma situación ocurre para el caso de arsénico en cuenca alta y baja en época de verano y para cuenca baja en época de invierno, de igual forma, para el plomo en la cuenca alta en época de verano, y, por último, el zinc en la cuenca baja tanto en época de verano como de invierno.

Si el valor del factor de enriquecimiento es igual o mayor a uno y menor a 3, entonces estos elementos tienen un enriquecimiento menor (Zsefer et al., 1996 citado por Marrugo et al., 2017) como es el caso de arsénico en la cuenca alta para la época de invierno, para el plomo en cuenca baja para la época de verano e invierno y en la cuenca alta en época de invierno.

La investigación de Feira, Marrugo y Gonzáles (2010) en donde se evaluaron la concentración de Al, Fe, Mn, Zn, Cu, Ni, Cr, Hg, Pb y Cd en sedimentos superficiales del río Sinú; muestra que los elementos Cr, Cu, Hg, Pb y Zn tienen un factor de enriquecimiento entre 1 y 2 ($1 < FE < 2$) estos resultados muestran similitud con los factores de enriquecimiento de esta investigación para los elementos cobre, el cromo en la cuenca alta en época de invierno, plomo en la cuenca alta en época de verano, y, por último, el zinc en la cuenca baja tanto en época de verano como de invierno.

Por otra parte, el níquel en la investigación de Feira, Marrugo y Gonzáles (2010) es un elemento altamente enriquecido, resultado que difiere de esta investigación en donde este elemento no presenta enriquecimiento ni en cuenca alta ni baja en ninguna de las dos épocas analizadas.

La investigación de Rubio, Nombela y Vilas (2000) proponen que aquellos valores de Factor de Enriquecimiento (EF) que se aproximan a 1 se consideran que tienen un enriquecimiento de origen natural; mientras que los valores de EF mayores de

1.5 sugieren que estos provienen de una fuente antropogénica o natural que depende de fracción de silicato de aluminio. En este sentido, el níquel presente en la cuenca alta y baja del río Sororia, el cobre en cuenca alta en época de verano y para este mismo elemento en la cuenca baja en época de invierno, el cromo tanto en cuenca alta y baja para las dos épocas analizadas, el arsénico en cuenca alta y baja en época de verano, y, por último, el zinc en cuenca alta para época de verano e invierno y cuenca baja en época de invierno provienen el enriquecimiento de estos elementos de una fuente de origen natural, la cual según Lawson y Winchester (1979) puede ser la roca madre.

Ahora bien, el enriquecimiento de los demás elementos (cobre en cuenca baja en época de verano y cuenca alta en época de invierno, arsénico en cuenca alta y baja para época de invierno, plomo tanto en cuenca alta y baja para invierno y verano, y zinc en la cuenca baja en época de verano) se debe a fuentes de origen antrópico.

6.4.2 Índice de carga contaminante

El índice de carga contaminante (PLI) se calculó en función del factor de contaminación de los metales estudiados (As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn). De esta manera en la tabla 19 se observa que en los dos puntos de muestreo y para las dos épocas del año analizadas (invierno y verano) existe contaminación por metales pesados.

Tabla 19. Índices de cargas contaminantes.

Punto de muestreo	PLI
P.1 Verano	1,49
P.2 Verano	1,37
P.1Invierno	1,14
P.2 Invierno	1,11

Fuente: Autores, 2018

En este caso se puede llegar a afirmar que existe contaminación de origen antrópico, ya que esta zona enfrenta un alto riesgo de contaminación, debido a los residuos provenientes de la explotación carbonífera en el área cercana al municipio y al uso de sus aguas para cultivos industriales, que usan insumos tóxicos (PBOT, 2000).

6.4.3 Índice de toxicidad ERMQ

Se observa en la tabla 20, que en todos los puntos de muestreo la probabilidad de que los metales generen unos efectos adversos sobre la biota es entre el 25 y 30 %, los efectos son bastante graves, en los ríos y lagos afecta principalmente la fauna; entre los efectos negativos, se puede encontrar una inhibición del crecimiento de la planta, ya sea de las raíces como del resto de órganos. También tienen lugar un gran número de daños estructurales, puesto que la presencia de metales pesados en el interior de las células provoca la aparición de especies reactivas de oxígeno (ROS), produciendo estrés oxidativo. Esto, además, produce una inestabilidad de las membranas celulares (Catalá, 2014).

Tabla 20. Índices de toxicidad ERMQ.

Punto de Muestreo	ERMQ	Probabilidad de generar efectos adversos sobre biota (%)	Nivel de probabilidad
P.1 Verano	0,10	25 – 30	Media – baja
P.2 Verano	0,15	25 – 30	Media – baja
P.1 Invierno	0,11	25 – 30	Media – baja
P.2 Invierno	0,11	25 – 30	Media – baja

Fuente: Autores, 2018.

Los metales pesados también afectan a la planta en sus actividades fisiológicas y bioquímicas. En el caso de la anhidrasa carbónica, el átomo de zinc presente en su centro activo es reemplazado por uno de metal pesado, produciendo una gran

disminución de su actividad. Lo mismo sucede con varias de las enzimas implicadas en el ciclo de Calvin. Otros efectos negativos de los metales pesados en plantas son la disminución del contenido en clorofila y del potencial hídrico en las hojas, o el cierre estomático, con la consiguiente falta de CO₂ para llevar a cabo una correcta fotosíntesis (Catalá, 2014).

6.4.4 Índice de toxicidad PELQ

De manera similar, valores de PELQ, < 0,1; 0,11–1,5; 1,51–2,3 y > 2,3 coinciden respectivamente con un 10%, 25%, 50% y 76% de probabilidad en generar toxicidad para la biota, lo cual es consecuente con cuatro niveles de prioridad propuestos: baja, media-baja, media-alta y alta (Long et al., 1995; Violintzis et al., 2009).

Los valores del índice PELQ en todos los puntos de muestreo se encuentran entre el rango de (0,11 – 1,5), lo cual significa que presentan una probabilidad de toxicidad en la biota de 25% aproximadamente. Ambos índices concordaron en que la probabilidad de que se presenten posibles impactos sobre la biota fluctúa en un 25% con un nivel de prioridad medio-bajo.

Tabla 21. Índices de toxicidad PELQ.

Punto de Muestreo	PELQ	Probabilidad de toxicidad en la biota (%).	Nivel de probabilidad
P.1 Verano	0,16	25	Media – baja
P.2 Verano	0,22	25	Media – baja
P.1 Invierno	0,16	25	Media – baja
P.2 Invierno	0,16	25	Media – baja

Fuente: Autores, 2018.

6.4.5 Índice de riesgo ecológico potencial

Como se puede observar en la tabla 22, todos los resultados de índice de riesgo ecológico potencial de cada uno de los elementos se encuentran por debajo de 50 lo cual indica que no hay contaminación en ninguno de los puntos de muestreo ni para la época de invierno ni verano.

Tabla 22. Índices de riesgo ecológico

	Cu	Zn	Ni	Cr	Pb	As	Ri
P1 verano	9,3	1,3	0,0	0,1	11,8	15,2	37,7
P2 verano	9,5	1,7	3,6	0,1	9,0	15,0	38,9
P1 Invierno	7,3	0,7	3,3	0,1	9,6	18,3	39,4
P2 Invierno	1,14	1,0	3,7	0,1	10,2	15,3	31,5

Fuente: Autores, 2018

6.5 Análisis estadístico

6.5.1 Correlación de Pearson

Para determinar las correlaciones entre variables (concentraciones de metales, pH, conductividad eléctrica, porcentaje de materia orgánica y coliformes) se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson que se muestra en la tabla 23.

Los valores resaltados indican la existencia de correlaciones significativas entre las variables analizadas. Es decir, aquellas que poseen comportamientos similares. Se utilizaron valores de probabilidad menores a 0,05 con niveles de confianza de 95 %, resaltadas en color verde, y 0,01 con niveles de confianza de 99 %, resaltadas en color naranja claro.

	pH	CE	MO	CT	Pb	As	Cu	Zn	Ni	Cr	Fe	Al
pH	1											
CE	-0,261	1										
MO	0,284	0,514	1									
CT	-0,893	0,546	-0,288	1								
Pb	0,931	0,063	0,592	-0,785	1							
As	0,158	0,285	-0,437	0,258	0,086	1						
Cu	-0,279	,959*	0,688	0,458	0,083	0,005	1					
Zn	-0,458	0,348	0,649	0,218	-0,196	-0,788	0,586	1				
Ni	-0,685	-0,486	-0,789	0,463	-0,899	-0,122	-0,508	-0,052	1			
Cr	-0,894	0,447	0,170	0,748	-0,691	-0,429	0,562	0,796	0,368	1		
Fe	0,454	0,372	,980*	-0,470	0,717	-0,435	0,546	0,540	-0,834	-0,008	1	
Al	0,333	-0,637	0,303	-0,716	0,265	-0,837	-0,405	0,356	-0,012	-0,130	0,411	1

Tabla 23. Correlación de Pearson.

Fuente: Autores, 2019

Se observa una fuerte correlación positiva ($R > 0,90$; $p < 0,01$) entre el pH y el plomo de lo cual es importante destacar que este hecho quiere decir que al aumentar el pH se presenta mayor contenido de metales en los sedimentos, este es un comportamiento típico por lo siguiente: la materia orgánica al descomponerse contribuye a la acidificación del agua, pero en este caso se observa que a mayor pH la tendencia estaría inclinada a que los metales no se liberarían con facilidad de los sedimentos. Es muy importante el pH del agua ya que niveles bajos o ácidos (producto de vertimientos) contribuyen a la liberación de los metales contenidos en los sedimentos (Fontalvo, 2017).

En la investigación de Fontalvo (2017) se observa que el pH mantiene correlación negativa con la mayoría de los metales excepto As y Ni; sin embargo, los resultados de este proyecto muestran una correlación negativa con el níquel, es decir, que difieren del de la investigación de Fontalvo.

Adicionalmente se observó una correlación moderada negativa ($R > 0,80$; $p < 0,02$) entre pH y coliformes totales (-0,893) y el pH y el Cr (-0,894).

Las correlaciones negativas entre el pH y los metales son coherentes con el aumento de la biodisponibilidad de los metales a medida que disminuye el pH (Marrugo, 2006).

En esta misma línea entre la CE y el Cu (0,959) existe una correlación fuerte. La MO con el Fe (0,980) son las asociaciones que tienen mayor significancia en la investigación. Este resultado corrobora que los metales pesados se unen a la materia orgánica de los sedimentos por procesos de adsorción y que ésta tiene un papel importante en la presencia y distribución de estos. (Hernández-García *et al.*, 2008). La materia orgánica incorpora a los metales a su estructura mediante fenómenos de atracción y generación de compuestos organometálicos, limitando la biodisponibilidad de estos, arrastrándolos y depositándolos en los sedimentos.

Estas correlaciones según Wakida, et al, (2007) generalmente indican un origen común, es decir que existe una gran probabilidad de que la fuente de generación y transporte sean las mismas para estos elementos.

Los resultados de Fontalvo (2017) muestran similitud en cuanto a que hay una correlación inversa o negativa entre la MO y As, asimismo, coinciden con la correlación entre la materia orgánica y el zinc ya que en este estudio (Zn:0,649) y el de Fontalvo (Zn:0,56) se muestra que hay una correlación positiva; sin embargo, para el caso del cromo hay una diferencia clara puesto que Fontalvo afirma que hay una relación inversa entre este elemento y la materia orgánica, y en esta investigación la relación es positiva (0,170).

Cabe resaltar que aunque el programa no marco como significativa las relaciones entre el CT con los metales lo que indica que ninguno de estos elementos proviene de la materia orgánica fecal o excremento de animales presentes en la cuenca. Se observó que el Cr (0,748) está muy cercano de ser significativo; además, existen correlaciones negativas con valores muy altos como el Pb (-0,785), y el Al (-0,716) y el cromo (-0,691).

Es importante resaltar que no hay correlación entre el plomo y el cobre, ni el plomo y el arsénico mientras que en la investigación de Fontalvo (2017) se observa una correlación positiva moderada entre el plomo y el cobre (0,84). Además, en esta investigación hay una correlación negativa moderada con el níquel (-0,899), y la relación entre el Pb y el Fe (0,717) está muy cerca de ser significativo.

El arsénico se correlaciona negativamente moderado con el aluminio (-0,837); mientras que en la investigación de Fontalvo (2017) la correlación entre As y Al es totalmente diferente, siendo una fuerte correlación. De igual forma para la asociación entre As y Cr los resultados de Fontalvo muestran que la correlación es moderada, mientras que en esta investigación no hay significancia.

El Cromo no tiene relaciones con ninguno de los elementos (Zn, Ni, Cr, Fe y Al), de esta manera se puede inferir que estos no tienen la misma fuente de generación ni transporte. Lo mismo ocurre para el Zinc que no presenta correlaciones con el Ni,

Cr, Fe y Al. Aunque es menester aclarar que el zinc se correlaciona con el cromo (0,796) aunque no es moderada, está cerca de serlo.

En cuanto al níquel y su correlación con los demás elementos, se encontró que hay una correlación negativa moderada con el hierro (-0,834), sin embargo, los resultados de Fontalvo (2017) muestran que en su investigación que el níquel y el hierro tuvieron una correlación positiva fuerte. Por otra parte, no hay correlación con el aluminio, y en cuanto al cromo se evidencia una correlación positiva débil (0,368), mientras que en la investigación de Fontalvo (2017) muestra que hay una correlación positiva fuerte entre el níquel y el cromo (0,91).

El Cr no tiene correlación con el elemento hierro, situación muy contraria a la presentada en la investigación de Fontalvo (2017) en donde hay una correlación muy cercana a moderada entre el cromo y el hierro (0,74) para los dos periodos de estudio.

6.5.2 Análisis de Componentes Principales (ACP)

Los resultados del ACP de los contenidos de metales y demás parámetros estudiados en la investigación se encuentran en las tablas 24 y 25, representados en las figuras 1, 2 y 3.

Componente	Autovalores iniciales			Sumas de extracción de cargas al cuadrado			Sumas de rotación de cargas al cuadrado		
	Total	% de varianza	% acumulado	Total	% de varianza	% acumulado	Total	% de varianza	% acumulado
1	4,907	40,893	40,893	4,907	40,893	40,893	4,711	39,261	39,261
2	4,264	35,533	76,426	4,264	35,533	76,426	4,184	34,864	74,124
3	2,829	23,574	100,000	2,829	23,574	100,000	3,105	25,876	100,000
4	5,617E-16	4,681E-15	100,000						
5	4,573E-16	3,811E-15	100,000						
6	2,000E-16	1,667E-15	100,000						

7	1,398E-16	1,165E-15	100,000					
8	-2,486E-17	-2,072E-16	100,000					
9	-2,137E-16	-1,781E-15	100,000					
10	-3,072E-16	-2,560E-15	100,000					
11	-4,140E-16	-3,450E-15	100,000					
12	-6,592E-16	-5,493E-15	100,000					

Tabla 24. Varianza total explicada de los parámetros analizados
Fuente: Autores, 2019.

	Componente		
	1	2	3
Potencial de Hidrogeniones	-1,000	-,005	,000
Conductividad Eléctrica	,257	,885	-,388
Materia Orgánica en Porcentaje	-,288	,854	,433
Coliformes Totales	,892	,175	-,416
Plomo	-,933	,359	,039
Arsénico	-,158	-,065	-,985
Cobre	,274	,955	-,112
Zinc	,455	,564	,689
Níquel	,689	-,722	,061
Cromo	,892	,364	,268
Hierro	-,458	,758	,465
Aluminio	-,331	-,222	,917

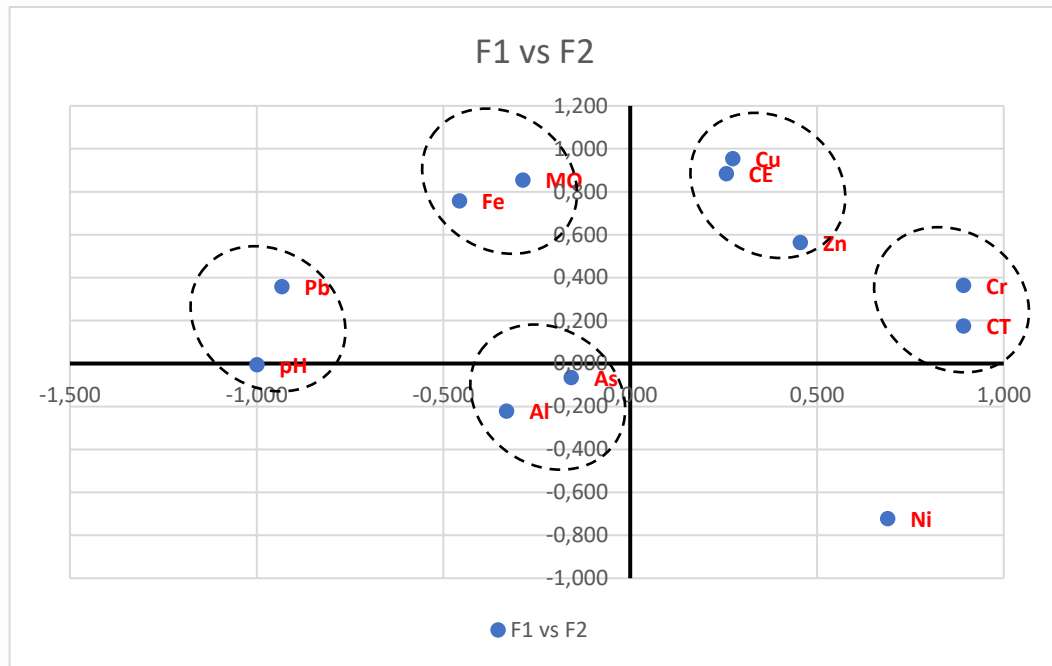
Tabla 25. Matriz de componentes rotados de los parámetros analizados
Fuente: Autores, 2019.

Se extrajeron tres componentes principales que explican el 100 % de la variación de los datos en los puntos de muestreo, de esta manera el factor o componente I, refleja el 40,893 % de la varianza total, en este se presentan asociaciones similares negativas con el pH (-1,000) y el plomo (-0,933). Además, en este factor se asociaron positivamente, pero en menor grado los coliformes totales, níquel y cromo.

El factor II (35,533 % de la varianza total) en este se relacionan parámetros como el cobre (0,955); y en menor proporción la conductividad eléctrica, materia orgánica, Níquel y hierro.

El factor III que representa el 23, 574 % de la varianza total, en este se evidenció una asociación con el arsénico (-0,985), el aluminio (0,917) y el zinc (0,689).

Ilustración 4. Análisis de componentes principales basado en las correlaciones entre los factores I - II.

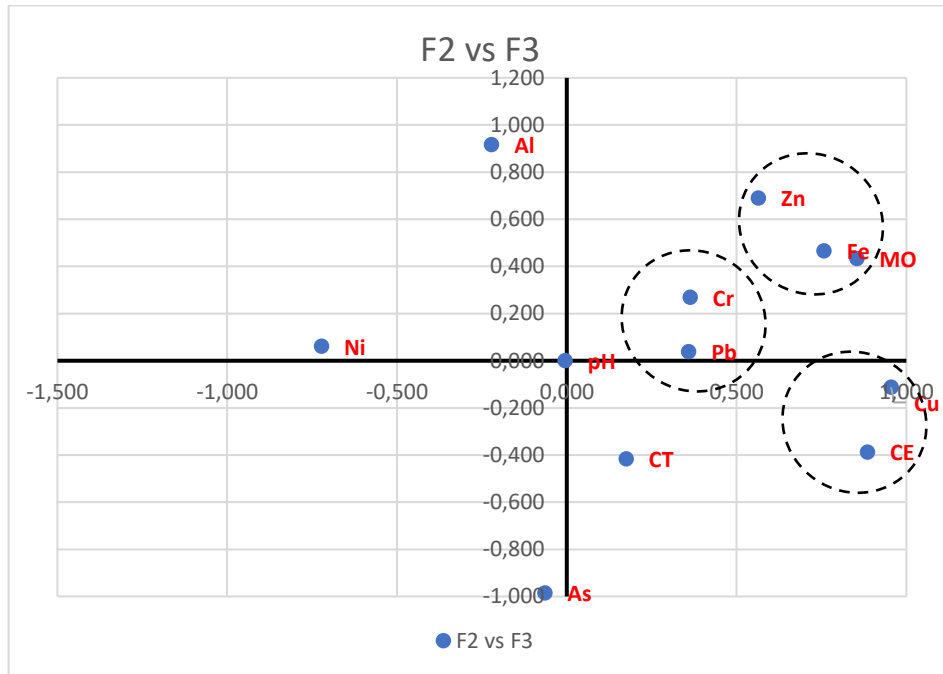


Fuentes: Autores, 2019.

El plano factorial de la figura 1 es el más importante puesto que representa el 77 % de la varianza total; la fuente del Pb puede ser antropogénica, la cual posiblemente está relacionada con la actividad industrial y a los residuos de la actividad minera en la cuenca por efector colector de esta.

Los contenidos de Zn pueden relacionarse con las descargas de aguas residuales domésticas, y se asocia con el Cu y la Conductividad eléctrica lo cual evidencia un origen común. También se observan asociaciones entre el Cr y coliformes totales; As y Al; y, el Fe con la MO, de esta última relación se espera que cuando se remueva la materia orgánica se produzca la liberación de dichos metales, en este caso del hierro.

Ilustración 5. Análisis de componentes principales basado en las correlaciones entre los factores II – III.



Fuentes: Autores, 2019.

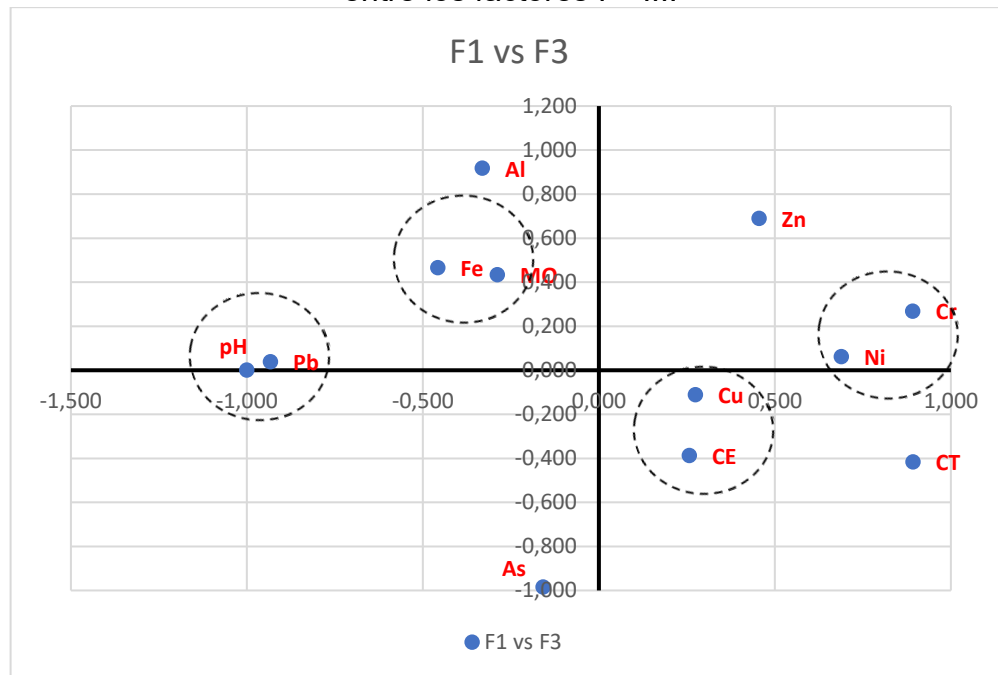
El plano factorial II-III representa el 59 % de la varianza total. Nuevamente se observa una relación entre el Fe y MO, este metal es de origen litogénico e influenciado por la MO facilita los procesos de formación de hidróxidos y óxidos de hierro, además, los contenidos de Zn pueden relacionarse con las descargas de aguas residuales domésticas. Se observan asociaciones entre el Cu y la CE; el Cr y el Pb.

A continuación se presenta la figura 3 que representa al componente I y III, los cuales representan un 64 % de la varianza total, se evidencia nuevamente relaciones entre el pH y el Pb, y el hierro con la materia orgánica, además como se observa en los planos factoriales anteriores persiste la asociación entre el cobre y conductividad eléctrica.

Por otra parte, la asociación del Cr y Ni se relacionan con la aplicación de fertilizantes fosfatados; mientras que el arsénico con el uso de pesticidas. La

acumulación de Cr también puede estar relacionada con las descargas de aguas residuales domésticas que alcanzan la columna de agua del río sin tratamiento alguno.

Ilustración 6. Análisis de componentes principales basado en las correlaciones entre los factores I – III.



Fuentes: Autores, 2019.

7. CONCLUSIONES

Existe un aumento muy notable en los porcentajes de materia orgánica de la época de verano (7,39 y 5,2) en comparación con la época de invierno que los valores son mucho menores (1,77 y 2,96). Por otro lado, el pH en época de verano en el p1 de verano fue de 8,87 y en el p2 de verano fue de 8,39, mientras que en p1 en invierno fue de 8,6 y p2 en invierno de 8,75, de esta manera se evidencia que es mucho más alcalino o más alto el valor en época de invierno que verano, y en general los resultados muestran que el área de estudio tiene una tendencia alcalina que favorece la complejación de metales al sedimento.

Las concentraciones promedio de los metales pesados de la cuenca muestran el siguiente orden decreciente: Fe > Al > Zn > Cu > Cr > Pb > Ni > As. La comparación de las concentraciones de metales pesados con las normas canadienses (ISQG Y PEL) mostraron que el arsénico en la cuenca alta y baja para la época de verano, los valores se encuentran dentro del límite permisible establecido en la norma ISQG y PEL, Sin embargo, para este mismo elemento en la cuenca alta en época de invierno no cumple con la norma ISQG, aunque sí cumple con la norma PEL; el cromo para cuenca baja y alta y en las dos épocas del estudio cumplen con las dos normas legales; por su parte, el cobre en la cuenca baja y alta en época de invierno cumple con el valor de la norma ISQG, mientras que este mismo elemento al ser comparada con la normal PEL cumple con el criterio de este referente legal en todos los puntos de muestreo para las dos épocas del año; el níquel cumple totalmente con los valores de norma canadiense PEL; el plomo cumple totalmente con los valores de la norma ISQG y PEL; el zinc cuenca alta de verano y para la cuenca alta y baja de invierno cumplen a cabalidad con el valor permisible por la norma ISQG, sin embargo, no es el caso de la cuenca baja en época de verano en donde se sobrepasa el valor permitido, y por su parte, este mismo elemento cumple con el criterio o con el valor de la norma PEL.

En cuanto a la correlación de Pearson se observa una fuerte correlación positiva ($R > 0,90$; $p < 0,01$) entre el pH y el plomo; Adicionalmente se observó una correlación moderada negativa ($R > 0,80$; $p < 0,02$) entre pH y coliformes totales (-0,893) y el pH y el Cr (-0,894). Además, las correlaciones negativas entre el pH y los metales son coherentes con el aumento de la biodisponibilidad de los metales a medida que disminuye el pH (Marrugo, 2006). En esta misma línea entre la CE y el Cu (0,959) existe una correlación fuerte. La MO con el Fe (0,980) son las asociaciones que tienen mayor significancia en la investigación. El arsénico se correlaciona negativamente moderado con el aluminio (-0,837). El Cromo no tiene relaciones con ninguno de los elementos (Zn, Ni, Cr, Fe y Al), de esta manera se puede inferir que estos no tienen la misma fuente de generación ni transporte. Lo mismo ocurre para el Zinc que no presenta correlaciones con el Ni, Cr, Fe y Al. Aunque es menester aclarar que el zinc se correlaciona con el cromo (0,796) aunque no es moderada, está cerca de serlo. En cuanto al níquel y su correlación con los demás elementos, se encontró que hay una correlación negativa moderada con el hierro (-0,834).

Con referencia al análisis de componentes principales se extrajeron tres componentes que explican el 100 % de la variación de los datos en los puntos de muestreo, de esta manera el factor o componente I, refleja el 40,893 % de la varianza total, en este se presentan asociaciones similares negativas con el pH (-1,000) y el plomo (-0,933). Además, se asociaron positivamente, pero en menor grado los coliformes totales, níquel y cromo. El factor II (35,533 % de la varianza total) en este se relacionan parámetros como el cobre (0,955); y en menor proporción la conductividad eléctrica, materia orgánica, Níquel y hierro. El factor III que representa el 23, 574 % de la varianza total, en este se evidenció una asociación entre con el arsénico (-0,985), aluminio (0,917) y el zinc (0,689).

En cuanto a los indicadores de contaminación, para el metal níquel no existe enriquecimiento en la cuenca alta ni en invierno ni verano, la misma situación se observa con el elemento cobre en la cuenca baja en época de invierno, y con el

cromo en cuenca alta y baja en época de verano y cuenca baja en época de invierno, además, el zinc es un elemento en el que no se presenta enriquecimiento en la cuenca alta para la época de verano e invierno. Como enriquecimiento menor se presenta el cobre en la cuenca baja y alta en época de invierno y verano; asimismo, el cromo en la cuenca alta en época de invierno; y la misma situación ocurre para el caso de arsénico en cuenca alta y baja en época de verano y para cuenca baja en época de invierno, de igual forma, para el plomo en la cuenca alta en época de verano, y, por último, el zinc en la cuenca baja tanto en época de verano como de invierno. El caso de arsénico en la cuenca alta para la época de invierno, el plomo en cuenca baja para la época de verano e invierno y en la cuenca alta en época de invierno presentan enriquecimiento.

En cuanto al índice de cargas contaminantes se concluye que existe en los dos puntos de muestreo y para las dos épocas del año analizadas (invierno y verano) existe contaminación por metales pesados. Este resultado que es tan importante refleja sin duda una problemática ambiental que se debe abordar de manera urgente, ya que la presencia de estos metales en fuentes hídricas va generando su acumulación en los sedimentos y su posterior disponibilidad por cambios en las variables fisicoquímicas del agua y de los mismos, convirtiéndolos en sustancias potencialmente tóxicas para la población en general.

El índice de toxicidad ERMQ muestra que la probabilidad de generar efectos adversos sobre la biota es de 25 a 30 % para todos los puntos de muestreo, el nivel de probabilidad estimado fue de media a baja. Y, con respecto al índice de toxicidad PELQ la probabilidad de toxicidad en la biota es del 25 % para todos los puntos de muestreo, con un nivel de probabilidad media- baja. El último índice es el de riesgo ecológico potencial, los resultados muestran que cada uno de los elementos se encuentran por debajo de 50 lo cual indica que no hay contaminación en ninguno de los puntos de muestreo ni para la época de invierno ni verano.

8. RECOMENDACIONES

Con el fin de poder tener un espectro mucho más grande en los estudios de este tipo y por ende realizar aportes más significativos al conocimiento se recomienda:

- El Estado debe crear una normatividad en donde se establezca los valores mínimos y máximos permisibles de metales pesados en sedimentos de las fuentes hídricas.
- Las universidades por medio de los semilleros de investigación deben estimular a sus estudiantes en la realización de proyectos con esta temática, sobre todo en el departamento del Cesar en donde los cuerpos de agua tienen problemáticas de contaminación.
- Con apoyo de CORPOCESAR identificar las descargas agrícolas, industriales, mineras y domiciliarias de los municipios ribereños de la cuenca y monitorear el aporte en cuanto a metales e incidencia en las variaciones de los parámetros fisicoquímicos de la columna de agua.
- Las alcaldías y gobernaciones deben priorizar dentro de su plan de desarrollo la protección del recurso agua, por tal motivo se recomienda que estas autoridades diseñen y construyan Plantas de Tratamiento de Agua Residual con el fin de disminuir la concentración de los contaminantes que puedan ir al cuerpo de agua, asegurándose que el vertimiento cumpla con el marco legal colombiano.
- Se recomienda realizar investigaciones relacionadas con el impacto de aspectos ambientales como aguas residuales esto debido a la presencia de coliformes totales corroborados en esta investigación.

BIBLIOGRAFÍA

Acosta, V., Lodeiros, C., Senior, W. & Martínez, G. (2002). Niveles de metales pesados en sedimentos superficiales en tres zonas litorales de Venezuela. *Interciencia* 27(12): 686-690.

COEPA (2007) Identificación y evaluación de riesgos ambientales. Guía de Gerencia de Riesgos Ambientales. <http://www.coeпа.es/GuiasMA/Riesgo%20Ambiental%20def.pdf>

COLCIENCIAS (2016). Tomado de: http://www.colciencias.gov.co/sites/default/files/upload/convocatoria/Anexo3-tipologia-proyectos-version4_1.pdf

Contreras Pérez, José B.; Mendoza, Carmen Leticia; Gómez, Arismendi. (2004) Determinación de metales pesados en aguas y sedimentos del Río Haina *Ciencia y Sociedad*. Vol. 29, núm. 1, enero. Marzo, 2004, pp. 38-71. Recuperado de <http://www.redalyc.org/pdf/870/87029103.pdf>

Del Castillo, I. (2008). Teoría de la depuración biológica. Clase magistral impartida en el curso “Reutilización y tratamiento de aguas residuales”. Maestría en Gestión y Estudios Ambientales, Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica, 15 p

Espinoza, Parra & Villamil (2011) Determinación del contenido de metales pesados en las fracciones geoquímicas del sedimento superficial asociado a los manglares de la ciénaga grande de santa marta, Colombia. Tomado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/mar/v40n1/v40n1a01.pdf>

Forstner, U., & Wittmann, G. (1982). Heavy metal pollution in the aquatic environment. *2nd Ed., Springer-Verlag*, 486.

Guevara Luisa y Romero Sindy (2011). Evaluación De Los Impactos Ambientales Ocasionados Por La Contaminación De Cadmio Y Plomo En Suelo, Agua Y Sedimento, De Los Municipios Tabio Y Tenjo, Pertenecientes A La SubCuenca Del Río Chicú. Trabajo de Grado Ingeniero (a) Ambiental y Sanitario (a). Bogotá D.C.: Universidad de La Salle. Facultad de Ingeniería. Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria, 2011. 113p

Hafida el Mai (2013). Técnicas de preconcentración en el análisis de metales traza. Fraccionamiento químico en el control de la contaminación metálica de la bahía de Tánger.

IDEAM (2004) Determinación de metales pesados totales con digestión acida y soluble lectura directa por espectrofotometría de absorción atómica. Tomado de: <http://www.ideam.gov.co/documents/14691/38155/Metales+en+agua+por+Absorci%C3%B3n+At%C3%B3mica..pdf/e233a63d-378c-4f83-9311-d9375043cf2a>

IDEAM (2009) Procedimiento para el muestreo de aguas y sedimentos para determinación de metales. Tomado de: [http://www.ambientalex.info/guias/IDEAM_PROTOCOLOS_MSFMETALES_PESADOS EN AGUAS Y SEDIMENTOS.pdf](http://www.ambientalex.info/guias/IDEAM_PROTOCOLOS_MSFMETALES_PESADOS_EN_AGUAS_Y_SEDIMENTOS.pdf)

Ley 99 (1993)
<http://www.humboldt.org.co/images/documentos/pdf/Normativo/1993-12-22-ley-99-crea-el-sina-y-mma.pdf>

Mariani, C. & Pompêo, M. (2008). La calidad del sedimento: La contaminación por metales puede ser una amenaza para los seres vivos. Revista Ciencia Hoy, 18(107): 48-53.

MINAM (2011) Guía de evaluación de Riesgos Ambientales. <http://minam.gob.pe/calidadambiental/.pdf>

Ministerio de Trabajo e Inmigración. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo. Capítulo 63 - Metales: propiedades químicas y toxicidad. Gunnar Nordberg (1998).

Moreno-Grau M. D. Toxicología Ambiental. Evaluación de riesgo para la salud humana. Mc Graw Hill/ Interamericana de España, S. A. U. Aravaca, Madrid (2003).

NORMA UNE 150008.2000. EX – Análisis y Evaluación de Riesgos Ambientales. Unión de Naciones Europeas. http://www.cma.gva.es/comunes_asp/documentos/agenda/val/58855-Norma%20UNE%20150008%20INSTITUCIONAL%20Valencia%2029%20eneroR1%20-%20OK.pdf

Obando (2009), Breves anotaciones conceptuales sobre El Ambiente, su tipología, y métodos de estudio. <http://www.monografias.com/trabajos-pdf2/conceptos-ambiente-tipologia/conceptos-ambiente-tipologia.pdf>

OMS (Organización Mundial de la Salud). Report on trace elements in human nutrition and human health, Ginebra (1996).

Pérez G. G. Disponibilidad de metales tóxicos en sitios contaminados. Aplicaciones y limitaciones de la fraccionación en la determinación de gradientes de polución. Tesis, Universidad Autónoma de Barcelona. Abril (2005).

Rodríguez (2011) Evaluación preliminar del impacto por contaminación de plomo y cadmio en agua, suelo y sedimento en 4 puntos de la sub-cuenca del río Tunjuelo. Tomado de: <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/14003/T41.11%20R618ev.pdf?sequence=1>

Spiro T. y Stigliani W. Química Medioambiental. Ed. Pearson-Prentice Hall, 2ª edición S. A. Madrid (2004).

Treble R, Thompson T (1997). Preliminary results of a survey of lead levels in human liver tissue. Bull Environ Contam Toxicol 59(5): 688-695.

WEAST, T. (1984). Metales pesados en ciclos biológicos. Editorial Iberoamericana. Guadalajara, México. P. 421-423

ANEXOS


Anexo A. Evidencia de la toma de muestras



Anexo B. Evidencia de los análisis en los laboratorios de la Universidad Popular del Cesar.



Anexo C. Evidencia de los análisis en los laboratorios de la Universidad de Córdoba.

	INFORME DE RESULTADOS	CÓDIGO: FLTX-002 VERSIÓN: 01 EMISIÓN: 01/06/2017 PÁGINA 1 de 1
	LABORATORIO DE TOXICOLOGÍA Y GESTIÓN AMBIENTAL	

Cons. N°: 18-177

CLIENTE: Universidad Popular del Cesar	SOLICITADO POR: Luis Montoya
CONVENIO/PROYECTO: -	
TIPO DE MUESTRA: Sedimentos y material en suspensión	
TOTAL MUESTRAS: 31	
RESPONSABLES DE MUESTREO: CLIENTE	RECEPCION EN LABORATORIO: S.B.
FECHA DE MUESTREO: N.A.	RESPONSABLES DE ANALISIS: I.U.
FECHA RECEPCION MUESTRAS:	18/07/2018
METODO DE ANALISIS: Método de digestión EPA3051A. Pb, Cd: GFAAS; As:HGAAS; Cu, Zn, Ni, Fe, Al, Cr: FLAAS	

SEDIMENTOS										
CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	Pb	Cd	As	Cu	Zn (LDM:8)	Ni	Fe	Al	Cr (LDM:10)
		(LDM: 80)	(LDM:25)	(LDM: 80)	(LDM:15)		(LDM:10)	(LDM:25)	(LDM: 400)	
		µg/kg				mg/kg				
TX-180718-14	Río Calenturitas - 26/11/2017 - Invierno - P2	7830,74	104,43	6485,38	34,84	190,50	23,08	24729,39	2016,78	16,60
TX-180718-15	Río Calenturitas - 26/11/2017 - Invierno - P3	14338,00	54,77	7346,62	40,82	135,41	30,55	31782,43	4906,96	19,72
TX-180718-16	Río Calenturitas - 18/03/2018 - Verano - P1	7339,59	44,63	5431,94	31,17	140,13	18,72	21064,32	1273,15	14,60
TX-180718-17	Río Calenturitas - 18/03/2018 - Verano - P2	8760,95	47,42	5185,30	34,53	152,93	27,39	22694,11	1816,02	15,44
TX-180718-18	Río Calenturitas - 18/03/2018 - Verano - P3	13876,65	45,54	5619,64	25,67	141,68	23,22	25937,56	1272,42	17,01
TX-180718-19	Río Sororia - 08/04/2018 - Verano - P1	14510,21	<25	5599,89	38,94	103,62	<10	25519,46	955,09	12,48
TX-180718-20	Río Sororia - 08/04/2018 - Verano - P2	11086,36	<25	5507,34	39,54	143,36	11,25	21141,78	897,66	14,79
TX-180718-21	Río Sororia - 20/05/2018 - Invierno - P1	11866,17	<25	6735,74	30,50	60,73	10,41	16842,07	320,84	12,76
TX-180718-22	Río Sororia - 20/05/2018 - Invierno - P2	12555,56	<25	5627,71	18,82	86,35	11,61	19561,23	1382,78	12,37

Anexo D. Evidencia de los análisis en los laboratorios Bioindalamb.

	FORMATO REPORTE DE RESULTADOS	VIGENCIA	
		14 - 01 - 17	
		VERSION: 1	PAG:2

REPORTE DE ENSAYO
 No 1419-2

ODS No.	1419-2
Códigos:	0418 -1419-2

I. INFORMACIÓN DEL SOLICITANTE

CLIENTE:	Grupo de Investigación Estudios Sanitarios y Ambientales – E.S.A.			NIT/C.C.	N.I.
CONTACTO/CARGO:	Luis Montoya	DIRECCIÓN:	Becerril		
DEPARTAMENTO:	Cesar	MUNICIPIO:	El Paso	TELÉFONO:	

II. INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

CÓDIGO	NATURALEZA DE LA MUESTRA	IDENTIFICACIÓN	LUGAR DE MUESTREO	MUESTRA TOMADA POR		Laboratorio		
				FECHA DE MUESTREO	HORA	2018-04-08	08:00 am	
0418 -1419-2	SEDIMENTO	RIO SORORIA - VERANO	P1: CABECERA DEL RÍO P2: LA JAGUA DE IBIRICO	FECHA DE INGRESO MUESTRA	2018-04-08	HORA:	04:25 pm	
				FECHA INICIO DE ENSAYOS	2018-04-08			
				FECHA FINALIZ. DE ENSAYO	2018-04-28			
				FECHA DE REPORTE	2018-04-28			

N.A. No aplica

N.I. Información no suministrada

III. RESULTADOS

FISICO-QUÍMICOS

MICROBIOLÓGICOS

RESULTADOS

ENSAYO	METODO DE REFERENCIA	UNIDAD	VALOR DE REFERENCIA	0418 -1419-2 P1	0418 -1419-2 P2
Coliformes Totales	NPM/g	NPM/g	-	3x10 ⁷	11x10 ⁸

Nota: Los resultados sólo están relacionados con las muestras analizadas. Es válido únicamente con firmas y en original. Este informe de resultados no deberá reproducirse parcial ni totalmente sin la aprobación por escrito del Laboratorio. LABORATORIOS BIOINDALAMAB se compromete a mantener la confidencialidad de los resultados de los ensayos.

PEDRO JOSÉ FRAGOSO
 BACTERIÓLOGO-MSC, PhD
 TP: 507-02

PEDRO JOSE FRAGOSO C.
 Bacteriólogo MSc. Ciencia y Tecnología de Alimentos

Dirección calle 8ª N 22-80 Valledupar. TEL.5700657, CEL. 3166954067. www.bioindalamb.com
 E – mail. pedrojosefragoso@gmail.com, bioindallab@gmail.com



FORMATO REPORTE DE RESULTADOS

VIGENCIA	
14 - 01 - 17	
VERSION: 1	PAG:2

REPORTE DE ENSAYO
No 1432-2

ODS No.	1432-2
Códigos:	0518 -1432-2

I. INFORMACIÓN DEL SOLICITANTE

CLIENTE:	Grupo de Investigación Estudios Sanitarios y Ambientales – E.S.A.		NIT/C.C.	N.I.
CONTACTO/CARGO:	Luis Montoya	DIRECCIÓN:	Becerril	
DEPARTAMENTO:	Cesar	MUNICIPIO:	El Paso	TELÉFONO:

II. INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

CÓDIGO	NATURALEZA DE LA MUESTRA	IDENTIFICACIÓN	LUGAR DE MUESTREO	MUESTRA TOMADA POR		Cliente	
				FECHA DE MUESTREO	HORA:	2018-05-20	08:00 am
0518 -1432-2	SEDIMENTO	RIO SORORIA - INVIERNO	P1: CABECERA DEL RÍO P2: LA JAGUA DE IBIRICO	FECHA DE INGRESO MUESTRA	2018-05-20	HORA:	04:25 pm
				FECHA INICIO DE ENSAYOS	2018-05-20		
				FECHA FINALIZ. DE ENSAYO	2018-06-16		
				FECHA DE REPORTE	2018-06-16		

N.A. No aplica

N.I. Información no suministrada

III. RESULTADOS

FISICO-QUÍMICOS

MICROBIOLÓGICOS

RESULTADOS

ENSAYO	METODO DE REFERENCIA	UNIDAD	VALOR DE REFERENCIA	0518 -1432-2 P1	0518 -1432-2 P2
Coliformes Totales	NPM/g	NPM/g	-	10x10 ³	22x10 ⁸

Nota: Los resultados sólo están relacionados con las muestras analizadas. Es válido únicamente con firmas y en original. Este informe de resultados no deberá reproducirse parcial ni totalmente sin la aprobación por escrito del Laboratorio. LABORATORIOS BIOINDALAMAB se compromete a mantener la confidencialidad de los resultados de los ensayos.

PEDRO JOSÉ FRAGO
BACTERIOLOGO MSC.
TP: 507-02

PEDRO JOSE FRAGOSO C.
Bacteriólogo MSc. Ciencia y Tecnología de Alimentos

Dirección calle 8ª N 22-80 Valledupar. TEL.5700657, CEL. 3166954067. www.bioindalamb.com
E – mail. pedrojosefragoso@gmail.com, bioindallab@gmail.com