

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL INDUSTRIAL



**ÍNDICES DE CALIDAD DE AGUA Y SEDIMENTO EN LA CUENCA DEL RÍO  
LLAUCANO  
CLAUDIA NATALIA WEISSE PINTO**

**INFORME DE PROYECTO DE TÍTULO PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL**

**Profesor Guía:** Dr. Pedro Tume Zapata

Concepción, Diciembre de 2015.

## Resumen

El informe a continuación se desarrolló con el fin de conocer aspectos relevantes sobre el estado de calidad de aguas y sedimento en zonas de fuerte actividad minera, como el origen de la contaminación y su variación espacial. Se utilizaron datos de muestras obtenidas por el Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura, Perú. El estudio se centró en la subcuenca del río Llaucano, subcuenca del río Tingo-Maigasbamba y subcuenca del río Arascorgue.

Inicialmente fueron aplicadas técnicas de análisis univariado, bivariado y multivariado para obtener un análisis exploratorio de los datos. Posteriormente se calculó con los datos de aguas el Índice de Calidad de Aguas Canadiense (CWQI) según dos normas, la norma peruana y las normas más restrictivas de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA, Chile).

Con los datos de sedimento, fueron calculados el factor de enriquecimiento (FE), el índice de geoacumulación ( $I_{GEO}$ ) y el factor de contaminación (Cf) que deriva en el grado de contaminación ( $C_{DEG}$ ) y el índice integrado de contaminación (IPI).

Finalmente, se realizó una interpretación de datos de agua y sedimento conjuntamente, con el fin de facilitar el entendimiento y análisis de los resultados obtenidos, incluyendo cuadros y figuras.

Los resultados del CWQI obtenidos según la norma peruana, indican que la calidad de agua es de marginal a excelente en el río Llaucano, mayoritariamente pobre en el río Tingo-Maigasbamba y pobre en toda la subcuenca del río Arascorgue. Para la norma restrictiva, los niveles bajan en promedio de 11 a 12 puntos y no alcanza nivel excelente de calidad de aguas en ningún punto muestreado.

En general, con los índices de sedimento se obtuvo que su calidad disminuye y se enriquece con algunos metales pesados solo en algunos puntos de las subcuencas, usualmente los que se encuentran inmediatamente después de activos o pasivos mineros.

## **Abstract**

The report below was developed in order to meet relevant aspects of the state of water quality and sediment in areas of high mining activity as the source of the pollution and its spatial variation. Were used sample data obtained by the Institute of Hydraulics, Hydrology and Sanitary Engineering of the University of Piura, Peru. The study focused on the sub-basin of Llaucano river, sub-basin of Tingo-Maigasbamba river and sub-basin of Arascorgue river.

Initially techniques were applied univariate analysis, bivariate and multivariate analysis for exploratory data analysis. Later it was calculated with water data the Canadian Water Quality Index (CWQI) according to two standards, the Peruvian standard and tighter standards of the World Health Organization (WHO) and the National Environmental Commission (CONAMA, Chile). With sediment data were calculated the enrichment factor (EF), geoaccumulation index ( $I_{GEO}$ ) and the contamination factor (Cf) which leads to the contamination degree ( $C_{DEG}$ ) and the integrated pollution index (IPI). Finally, a data interpretation water and sediment together, in order to facilitate understanding and analysis of the results, including tables and figures performed.

CWQI results obtained under Peruvian standards, indicates that water quality is marginal to excellent in the Llaucano, mostly poor in Tingo-Maigasbamba and poor throughout the sub-basin of the Arascorgue river. For restrictive standard levels drop in average 11-12 points and not enough good quality of water in any sampled point.

In general, rates of sediment was obtained that the quality decreases and is enriched with some heavy metals only in some parts of sub-basins, which are usually immediately after mining assets or liabilities.

## **Dedicatoria**

Este proyecto está dedicado a cada una de aquellas personas que creyeron firmemente en el logro de este desafío.

A mis compañeros que me apoyaron incondicionalmente durante este largo camino.

A mi profesor guía, Dr. Pedro Tume, por su dedicación y paciencia.

A mi familia, amigos y seres queridos por darme el soporte durante estos años.

A Franco, por su apoyo, amistad, compañerismo e inmenso amor.

Muchas gracias.

## Contenido

Resumen.....	i
Abstract .....	iii
Dedicatoria y agradecimientos .....	iv
Índice de figuras.....	vii
Índice de tablas.....	viii
1.1 Introducción.....	9
1.2 Objetivo General .....	10
1.3 Objetivos Específicos.....	10
1.4 Justificación de la propuesta .....	10
2.1 Calidad del Agua.....	13
2.2 Índices de Calidad de Agua.....	14
2.3 Calidad del Sedimento.....	15
2.4 Índices de Calidad de Sedimento.....	16
3.1 Área de estudio .....	18
3.2 Caracterización de la cuenca hidrográfica del río Llaucano .....	19
3.2.1 Características físicas .....	19
3.2.2 Geología .....	19
3.2.3 Principales actividades económicas .....	22
3.2.4 Potenciales factores que Influyen en la calidad del agua en la cuenca del Río Llaucano .....	22
3.2.5 Toma de muestras de agua y sedimentos .....	23
3.2.6 Puntos de muestreo .....	25
3.3 Índice de Calidad de Agua Canadiense (CWQI).....	30
3.3.1 Parámetros utilizados en los índices de calidad de agua y sedimento .....	32
3.3.1.1 Efectos sobre la salud humana y el medio ambiente .....	33
3.3.1.2 Límites de los parámetros establecidos según la norma peruana.....	38
3.3.1.3 Límites de los parámetros establecidos según las normas más restrictivas ..	39
3.4 Factor de enriquecimiento (FE) .....	40
3.5 Índice de geoacumulación ( $I_{GEO}$ ) .....	41
3.6 Factor, grado e índice integrado de contaminación.....	42

3.7 Valores de fondo (Background values) .....	43
3.7.1 Método iterativo media + 2SD .....	44
3.7.2 Método mediana + 2MAD .....	45
3.7.3 Upper Whisker.....	45
3.7.4 Método de la función de distribución calculada.....	45
3.8 Análisis de los puntos de muestreo en la cuenca del Río Llaucano .....	46
3.8.1 Análisis univariado: .....	46
3.8.1.1 Estadística descriptiva de los datos de aguas y sedimento.....	46
3.8.2 Métodos de análisis bivariado.....	46
3.8.3 Métodos de análisis multivariado.....	47
3.8.3.1 Análisis de componente principales (ACP).....	47
3.8.3.2 Análisis de conglomerados jerárquico .....	47
Estudio de aguas en la cuenca del Río Llaucano .....	48
4.1 Técnicas de análisis univariante.....	48
4.2 Técnicas de análisis bivariante.....	49
4.3 Técnicas de análisis multivariante.....	50
4.3.1 Análisis de componentes principales (ACP).....	50
4.3.2 Análisis de conglomerados jerárquico .....	52
4.4 Índice de calidad de aguas .....	54
Estudio de sedimentos en la cuenca del río Llaucano.....	60
4.5 Técnicas de análisis univariante.....	60
4.6 Técnicas de análisis bivariante.....	61
4.7 Técnicas de análisis multivariante.....	61
4.7.1 Análisis de componentes principales (ACP).....	61
4.7.2 Análisis de conglomerados jerárquico .....	63
4.8 Determinación de valores de fondo.....	65
4.9 Índices de calidad de sedimento .....	66
4.9.1 Factor de enriquecimiento.....	66
4.9.2 Índice de geoacumulación .....	68
4.9.3 Factor de contaminación.....	68
4.9.3.1 Grado de contaminación .....	69
4.9.3.2 Índice integrado de contaminación .....	70

4.10 Caracterización conjunta de agua y sedimento en la cuenca del río Llaucano .....	70
4.10.1 Análisis estadístico.....	70
4.10.2 índices de calidad de agua y sedimento .....	71
4.10.3 Análisis individual de los puntos de muestreo de agua y sedimento.....	75
Conclusiones.....	81
Referencias .....	83
Anexo .....	88

## Índice de figuras

Figura 1: Ubicación de la Provincia de Hualgayoc en Perú.....	18
Figura 2: Mapa geológico del distrito minero de Hualgayoc .....	21
Figura 3: Equipo para toma de muestras in-situ .....	25
Figura 4: Ubicación de los puntos de muestreo .....	26
Figura 5: Puntos de muestreo subcuenca Río Tingo-Maigasbamba. ....	27
Figura 6: Puntos de muestreo subcuenca Río Arascorgue. ....	28
Figura 7: Puntos de muestreo en la subcuenca del río Llaucano.....	29
Figura 8: a) Círculo de correlaciones primera y segunda componente, b) Círculo de correlaciones tercera y cuarta componente (agua).....	52
Figura 9: Análisis de conglomerados para aguas de toda la cuenca .....	53
Figura 10: Resultados CWQI toda la cuenca .....	59
Figura 11: a) Círculo de correlaciones primera y segunda componente, b) Círculo de correlaciones tercera y cuarta componente (sedimento).....	63
Figura 12: Análisis de conglomerados para sedimentos de toda la cuenca .....	64
Figura 13: ICA 1 toda la cuenca del río Llaucano .....	72
Figura 14: ICA 2 toda la cuenca del río Llaucano .....	73
Figura 15: Grado de contaminación toda la cuenca del río Llaucano .....	74

## Índice de tablas

Tabla 1: Límites máximos de parámetros en el agua dulce en Perú .....	39
Tabla 2: Límites máximos restrictivos para el agua dulce en Chile y el mundo .....	40
Tabla 3: Componentes principales y sus porcentajes de varianza (aguas) .....	51
Tabla 4: Resultados CWQI subcuenca del río Llaucano (norma peruana) .....	55
Tabla 5: Resultados CWQI subcuenca del río Arascorgue (norma peruana) .....	55
Tabla 6: Resultados CWQI subcuenca del río Tingo-Maigasbamba (norma peruana) .....	56
Tabla 7: Resultados CWQI subcuenca del río Llaucano (norma restrictiva) .....	57
Tabla 8: Resultados CWQI subcuenca del río Arascorgue (norma restrictiva) .....	57
Tabla 9: Resultados CWQI subcuenca del río Tingo-Maigasbamba (norma restrictiva) ...	58
Tabla 10: Componentes principales y sus porcentajes de varianza (sedimento) .....	62
Tabla 11: Análisis individual de los puntos de muestreo de agua y sedimento .....	76
Tabla 12: Análisis individual de los puntos de muestreo de agua y sedimento (continuación).....	77
Tabla 13: Análisis individual de los puntos de muestreo de agua y sedimento (continuación).....	78
Tabla 14: Análisis individual de los puntos de muestreo de agua y sedimento (continuación).....	79
Tabla 15: Análisis individual de los puntos de muestreo de agua y sedimento (continuación).....	80

# Capítulo 1: Antecedentes generales de la investigación

---

## 1.1 Introducción

El agua es un recurso imprescindible para el desarrollo de la vida. Para el ser humano va más allá, ya que contribuye también en su desarrollo económico y social. Las aguas superficiales obtenidas de los ríos son la principal fuente para llevar a cabo las actividades del hombre, ya sea por su facilidad de obtención como por su disponibilidad (Criado y Herrera, 2014). Sin embargo, a causa del incremento poblacional, intensidad industrial y urbanización, se ha generado una explotación y agotamiento de este recurso natural, así como una desmesurada contaminación (Acosta *et al.*, 2009).

Perú es el país con mayor actividad minera en el continente, lo que lo convierte en un destino atractivo para los inversionistas. En consecuencia, las instalaciones mineras así como sus pasivos (canchas de relaves, minas sin operación, entre otros), empobrecen la calidad del agua y enriquecen el lecho del río con metales pesados peligrosos como el plomo, mercurio, manganeso y arsénico, volviéndose un riesgo para la salud humana y el medio ambiente (Macfarlane y Petersen, 1990).

En Hualgayoc, se explotan minerales desde 1772 hasta la actualidad. La causa principal de conflictos sociales es la llegada de la minería a tajo abierto y la gran cantidad de pasivos ambientales acumulados (alrededor de 1250 zonas de desperdicios) por más de dos siglos y medio. Los principales afectados son las familias de los distritos de Hualgayoc y Bambamarca quienes utilizan las aguas del río Tingo-Maigasbamba para regar sus sembradíos a través de canales, contaminando sus vegetales y animales para consumo con aguas no aptas (Herrera, 2013).

El proyecto a continuación contempla un análisis espacial de la cuenca, a nivel de agua, de sedimento y en conjunto, considerando 22 elementos químicos y 2

elementos físicos en las subcuencas de los ríos Tingo-Maigasbamba, Arascorgue y Llaucano, con datos aportados por el Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura.

## **1.2 Objetivo General**

Determinar el estado de la calidad del agua y del sedimento en la cuenca del Río Llaucano.

## **1.3 Objetivos Específicos**

- 1.- Determinar índices de calidad del agua en el área de estudio.
- 2.- Determinar índices de calidad del sedimento en el área de estudio.
- 3.- Caracterizar el área de estudio mediante evaluación de similitudes y diferencias entre los puntos de monitoreo.

## **1.4 Justificación de la propuesta**

La demanda por alimento, agua y otros elementos presentes en el entorno natural, se ha incrementado a medida que avanza tanto el crecimiento poblacional como el desarrollo de las comunidades, afectando directamente a los ecosistemas, alterando sus capacidades y obligándolos a absorber los impactos provocados por el hombre (Criado y Herrera, 2011).

Perú es reconocido a nivel internacional gracias a su riqueza geológica y antigua tradición minera, donde se destaca la producción de oro, plata, cobre, plomo, zinc, hierro, estaño, molibdeno, telurio, entre otros. Ha adquirido numerosos tratados y convenios con importantes economías en el mundo, pertenece a la Asia Pacific Economic Cooperation (APEC) y es miembro de la Comunidad Andina de Naciones (CAN), convirtiéndose en uno de los países con mayor atractivo para los inversionistas del rubro minero en Latinoamérica (MINEM, 2015).

La CAN es una entidad conformada por cuatro países: Bolivia, Colombia, Ecuador y Perú. En ésta área se concentra el 20% de la biodiversidad total del planeta, el 35% de los bosques de América Latina y el 10% del agua dulce del mundo.

En 2008 se creó un protocolo de evaluación de la calidad ecológica de los ríos andinos (CERA), debido a que la actividad minera es una de las principales fuentes de contaminación en la zona y los estudios de impacto ambiental respectivos no se realizan adecuadamente (Acosta *et al.*, 2009), aun cuando la actividad minera tiene serias implicancias en el entorno. Algunas de ellas son la alteración de las aguas superficiales por los minerales que contiene la lluvia, la filtración de soluciones de cianuro y metales pesados por el proceso de lixiviación y también es preocupación en Cajamarca la disminución en la cantidad de agua ya que la mina de Yanacocha usa los afluentes superiores de las cuencas (Castillo, 2003).

En los últimos años, los países en Latinoamérica aún no logran cubrir totalmente el abastecimiento y saneamiento del agua. En el año 2009 en Perú, sólo se alcanzó al 51,6% de disponibilidad de desagüe por red pública dentro de las viviendas (Miranda *et al.*, 2010). Lo anterior implica que las aguas superficiales son una fuente importante de abastecimiento para todos los usos.

En 2011 se aprobó la Estrategia Andina para la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (EA-GIRH), donde se reafirma la importancia de la riqueza hídrica de los países andinos como herramienta de desarrollo sostenible y lucha contra la pobreza, entendiendo el agua como “un recurso de carácter vital y estratégico para la integración” (Criado y Herrera, 2011).

La calidad del agua superficial es un sensible problema a nivel mundial y está principalmente determinada por procesos naturales como depósitos geológicos y degradación biológica de la materia orgánica y también por procesos industriales, el desarrollo, la agricultura, desvíos de los flujos, entre otras actividades humanas (Marinović y Ruždjak, 2015).

Para su monitoreo existen varios tipos de Índices de Calidad del Agua (ICA), sin embargo, para la evaluación de la calidad de sedimento, son muy reducidos los estándares de regulación a nivel mundial, existiendo países (entre ellos, Perú) que carecen absolutamente de normativas y líneas de base al respecto (Allieri y Macías, 2007).

En las cabeceras de cuenca de dos de los ríos que se analizarán, la industria minero-metalúrgica es muy activa y las explotaciones mineras datan de la época de la Colonia (siglo XVI), lo que explica el abandono y gran presencia de pasivos ambientales, que comparten espacio con las empresa mineras actualmente operativas, que aparte de aportar metales pesados debido al ejercicio, poseen sus canchas de relave, donde se depositan sus residuos sólidos que resultan del proceso de concentración de materiales.

Lo anteriormente mencionado, ha producido impacto en el suelo, fauna y flora local, además de condicionar el uso de aquellas aguas para el consumo humano, ganadero y agrícola.

## Capítulo 2: Revisión Bibliográfica

---

### 2.1 Calidad del Agua

En el 2015, Marinović y Ruždjak señalan que la degradación de la calidad del agua puede dar lugar a la alteración de la diversidad de especies, disminuir el bienestar de ecosistemas acuáticos y causar un grave daño a la salud humana y al medio ambiente.

El suministro de agua potable segura tiene un impacto significativo en la prevención de enfermedades transmitidas por el agua por lo que un mayor deterioro de la calidad puede plantear graves amenazas de salud, incluyendo brotes de epidemias (Kochhann, 2013).

Perú se encuentra en una región del planeta con características climáticas bastante importantes y cuenta con una riqueza hídrica que constituye un gran factor de desarrollo, siempre y cuando sea aprovechado y manejado de una manera sostenible. Cabe destacar que sobre el territorio de la comunidad andina (CAN) llueve en promedio 1853 mm/año, más que el doble del promedio global, estimado en 900 mm/año (Criado y Herrera, 2011).

En este país se encuentra la provincia de Cajamarca, que alberga la mina de oro más grande de Sudamérica, el yacimiento de Yanacocha, donde existe evidencia de que en los ríos aledaños están presentes elevados niveles de metales pesados como el Plomo, el Arsénico y el Cadmio (Barenys *et al.*, 2014), que pueden ser absorbidos por animales y plantas y éstos a la vez ser alimento del ser humano. Estos metales pueden ser dañinos, hasta letales, al ser consumidos en cantidades por sobre el umbral de toxicidad (Higuera, 2015).

Los campesinos que habitan la zona y realizan actividades agropecuarias (cultivo de maíz, trigo, cebada, papa y pastoreo de ganado), se abastecen de pequeñas fuentes naturales de agua como el río Tingo-Maigasbamba y se ven afectados a

consecuencia de la alteración de la calidad de las aguas tales como: alta turbidez, cambios de pH, presencia de aluminio, hierro, manganeso, cobre, entre otros.

## **2.2 Índices de Calidad de Agua**

Valorar la calidad del agua se entiende como la evaluación de su naturaleza química, física y biológica en relación a la calidad natural, al uso dado y a los efectos antropogénicos (Torres *et al.*, 2009).

Para simplificar la interpretación de los datos de dicha evaluación, existen los índices de calidad del agua (ICA) que reducen grandes cantidades de parámetros a un pequeño número de variables fáciles de entender para todo aquel que tenga acceso (Torres *et al.*, 2009).

En el último siglo, varios países europeos y norteamericanos han desarrollado y aplicado dos diferentes sistemas para clasificar la calidad del agua. El primero centrado en la contaminación y el segundo en la abundancia de organismos vivos presentes en el agua. Estos, en vez de asignar valores numéricos, categorizan los cuerpos de agua en una de varias clases o niveles (Behar *et al.*, 2011).

Brown y otros, apoyados por la National Sanitation Foundation (NSF), crearon en el año 1970 en Estados Unidos un índice basado en la estructura del índice de Horton, conocido como el Índice de Calidad de Agua de la NSF (Behar *et al.*, 2011). Este índice es muy utilizado en todo el mundo a pesar de haber sido creado en Estados Unidos, ya que considera las características de la fuente de captación de agua para ser destinada al consumo humano (Torres *et al.*, 2009).

La fórmula de agregación para el cálculo del índice ICA se determina mediante dos métodos: la media aritmética ponderada y la media geométrica ponderada, que son las fórmulas más utilizadas en la construcción de los ICAs (Valdés *et al.*, 2011).

Sin embargo, para los parámetros muestreados en esta oportunidad, no es conveniente el uso del ICA de la NSF (a pesar de ser uno de los más utilizados y conocidos), sino que se recurre al Índice Canadiense de Calidad de Aguas (CWQI), ya que con él es posible considerar las variables asociadas a la presencia de metales pesados en el agua.

En 1997, para proporcionar un sistema homogéneo, el Consejo Canadiense de Ministros de Medio Ambiente (CCME) formó el Subcomité Técnico de Índices de Calidad del Agua para estandarizar protocolos para calcular el CWQI. El objetivo de este subcomité fue evaluar diferentes enfoques y desarrollar un índice unificado la calidad del agua que podría ser utilizado para la evaluación de la calidad del agua (Khan *et al.*, 2003).

Este índice de calidad del agua se basa en un enfoque totalmente diferente que incluye un factor adicional no considerado en otros índices. Tiene la más extensa aplicación y desarrollo, en comparación a los otros índices utilizados en Canadá. A la vez, algunos de sus factores son análogos a los componentes de otros índices. F2 es similar al índice de Alberta y F3 es similar al índice del Centro de St. Laurent. El CWQI se basa en una variedad de objetivos en función del uso del agua designada: potable, recreación, riego, agua para el ganado, la fauna, y la vida acuática (Khan *et al.*, 2003).

Este índice, toma variables elegidas por el analista y de manera simple entrega una valoración de la calidad del agua en un rango de 0 a 100 mediante tres pasos, como se explicará en el capítulo 3.

### **2.3 Calidad del Sedimento**

El sedimento representa un componente sistémico donde se acumulan diversos nutrientes y metales pesados, reflejando la abundancia y distribución existente en la columna de agua.

Al existir escasez de estándares de medición, a menudo se compara con los límites establecidos para medir la calidad del agua, sin embargo, se incurre en un error al no considerar la baja solubilidad de algunos compuestos químicos que tienden a acumularse en el lecho del río (Allieri y Macías, 2007).

Brady (2015) señala que las fuentes de metales pesados en el medio ambiente pueden ser litogénicas o antropogénicas, es decir, de origen natural o producto de la actividad humana, respectivamente.

En un entorno urbano, las principales fuentes de contaminación antropogénica son los vertidos industriales y la contaminación de vehículos. Mientras que las fuentes litogénicas incluyen la erosión geológica por la exposición al agua, actividad volcánica y la descomposición de los restos de plantas y animales. A su vez, la deposición atmosférica es otro importante mecanismo de enriquecimiento con metales pesados (Brady, 2015).

En la zona de Cajamarca, la actividad minera es una de las más importantes. Se utiliza el método de cielo abierto y lixiviación, compuesto de agua con cianuro que es altamente tóxico para el ser humano, además del aluminio, cobre, hierro y manganeso que son arrastrados por la lluvia y los deslizamientos de tierra a causa de la explotación de la mina, lo que genera negativos impactos en la producción agropecuaria y la población (Castillo, 2003).

## **2.4 Índices de Calidad de Sedimento**

Los metales pesados en los ríos pueden presentarse en forma de partículas o disueltos y la mayoría de ellos tiende a acumularse en los sedimentos, que conservan importante información medioambiental y son reconocidos como transportistas y posibles fuentes de contaminación acuática (Hejabi *et al.*, 2011).

Los índices de calidad de sedimento más utilizados son el índice de geoacumulación ( $I_{GEO}$ ), el factor de enriquecimiento (FE) y el factor de contaminación (Cf).

El índice de geoacumulación permite la estimación de la contaminación mediante la comparación de las concentraciones de metales preindustriales y recientes en los suelos. Se propuso originalmente por Müller (1969) para los sedimentos y luego modificado por Loska *et al.* (2004) para la estimación de la contaminación del suelo. Ha sido ampliamente aplicado a varios estudios de metales traza en Europa (Salmanighabeshi *et al.*, 2015)

El factor de enriquecimiento se basa en la estandarización de la concentración de un elemento probado contra un elemento de referencia que suele ser hierro, escandio, titanio, aluminio, calcio o manganeso.

Por último, el factor de contaminación es la proporción de la concentración medida del elemento sobre el valor del fondo geoquímico. Este índice a la vez, deriva en el grado de contaminación ( $C_{DEG}$ ) que corresponde a la suma de los factores individuales y en el índice integrado de contaminación (IPI) que es la media de los factores calculados.

Los índices anteriormente mencionados, son los escogidos para realizar el análisis de la calidad de sedimento en la cuenca del río Llaucano.

## Capítulo 3: Materiales y Métodos

---

### 3.1 Área de estudio

La cuenca hidrográfica del río Llaucano se encuentra ubicada en la provincia de Hualgayoc, departamento de Cajamarca, al noroeste de Perú, y está definida geográficamente entre los paralelos 6°39'20" y 6°47'22" de latitud sur y los meridianos 78°30'45" y 78°41'06" de longitud oeste de Greenwich.

El río Llaucano tiene sus nacientes en las lagunas de Munyu y Picota, a 4000 m.s.n.m.<sup>1</sup>, y su primer tramo, conformado por una quebrada, recibe el nombre de Pachachaca Chico, para luego de un cierto recorrido cambiar a Pachachaca y luego a Tambillo. A partir de su confluencia con el río Chanta toma el nombre de Llaucano, el cual conserva hasta su desembocadura en el río Marañón.

De todas las sub-cuencas, las más desarrolladas económicamente son las del Río Llaucano, del Río Tingo-Maigasbamba y del Río Arascorgue, habiéndose concentrado en la parte alta de las dos últimas un número significativo de plantas concentradoras y de centros de explotación minera. Esta es la razón por la que el estudio se centra en estas tres subcuencas.

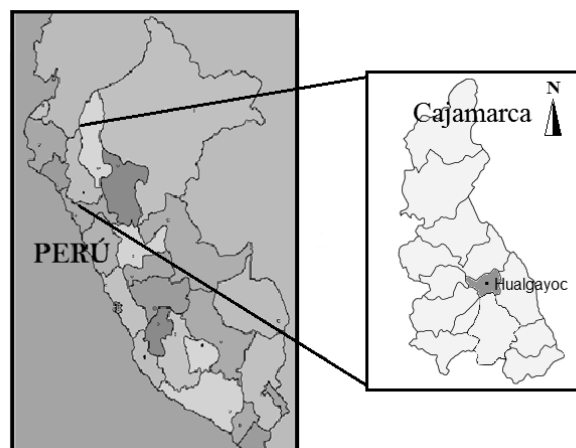


Figura 1: Ubicación de la Provincia de Hualgayoc en Perú.

---

<sup>1</sup> Metros sobre el nivel del mar.

## **3.2 Caracterización de la cuenca hidrográfica del río Llaucano**

### **3.2.1 Características físicas**

La Cuenca del río Llaucano, discurre de Sur a Norte, nace en las alturas de la Provincia de Cajamarca, y atraviesa las provincias de Cajamarca, Hualgayoc, Chota, Cutervo y, en menor proporción, Celendín, desemboca en el Marañón.

El caudal registrado en la estación de aforo Puente Corellama (distrito de Bambamarca), registra un promedio de 8.48 m<sup>3</sup>/seg anual.

En relación al clima, la Región de Cajamarca presenta una gran diversidad de climas y microclimas. Frío en las cordilleras, templado en las cimas y laderas montañosas, cálido en las laderas bajas y fondos de valle, con temperaturas, que van desde 0°C (Hualgayoc), hasta 36°C (Jaén).

La ciudad de Cajamarca, capital de la región, tiene un clima semi-seco y templado, su temperatura anual máxima es de 22°C y mínima de 5°C.

El clima y la temperatura está influenciado por la topografía, en la región Cajamarca se denotan 3 zonas agroecológicas: Jalca (más de 3500 m.s.n.m.), ladera (3000 a 3500 m.s.n.m.) y Valle (500 a 3000 m.s.n.m.). Esto origina cuatro pisos ecológicos, Jalca, Quechua, Yunga y Ceja de Selva, predominando el piso ecológico quechua, que es el más poblado, con una población que se dedica principalmente a la agricultura (maíz, trigo, cebada, papa, y frutales) y a la ganadería.

### **3.2.2 Geología**

El departamento de Cajamarca se encuentra mayormente cubierta por rocas sedimentarias del cretáceo, del paleógeno-neógeno y sedimentos del cuaternario, en menor proporción rocas del paleozoico (ordovícico, carbonífero, pérmico), triásico-jurásico, así como también rocas del precámbrico. Las características geológicas que presenta el departamento de Cajamarca, se encuentran relacionadas a su origen, a su tectónica y a su cronología, siendo el Complejo

Marañón el más antiguo y corresponde al Precámbrico. El territorio Cajamarquino, presenta muchas características litoestratigráficas, donde el Grupo Goyllarisquizga del Cretáceo Inferior es el más notorio, presenta areniscas, calizas y lutitas de las formaciones Chimú, Santa, Carhuaz y Farrat y presentan fracturas (Vásquez, 2015; Canchaya, 1990; MINEM, 2015). Las formaciones Inca, Chúlec, Pariatambo y Yumagual, Pulluicana, Quilquiñán, y Cajamarca (Cretácico inferior - superior) están conformadas por principalmente calizas y lutitas y los depósitos volcánicos paleógenos y neógenos se encuentran constituidos generalmente por flujos piroclásticos y de lava, que corresponden al Grupo Calipuy y al Volcánico Huambos. También presenta depósitos cuaternarios de origen fluvio-glaciar, glaciar, lagunar, eólico, fluvial, coluvial y aluvial. Los de origen aluvial y fluvial se presentan inconsolidados y están conformados por gravas mientras que los depósitos fluvio glaciar, coluvial, lacustre y eólico se encuentran ligeramente consolidados (Vásquez, 2015)

El Distrito de Hualgayoc por su parte, se caracteriza por el predominio de sedimentos calcáreos. Se compone de areniscas con proporciones menores de lutitas y está cubierta por una espesa secuencia calcárea, que se considera, por razones estratigráficas y paleontológicas, en un rango de edad del menor Albiano al Turoniano. Esta secuencia sedimentaria se dobló durante la orogénesis terciaria en una serie de anticlinales y sinclinales. El plegado de la zona fue acompañado por fallas y fracturas (Canchaya, 1990; Borredon et al., 1983)

En cuenca del río Llaucano ocurren rocas sedimentarias, volcánicas e intrusivas, cuyas edades están comprendidas entre el cretáceo y el cuaternario reciente (MINEM, 2015). Las rocas volcánicas son de edad terciaria, definiéndose como uno de los últimos eventos de magmatismo, se compone por lavas y tufos dacíticos, andesitas, aglomerados y brechas, en partes interestratificada con sedimentos arcillosos, de areniscas con contenidos de carbón.

En la figura 2, se presenta el mapa del distrito de Hualgayoc y su composición geológica (Borredon et al., 1983).

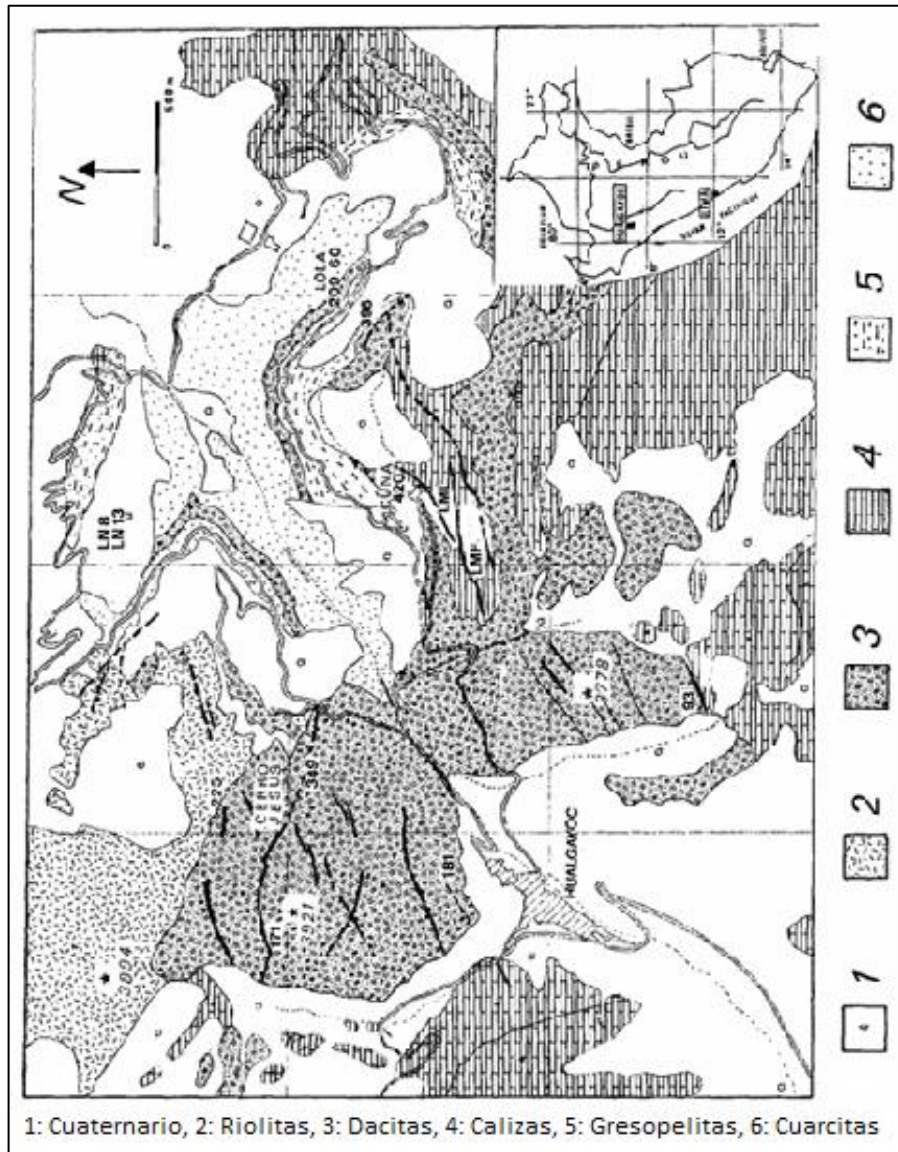


Figura 2: Mapa geológico del distrito minero de Hualgayoc

### **3.2.3 Principales actividades económicas**

Los habitantes de la ciudad de Hualgayoc están dedicados principalmente a la actividad minero-metalúrgica, por estar ubicados dentro del Distrito Minero del mismo nombre, zona de gran riqueza mineral donde se han asentado un considerable número de compañías y minería artesanal dedicadas a la explotación de mineral.

El Distrito Minero de Hualgayoc está considerado como un típico distrito metálico de plomo (Pb), zinc (Zn), plata (Ag) y cobre (Cu). Fue descubierto por los españoles en 1771 y ha sido históricamente uno de los más importantes distritos mineros de plata del Perú, habiendo producido un estimado de 1500 toneladas métricas de este metal.

La zona mineralizada de Hualgayoc, presenta dos tipos de mineralización, la que corresponde a la quebrada Hualgayoc (río Arascorgue), que es polimetálica con especial presencia de sulfuros de plomo y zinc, y la correspondiente al río Tingo-Maigasbamba que es cuprífera<sup>2</sup> y argentífera<sup>3</sup>.

En menor grado, la población de Hualgayoc, se dedica a la agricultura y a la elaboración de quesos y jamones.

### **3.2.4 Potenciales factores que Influyen en la calidad del agua en la cuenca del Río Llaucano**

Los factores que pueden influir en la calidad del agua en la cuenca del río Llaucano son principalmente las actividades mineras en operación y aquellas que han sido abandonadas, las también llamadas “pasivos ambientales” (Herrera, 2013).

Una de las más importantes en operación es la compañía minera San Nicolás S.A., que se encuentra en la Quebrada de Sinchao y cuyas instalaciones tienen la capacidad de procesar 200 tm/día<sup>4</sup> de mineral de plomo, cobre, zinc y plata.

---

<sup>2</sup> Se aplica al lugar donde hay cobre.

<sup>3</sup> Que contiene plata

<sup>4</sup> Tonelada métrica por día

Opera desde el año 1972 y en 1980 se produjo la rotura de los diques de las canchas de relaves, causando la contaminación total de las aguas del río Tingo-Maigasbamba y del Sistema de Abastecimiento de Agua Potable de Bambamarca (Herrera, 2013). En consecuencia, la compañía minera procedió a construir diques de contención, aguas abajo de los depósitos de relaves, con el fin de prever cualquier accidente futuro. Sin embargo, aún es una gran amenaza para el ecosistema y un claro agente contaminante de las aguas de este gran río que desemboca en el Llaucano.

Otra gran operación minera, es la Sociedad Minera Carolina S.A., también conocida como Cerro Corona, instalada a pocos metros de la carretera que conecta Cajamarca y Chugur.

Tiene capacidad de 50 tm/día y se utiliza para recuperar concentrados de plata y producir bulk de cobre, plomo, zinc y plata.

Cerro Corona es la segunda operación más grande de Cajamarca, y a escala nacional se encuentra dentro de las cinco operaciones mineras más importantes del año 2010, concentrando en la producción de cobre el 3.5% del total nacional y en oro el 3.17%. Opera desde el año 1981, pero al cambiar de razón social, la nueva empresa abandonó el depósito antiguo, construyendo una segunda cancha de relaves (Herrera, 2013).

### **3.2.5 Toma de muestras de agua y sedimentos**

Personal de la Universidad de Piura, realizó un muestreo preliminar, entre el 27 y el 29 de abril del año 2000. Se recolectaron 20 muestras de agua en las subcuencas del Río Tingo-Maigasbamba y Arascorgue hasta sus confluencias con el Río Llaucano. Se escogieron estas subcuencas porque en ellas se encuentran concentradas las actividades mineras, tanto abandonadas como en operación actual, que a su vez causan y/o conviven con el pasivo ambiental existente.

El muestreo preliminar se realizó con la finalidad de realizar una evaluación previa que permitiría seleccionar las zonas críticas, cuyo estudio posterior llevaría a una

evaluación más profunda de la contaminación de las aguas de la cuenca del Río Llaucano.

En la segunda campaña de muestreo, se recolectaron un total de 45 muestras de aguas, correspondientes a las siguientes descripciones:

- Muestras de agua tomadas en las cabeceras de cuenca o aguas arriba de las fuentes potenciales de contaminación minera.
- Muestras de agua tomadas aguas abajo de las fuentes potenciales de contaminantes.
- Muestras tomadas aguas arriba y aguas abajo de la confluencia de corrientes contaminadas con cursos naturales como el río Tingo-Maigabamba, Arascorgue y Llaucano,
- Muestras tomadas en las fuentes de contaminación, que para el presente estudio lo constituyen las operaciones mineras en estado de abandono y en actividad.

Las muestras de sedimento fueron recolectadas con una pequeña pala y una espátula en zonas de baja velocidad, con el fin de tener muestras con arcilla fina, que es donde se concentran los metales.

Las muestras de agua fueron recolectadas en botellas plásticas de 1 litro, las que fueron debidamente rotuladas y selladas para su transporte desde la ciudad de Bambamarca hasta el Laboratorio de Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura, en la ciudad de Piura, desde el cual fueron enviadas al Laboratorio ACME Analytical Laboratories Ltd ubicado en la ciudad de Vancouver, Canadá.

Para el desarrollo del presente estudio, se han seleccionado un total de 34 muestras de agua y 30 muestras de sedimento.

Las muestras de agua y sedimento fueron debidamente rotuladas, selladas y preservadas con ácido nítrico para su envío a Canadá vía DHL Service.

Para las muestras in-situ, pH, temperatura y conductividad eléctrica, se utilizó el equipo multiparamétrico WTW F3, que se ve en la figura 3.



Figura 3: Equipo para toma de muestras in-situ

### 3.2.6 Puntos de muestreo

Como se explicó anteriormente, la zona de estudio de centra en las tres grandes subcuencas, río Llaucano, río Tingo-Maigasbamba y río Arascorgue. Los puntos de muestreo se distribuyen sobre dichos ríos como se observa a continuación.

En la tabla 1a del anexo, se entrega una descripción de los puntos de muestreo considerados para el análisis.

En el siguiente ítem, se presentan los diagramas que explican la ruta de la recolección de las muestras.

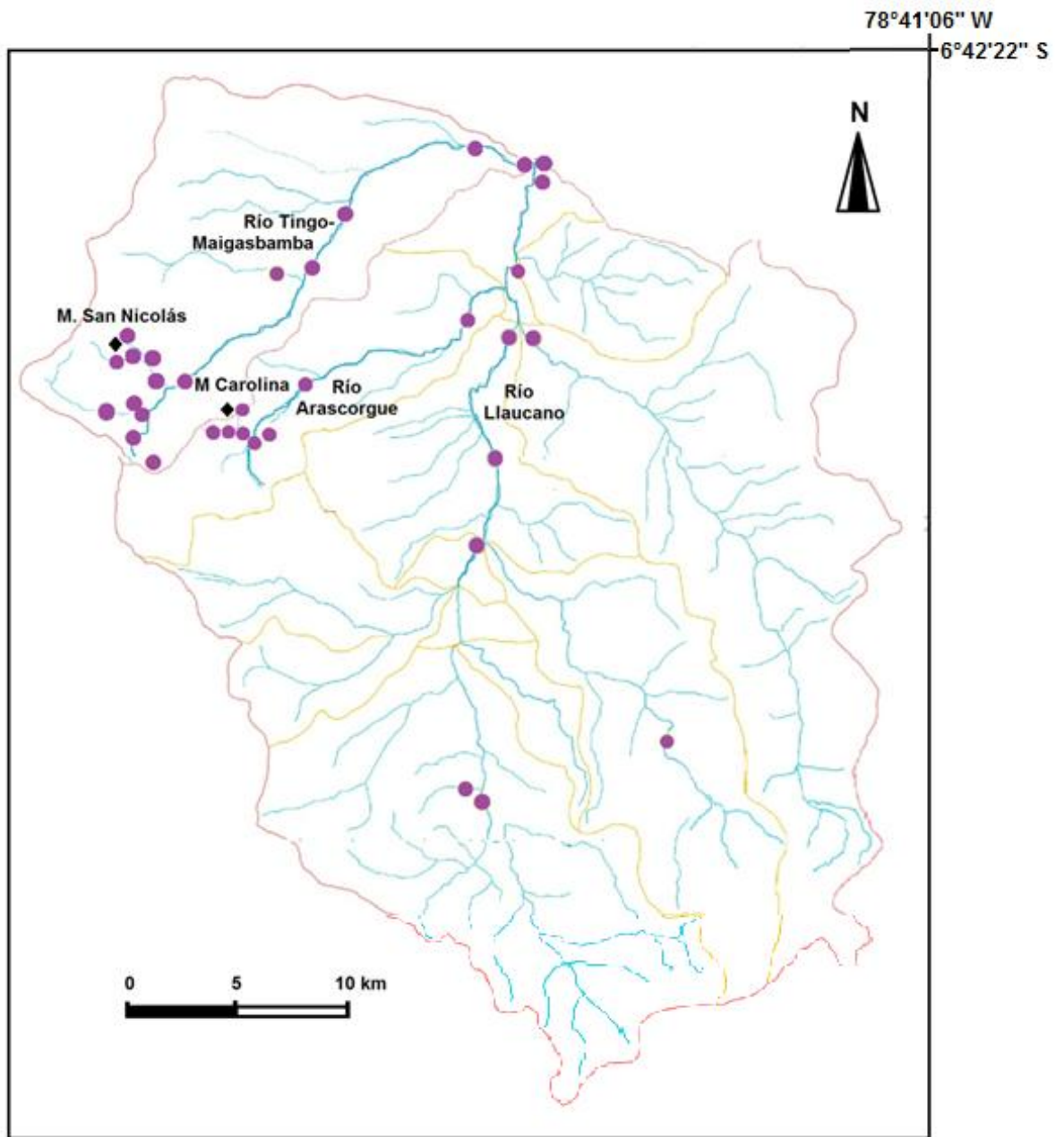


Figura 4: Ubicación de los puntos de muestreo

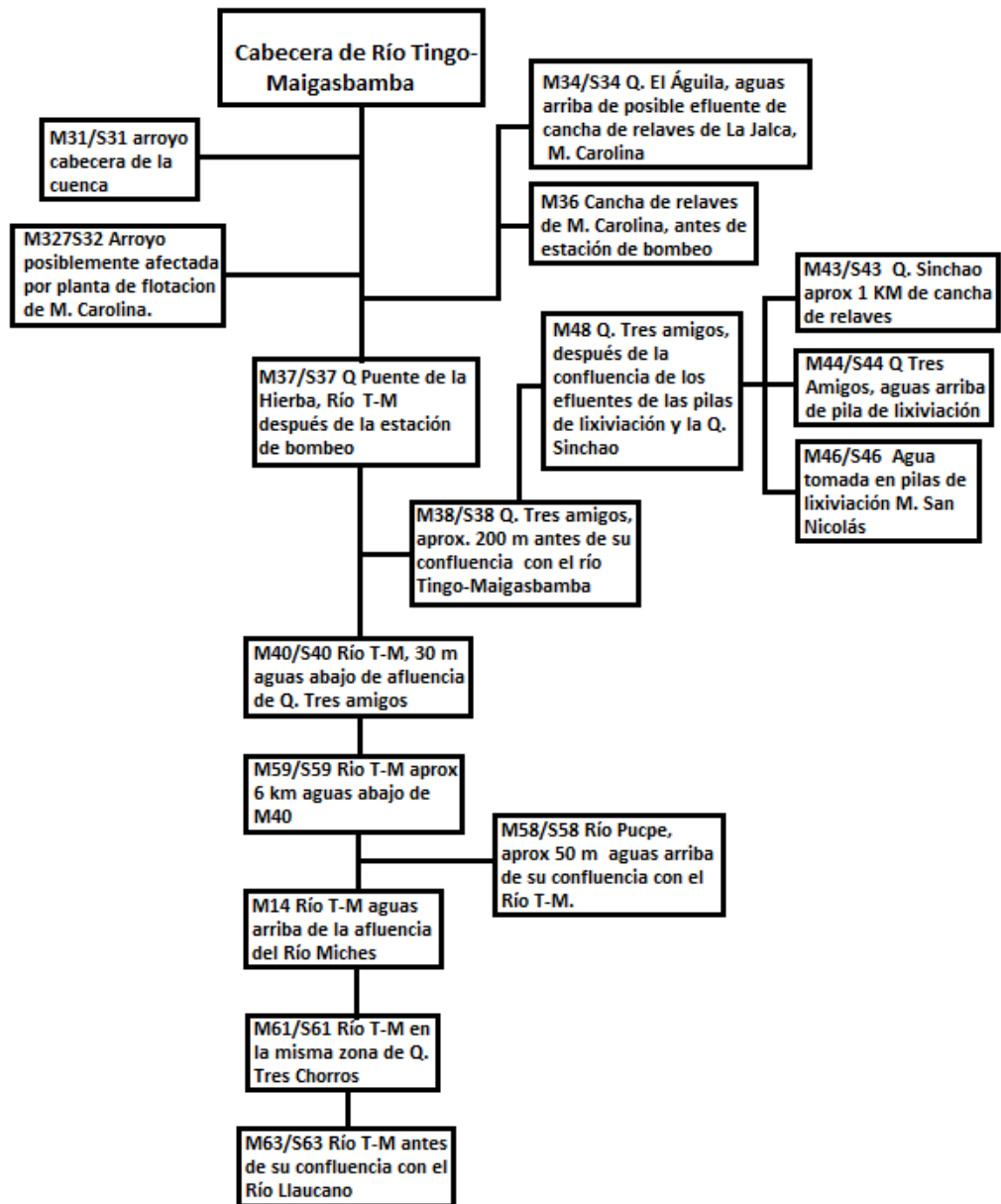


Figura 5: Puntos de muestreo subcuenca Río Tingo-Maigasbamba.

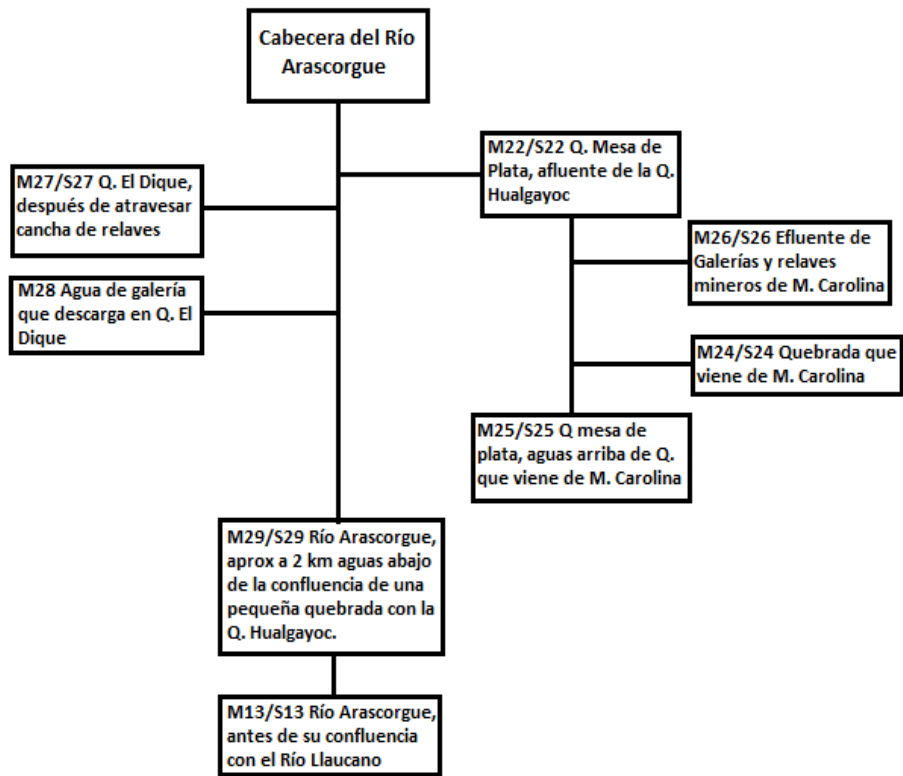


Figura 6: Puntos de muestreo subcuenca Río Arascorgue.

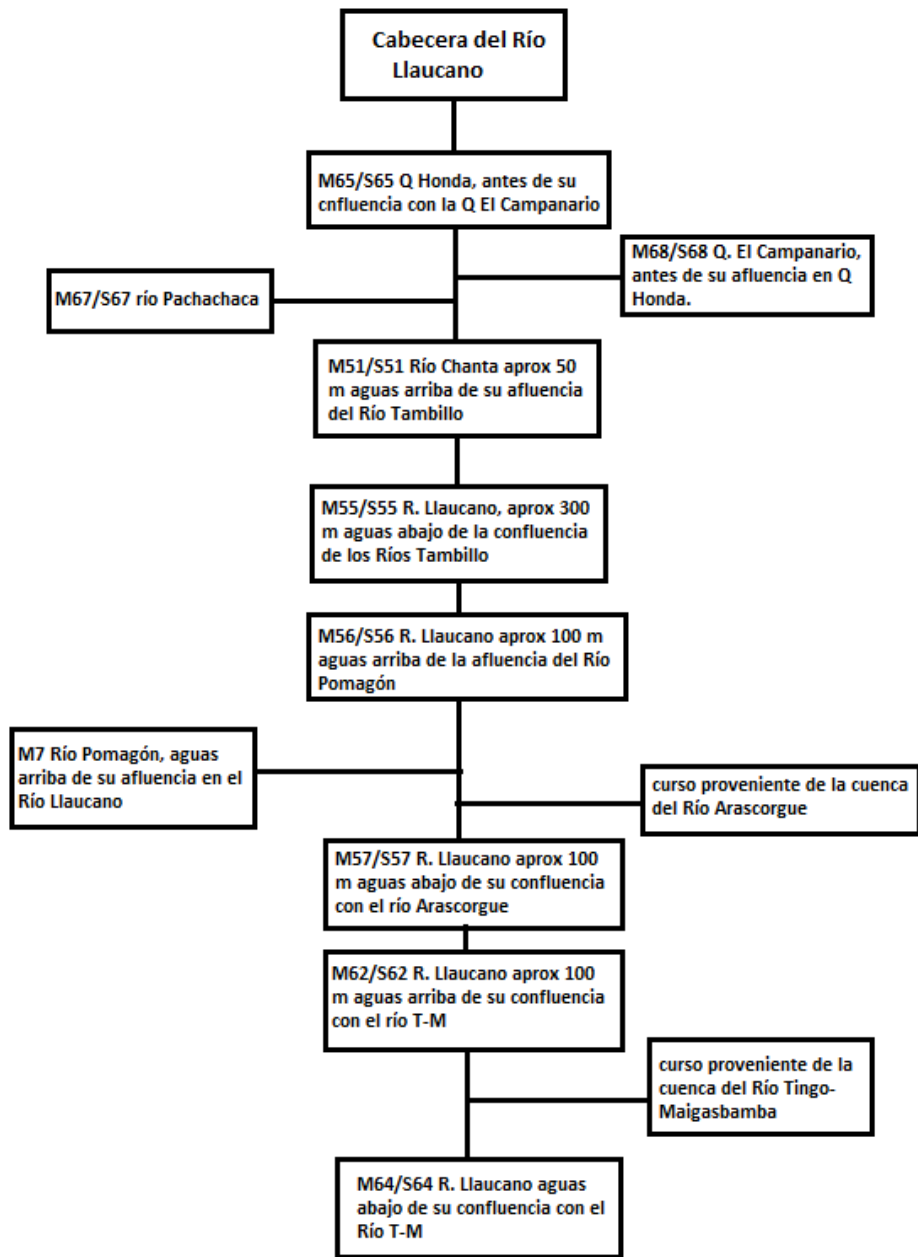


Figura 7: Puntos de muestreo en la subcuenca del río Llaucano

### 3.3 Índice de Calidad de Agua Canadiense (CWQI)

Es un indicador que entrega un estado de la calidad del agua de forma simple y con bajas dificultades técnicas. El CWQI ha adoptado el modelo conceptual de BCWQI (British Columbia Water Quality Index), basado en los subíndices relativos (Khan *et al.*, 2003).

Hay tres factores en el índice, cada uno de los cuales ha sido reducido entre 0 y 100. La longitud del vector es entonces escalar a oscilar entre 0 y 100, y se resta de 100 para producir un índice que es 0 o cerca de 0 para muy mala calidad del agua, y cerca de 100 para una excelente calidad del agua.

Para sustancias tóxicas, el objetivo es un límite superior máximo que no debe ser excedido. En cambio, para propiedades como oxígeno disuelto, el límite es un valor mínimo que debe estar presente en los puntos de muestreo.

La desventaja de usar este indicador, es lo generalizado de su declaración del estado de la calidad del agua, por lo que variaciones en la calidad muy localizadas no pueden ser inmediatamente evidentes.

En el país de origen de este indicador, se reconocen 6 usos del agua: bebida humana, recreación, irrigación, brebaje, vida acuática y vida silvestre.

El índice está fundamentado en 3 factores que involucran la medición de los logros de calidad: F1, F2 y F3 (Khan *et al.*, 2003).

F1: “Alcance”: Número de variables ( $n$ ) que no cumplen los objetivos en al menos una muestra durante el periodo objeto de examen, en relación con el número total de variables medidas ( $N$ ).

$$F1 = \frac{n}{N} * 100$$

F2: “Frecuencia”: Representa el número de veces que las mediciones individuales no cumplen los objetivos ( $m$ ), en relación con el número total de mediciones realizadas en el periodo de tiempo considerado ( $M$ ).

$$F2 = \frac{m}{M} * 100$$

F3: "Amplitud": Representa la cantidad por la que las mediciones no cumplen sus objetivos. Se calcula en tres pasos:

1°: Excursión: es la cantidad de veces por la cual los objetivos son mayor que la norma y se calcula en los siguientes pasos:

$$\text{Excursión} = \left( \frac{\text{Valor de la prueba fallida}}{\text{Objetivo}} \right) - 1$$

Para los casos en que el valor de objetivo es un mínimo, como el oxígeno disuelto, se expresa como:

$$\text{Excursión} = \left( \frac{\text{Objetivo}}{\text{Valor de la prueba fallida}} \right) - 1$$

2°: Luego se suman las excursiones de las pruebas individuales de sus objetivos y se divide por el número total de mediciones. Esto corresponde a la "suma normalizada de excursiones" (nse), y se calcula como:

$$nse = \frac{\sum_{i=1}^n \text{Excursiones}_i}{\#mediciones}$$

3°: Finalmente F3 se calcula utilizando el valor "nse", que corresponde a la suma normalizada de las excursiones, para obtener un rango entre 0 y 100.

$$F3 = \left( \frac{nse}{0,01nse + 0,01} \right)$$

Una vez que los factores se han obtenido, el índice en sí mismo puede ser calculado mediante la suma de tres factores, como si fueran vectores. Así, finalmente el CWQI se calcula mediante:

$$CWQI = 100 - \left( \frac{\sqrt{F1^2 + F2^2 + F3^2}}{1,732} \right)$$

Donde el factor 1,732 normaliza los valores resultantes a un rango entre 0 y 100.

El resultado de este índice es un número entre 0 y 100, de acuerdo con la siguiente escala:

- Excelente 95-100
- Buena 80-94,9
- Aceptable 65-79,9
- Marginal 45-64,9
- Pobre 0-44,9

La clasificación del indicador es la siguiente:

Excelente: Todos los usos tienen ausencia virtual de amenazas o deterioro. Las condiciones son muy cercanas a las naturales. La utilización de este tipo de agua puede ser continua.

Buena: Todos los usos presentan sólo un grado menor de tratamiento o deterioro. Las condiciones raramente se alejan de las naturales o niveles deseables. Los usos pueden ser de manera permanente.

Aceptable: Muchos de los usos presentan deterioro. Las condiciones algunas veces se alejan de las naturales o de los niveles deseables. Usos individuales o particulares pueden verse temporalmente interrumpidos.

Marginal: En el límite, muchos usos necesitan tratamiento. Las condiciones a menudo se alejan de las naturales o deseables. Más de un uso puede ser temporalmente interrumpido.

Pobre: Muchos de los usos requieren tratamiento o están amenazados y deben ser temporalmente interrumpidos. Las condiciones usualmente se alejan de lo natural o de los niveles deseables.

### **3.3.1 Parámetros utilizados en los índices de calidad de agua y sedimento**

Para la construcción del índice de calidad de agua, han sido seleccionados los elementos presentes en la lista prioritaria de contaminantes (Yan *et al.*, 2004) y también algunos de los llamados elementos mayoritarios, que a la vez sean una amenaza para la salud humana y el medio ambiente.

Dichas variables son: Aluminio (Al), Antimonio (Sb), Arsénico(As), Cadmio (Ca), Cromo(Cr), Cobre(Cu), Hierro (Fe), Mercurio(Hg), Manganeso(Mn), Níquel(Ni),

Plata (Ag), Plomo (Pb), Selenio (Se), Zinc(Zn), Conductividad Eléctrica (CE) y Potencial de Hidrógeno(pH).

### **3.3.1.1 Efectos sobre la salud humana y el medio ambiente**

Aluminio: Se ha sugerido que la exposición al aluminio es un factor de riesgo para el desarrollo o aparición temprana de la enfermedad de Alzheimer. El riesgo de contraer la enfermedad por consumo mayor a 100 µg/L, es bajo, según estudios. No obstante, sería útil adoptar medidas de control a la exposición para la población. El aluminio puede acumularse en plantas y causar problemas de salud a aquellos animales que las consumen. Los pájaros que consumen peces contaminados, ponen huevos con cáscara más fina y los pájaros nacen con bajo peso (OMS, 1993).

Antimonio: Respirar antimonio enlazado con hidrógeno en la fase gaseosa es lo que produce principalmente los efectos sobre la salud. La exposición a cantidades relativamente altas de antimonio (9 mg/m<sup>3</sup> de aire) durante un largo periodo puede provocar irritación de los ojos, piel y pulmones. Si la exposición continúa se pueden producir efectos más graves, tales como enfermedades pulmonares, problemas de corazón, diarrea, vómitos severos y úlceras estomacales. Las pruebas de laboratorio con conejillos de indias, han mostrado que niveles relativamente altos de antimonio pueden matar a pequeños animales. Las ratas pueden experimentar daños pulmonares, cardíacos, hepáticos y renales previos a la muerte. Los animales que respiran bajos niveles de antimonio durante un par de meses también pueden experimentar problemas de fertilidad (OMS, 1993).

Arsénico: Según estudios epidemiológicos, el consumo de altas cantidades de arsénico, está relacionado causalmente con el desarrollo de cáncer en varios órganos, particularmente en la piel, vejiga y pulmones. Es una de las pocas sustancias que producen cáncer en el ser humano por consumo de agua potable. Éste no puede ser degradado una vez que ha entrado en el ambiente, así que las cantidades que se han añadido pueden esparcirse y causar efectos en los humanos y animales en distintas locaciones de la tierra. Es un componente

extremadamente difícil de convertir en productos solubles en agua o volátil. Debido a las actividades humanas, como la minería y fundiciones, el arsénico se ha movilizó y puede ahora ser encontrado en muchos lugares donde éstos no existían de forma natural (OMS, 1993).

**Cadmio:** El cadmio primero es transportado hacia el hígado por la sangre. Allí es unido a proteínas para formar complejos que son transportados hacia los riñones. Se acumula en los riñones, donde causa un daño en el mecanismo de filtración. Esto causa la excreción de proteínas esenciales y azúcares del cuerpo y el consecuente daño de los riñones. Esto puede incluso causar la muerte. Puede ser encontrado mayoritariamente en la corteza terrestre. Este siempre ocurre en combinación con el zinc. El cadmio también consiste en las industrias como inevitable subproducto del zinc, plomo y extracciones de cobre. Después de ser aplicado este entra en el ambiente mayormente a través del suelo, porque es encontrado en estiércoles y pesticidas. La toma por los humanos de cadmio tiene lugar mayormente a través de la comida. Los alimentos que son ricos en cadmio pueden en gran medida incrementar la concentración de cadmio en los humanos. Ejemplos son patés, champiñones, mariscos, mejillones, cacao y algas secas (OMS, 1993).

**Cromo:** El Departamento de Salud y Servicios Humanos (DHHS) de Estados Unidos, la Agencia Internacional para la Investigación del cáncer (IARC) y la EPA, han determinado que los compuestos de cromo son carcinogénicos en seres humanos. También se ha observado un aumento de tumores estomacales en seres humanos y animales expuestos a cromo en el agua potable. El efecto principal que se observa en animales que ingieren compuestos de cromo son la irritación y úlceras en el estómago y el intestino delgado y anemia. Generalmente no permanece en la atmósfera y se deposita en el suelo y agua. A diferencia de otros elementos, no se acumula mucho en el cuerpo de los peces (OMS, 1993).

**Cobre:** Es esencial para mantener la buena salud, sin embargo, la exposición a dosis altas puede ser perjudicial. Los datos sobre los efectos gastrointestinales del

cobre pueden emplearse con precaución, ya que la concentración de este metal ingerido, influye más en los efectos observados que la masa total o dosis ingerida durante 24 horas. Cuando el cobre se libera al suelo, puede adherirse fuertemente a la materia orgánica y a otros componentes como arcilla y arena en las capas superficiales del suelo y puede que no se movilice muy lejos cuando es liberado. En su forma elemental, el cobre no se degrada en el ambiente. Mejillones y ostras son organismos que contienen altas concentraciones del metal en su organismo ya que filtran sus alimentos. Sólo ciertas plantas pueden vivir debido a los efectos que provoca en ellas el cobre, que también afecta a microorganismos presentes en el suelo y a las lombrices de tierra (OMS, 1993)

Hierro: Es un elemento esencial en la nutrición humana. Las necesidades diarias de éste varían según la edad, sexo, estado físico y biodisponibilidad en la persona, oscilando entre los 10 y 50 mg/día. Al contacto con los tejidos oculares, puede provocar conjuntivitis, coriorretinitis y retinitis. El hierro se asocia al oxígeno con facilidad, lo que puede resultar en que en medio acuoso produzca su carencia y como resultado la asfixia de peces, plantas y organismos que tanto lo requieren. Es recomendable no permitir que el producto entre en el medio ambiente ya que persiste en éste (OMS, 1993).

Manganeso: Elemento esencial para el ser humano y otros animales que está presente de forma natural en muchos alimentos. Tanto la carencia como la sobreexposición pueden causar efectos nocivos adversos. Hay estudios epidemiológicos que han notificado efectos neurológicos adversos tras la exposición prolongada a concentraciones muy altas en el agua de consumo. El bajo consumo de manganeso en animales, afecta el crecimiento normal, la formación de huesos y la reproducción de éstos. Para algunos animales, la dosis letal es bastante baja. El manganeso puede causar lesiones en los pulmones e hígado, disminución de la presión sanguínea, alteraciones en el desarrollo de feos de animales y daños cerebrales. En plantas, afecta el mecanismo de ellas, al absorber los iones del manganeso desde el suelo hasta las hojas (OMS, 1993).

Mercurio: Tras exposiciones breves o prolongadas, los efectos tóxicos de los compuestos inorgánicos se observan principalmente en los riñones, tanto en personas como en animales de laboratorio. En el ser humano, la toxicidad aguda por vía oral produce principalmente colitis y gastritis hemorrágicas, aunque las lesiones son fundamentalmente renales. Una vez que llega al agua desde el aire, las bacterias lo transforman en metilmercurio, se biomagnifica en la cadena alimentaria acuática, es decir, poseen mayores niveles de mercurio aquellas especies depredadoras grandes como focas y ballenas dentadas. Los datos existentes indican que el mercurio está presente en todo el mundo, principalmente en peces, en concentraciones perjudiciales para los seres humanos y la flora y fauna silvestre (OMS, 1993).

Níquel: El efecto adverso más común de la exposición al níquel en seres humanos es una reacción alérgica. Aproximadamente entre un 10% y un 15% de la población es sensible al níquel, pueden sensibilizarse al contacto con joyas u otros artículos que lo contengan. La reacción más común es un sarpullido en el área de contacto. Algunas personas sensibilizadas reaccionan cuando ingieren níquel en los alimentos, agua o aire. El níquel en pequeñas cantidades es un elemento esencial y hasta favorable pero puede ser peligroso cuando se excede la máxima canida tolerable. Altas concentraciones de níquel en suelos arenosos puede claramente dañar a las plantas y altas concentraciones en aguas superficiales puede disminuir el rango de crecimiento de las algas. Microorganismos pueden también sufrir una disminución del crecimiento debido a la presencia del níquel pero ellos usualmente desarrollan resistencia (OMS, 1993).

Plata: En general, la acumulación de plata por las plantas terrestres de los suelos es baja, incluso si el suelo se modifica con los lodos de depuradora que contiene plata o las plantas se cultivan en los relaves de las minas de plata, donde la plata se acumula principalmente en los sistemas de raíces. En suelos enmendados con sulfuro de plata y los lodos de depuradora, las especies vegetales más sensibles fueron afectadas adversamente a los 14 mg de plata por kilogramo de suelo de

peso seco. La sobre-exposición crónica a un componente o varios componentes de la plata se supone que tiene los siguientes efectos en los humanos: anormalidades cardíacas, daños cerebrales y del sistema nervioso permanentes, daños renales, oculares, hepáticos, anemia, daños cerebrales (OMS, 1993).

Plomo: Altos niveles de plomo almacenado en los tejidos del cuerpo puede ser letal. Los síntomas de envenenamiento por plomo incluyen problemas de comportamiento, enfermedades del corazón, presión arterial alta, anemia y daño al corazón y al cerebro. El plomo también desplaza al calcio en el cuerpo. El plomo se acumula en los cuerpos de los organismos acuáticos y organismos del suelo. Estos experimentarán efectos en su salud por envenenamiento. Los efectos sobre la salud de los crustáceos pueden tener lugar incluso cuando sólo hay pequeñas concentraciones de plomo presente. Las funciones en el fitoplancton pueden ser perturbadas cuando interfiere con el plomo. El fitoplancton es una fuente importante de producción de oxígeno en mares y muchos grandes animales marinos lo comen (OMS, 1993).

Selenio: El comportamiento del selenio en el medio ambiente depende fuertemente de sus interacciones con otros componentes y de las condiciones medio ambientales en el lugar en concreto y a una hora concreta. Existe evidencia de que el selenio puede acumularse en los tejidos corporales de los organismos y puede ser transportada en la cadena alimenticia hacia niveles superiores. Normalmente esta biomagnificación de selenio comienza cuando los animales ingieren muchas plantas que han estado absorbiendo enormes cantidades de selenio, antes de la ingestión. Debido a la irrigación, las concentraciones de selenio en la escorrentía tienden a ser muy altas en organismos acuáticos en muchas zonas. Cuando los animales absorben o acumulan concentraciones de selenio extremadamente grandes, puede causar fallo reproductivo y defectos de nacimiento (OMS, 1993).

Zinc: Es un elemento esencial en la dieta, pero demasiado zinc también es perjudicial. Los efectos nocivos se empiezan a manifestar a niveles de 10 a 15

veces más altos que la dosis diaria recomendada. En grandes cantidades puede causar calambres estomacales, náusea y vómitos. A largo plazo, puede producir anemia y disminución de los niveles de colesterol beneficioso. Puede incrementar la acidez de las aguas. Algunos peces pueden acumular zinc en sus cuerpos cuando viven en aguas contaminadas y se biomagnifica en la cadena alimentaria. También puede ser una amenaza para las plantas, que a menudo absorben cantidades de zinc que su sistema no puede manejar, debido a la acumulación de éste en el suelo. Finalmente puede interrumpir la actividad biológica de los suelos, influenciando negativamente las actividades de microorganismos y lombrices (OMS, 1993).

pH: El pH es una indicación para la acidez de una sustancia. Se determina por el número de iones de hidrógeno libres ( $H^+$ ). La acidez es una de las propiedades más importantes del agua. El agua es un disolvente para casi todos los iones. El pH sirve como un indicador que compara algunos de los iones más solubles en agua. El resultado de una medición de pH se determina por una consideración entre el número de iones  $H^+$  y el número de iones de hidróxido ( $OH^-$ ). Cuando el número de iones  $H^+$  es igual al número de iones  $OH^-$ , el agua es neutral. Serán que tienen un pH de aproximadamente 7. La OMS no ha propuesto ningún valor de referencia basado en los efectos del pH sobre la salud (OMS, 1993).

### **3.3.1.2 Límites de los parámetros establecidos según la norma peruana**

A continuación, en la tabla 1, se presentan los límites de concentración para cada elemento en conformidad con la norma establecida por el Ministerio del Ambiente de Perú en Octubre de 2015, donde los valores presentados corresponden al rango A1, es decir, aguas que pueden ser potabilizadas solo con desinfección.

Tabla 1: Límites máximos de parámetros en el agua dulce en Perú

Parámetro	Expresado como	Unidad de medida	Límite máximo permisible
Aluminio	Al	mg/L	0,2
Antimonio	Sb	mg/L	0,02
Arsénico	As	mg/L	0,01
Cadmio	Cd	mg/L	0,003
Cobre	Cu	mg/L	2
Cromo	Cr	mg/L	0,05
Hierro	Fe	mg/L	0,3
Mercurio	Hg	mg/L	0,001
Manganeso	Mn	mg/L	0,4
Níquel	Ni	mg/L	0,02
Plata	Ag	mg/L	0,01
Plomo	Pb	mg/L	0,01
Selenio	Se	mg/L	0,01
Zinc	Zn	mg/L	3
Conductividad eléctrica	CE	µmhos/cm	1500
Potencial de hidrógeno	pH	-	6,5-8,5

Fuente: Digesa, 2011.

Éstos serán utilizados en la construcción del índice de calidad de aguas, CWQI, para ser contrastadas con los límites más restrictivos.

### 3.3.1.3 Límites de los parámetros establecidos según las normas más restrictivas

Los siguientes límites, presentes en la tabla 2, fueron recopilados con el fin de establecer una comparación del índice de calidad de agua calculado con los límites de la norma peruana con uno calculado usando el límite de concentración de un país vecino a Perú, Chile (Conama), y algunos de orden global como la Organización Mundial de la Salud (OMS). Los valores correspondientes a la Conama son aquellos pertenecientes a la clase de excepción.

Tabla 2: Límites máximos restrictivos para el agua dulce en Chile y el mundo

Parámetro	Expresado como	Unidad de medida	Límite máximo permisible	Fuente
Aluminio	Al	mg/L	0,07	Conama, 2015
Antimonio	Sb	mg/L	0,02	OMS, 2011
Arsénico	As	mg/L	0,01	OMS, 2011
Cadmio	Cd	mg/L	0,003	OMS, 2011
Cobre	Cu	mg/L	0,0072	Conama, 2015
Cromo	Cr	mg/L	0,032	Conama, 2015
Hierro	Fe	mg/L	0,8	Conama, 2015
Mercurio	Hg	mg/L	0,00004	Conama, 2015
Manganeso	Mn	mg/L	0,04	Conama, 2015
Níquel	Ni	mg/L	0,042	Conama, 2015
Plata	Ag	mg/L	0,038	Howe, 2002 (OMS)
Plomo	Pb	mg/L	0,002	Conama, 2015
Selenio	Se	mg/L	0,004	Conama, 2015
Zinc	Zn	mg/L	0,096	Conama, 2015
Conductividad Eléctrica	CE	µmhos/cm	600	Conama, 2015
Potencial de hidrógeno	pH	-	6,5-8,5	Conama, 2015

### 3.4 Factor de enriquecimiento (FE)

El Factor de Enriquecimiento (FE), es un indicador de la calidad del sedimento que facilita la observación del comportamiento de la acumulación de metales en el lecho de un río.

Su cálculo se logra mediante una división de las proporciones de elemento metálico sobre un elemento base (a elegir), y la proporción del mismo elemento con la misma base, pero utilizando los valores de las concentraciones naturales, es decir, de zonas no contaminadas del río.

Se puede obtener tres tipos de resultados, el primero, el empobrecimiento de elementos metálicos, es decir, cuando el FE es menor a 1.

El segundo resultado posible es el enriquecimiento con elementos metálicos, cuando el FE es mayor a 1. Por defecto, cuando el índice es igual a 1, significa

que no ha habido variación en el comportamiento del lecho del río debido a fuentes externas de contaminación.

Para este estudio, las concentraciones de metales en el sedimento se normalizaron a la concentración del aluminio (Al), ya que éste es un elemento conservador y constituyente de la fracción fina de los sedimentos, que incluye las partículas más enriquecidas de metales (Resongles, 2013; López *et al.*, 2004)

La fórmula de cálculo del FE es la siguiente:

$$FE = \frac{\left(\frac{Me}{Al}\right)_{muestra}}{\left(\frac{Me}{Al}\right)_{referencia}}$$

Donde  $(Me/Al)_{muestra}$ , es el coeficiente de concentración de un metal con respecto al aluminio en una muestra de sedimento y  $(Me/Al)_{referencia}$ , es la misma proporción en los valores de referencia.

Para detectar una posible fuente de contaminación antropogénica, el valor de referencia debe ser representativo del fondo geoquímico local.

Los valores del factor de enriquecimiento se agrupan en cinco categorías (Salmanighabeshi *et al.*, 2015):

- |                                       |                   |
|---------------------------------------|-------------------|
| • Enriquecimiento deficiente          | $FE < 2$          |
| • Enriquecimiento moderado            | $2 \leq FE < 5$   |
| • Enriquecimiento significativo       | $5 \leq FE < 20$  |
| • Enriquecimiento muy alto            | $20 \leq FE < 40$ |
| • Enriquecimiento extremadamente alto | $FE \geq 40$      |

### 3.5 Índice de geoacumulación ( $I_{GEO}$ )

El índice de geoacumulación ( $I_{GEO}$ ) permite la estimación de la contaminación comparando concentraciones preindustriales y recientes en los suelos (Salmanighabeshi *et al.*, 2015). Se propuso en 1980 para sedimentos y luego en 2004 fue modificado para estimar la contaminación de suelos. También ha sido

ampliamente aplicado a varios metales traza en Europa. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$I_{GEO} = \log_2 \left( \frac{C_n}{1,5 * B_n} \right)$$

Donde  $C_n$  es la concentración medida del elemento  $n$  en la muestra de sedimento y  $B_n$  es el valor de fondo geoquímico del elemento  $n$  en el lecho del río.

El valor de la constante 1,5 incluye la consideración de la fluctuación natural de una determinada sustancia. Los valores del índice de contaminación se dividen en 7 grupos de la siguiente manera:

- |  |                      |
|--|----------------------|
| • Prácticamente sin contaminar               | $I_{geo} \leq 0$     |
| • No contaminado a moderadamente contaminado | $0 < I_{geo} \leq 1$ |
| • Moderadamente contaminado                  | $1 < I_{geo} \leq 2$ |
| • Moderada a fuertemente contaminado         | $2 < I_{geo} \leq 3$ |
| • Muy contaminado                            | $3 < I_{geo} \leq 4$ |
| • Muy a extremadamente contaminado           | $4 < I_{geo} \leq 5$ |
| • Extremadamente contaminado                 | $I_{geo} > 5$        |

### 3.6 Factor, grado e índice integrado de contaminación

El factor de contaminación ( $C_f$ ), el grado de contaminación ( $C_{DEG}$ ) y el índice integrado de contaminación (IPI), son índices relacionados entre sí (Salmanighabeshi *et al.*, 2015).

El factor de contaminación fue propuesto como la relación entre la concentración de contaminantes seleccionados (Sb, Hg, Cd, Cr, As, Cu, Zn y Pb) en muestras de sedimentos y valores de concentraciones de referencia preindustrial. Su fórmula de cálculo se presenta en la siguiente ecuación.

$$C_f = \frac{C_{n_{muestra}}}{C_{n_{referencia}}}$$

El  $C_f$  se divide en cuatro categorías:

- Contaminación baja  $C_f < 1$
- Contaminación moderada  $1 \leq C_f < 3$
- Contaminación considerable  $3 \leq C_f < 6$
- Contaminación muy alta  $C_f \geq 6$

El grado de contaminación  $C_{DEG}$  es definido como la suma de los factores de contaminación individuales:

$$C_{DEG} = \sum C_f$$

Es dividido en cuatro grupos como el factor de contaminación:

- Contaminación baja  $C_{deg} < 8$
- Contaminación moderada  $8 \leq C_{deg} < 16$
- Contaminación considerable  $16 \leq C_{deg} < 32$
- Contaminación muy alta  $C_{deg} \geq 32$

El índice integrado de contaminación (IPI) se define como la media de los factores de contaminación ( $C_f$ ) calculados para cada muestra. Los valores del índice integrado se dividen en cuatro categorías:

- Nivel de contaminación bajo  $IPI \leq 1$
- Nivel de contaminación moderado  $1 < IPI \leq 2$
- Nivel de contaminación alto  $2 < IPI \leq 5$
- Nivel de contaminación muy alto  $IPI > 5$

### 3.7 Valores de fondo (Background values)

Para la geoquímica, el reconocimiento de la contaminación es de gran interés. Es de suma importancia identificar datos atípicos ya que son indicadores de raros procesos geoquímicos (Reimann *et al.*, 2005).

Los valores atípicos se definen estadísticamente como aquellos que pertenecen a una población diferente porque proceden de otro proceso o fuente, es decir, que se derivan de una distribución contaminante (Reimann *et al.*, 2005).

Como propone Tume *et al.* (2014), se utilizaron dos métodos para el cálculo de los valores de fondo, el método iterativo media + 2SD y el de la mediana + 2MAD. También se calculará el upper whisker, con el fin de elegir posteriormente uno de estos valores para caracterizar el fondo geoquímico. Por último, se calculó el método de la función de distribución calculada, descrito por Matschullat, Ottenstein y Reimann (2000).

### **3.7.1 Método iterativo media + 2SD**

Según Matschullat *et al.* (1999), existe una técnica que tiene por objeto definir el fondo geoquímico acudiendo a un rango normal, el llamado método iterativo media + 2SD.

El cálculo de la media + 2SD es un método para establecer los niveles de referencia o background values. Se calcula la media, la desviación estándar (SD) y se establece el nivel de referencia utilizando la fórmula:

$$\text{Media} + 2 * \text{SD}$$

La media y la desviación estándar se calculan para el conjunto de datos original. Todos los valores más allá del intervalo media  $\pm$  2SD se omiten. Este procedimiento se repite hasta que todos los valores restantes se encuentran dentro de este rango.

Los valores calculados desde la sub-muestra resultante se considera que reflejan el fondo geoquímico. Esta técnica construye una distribución normal aproximada en torno al valor medio de los datos originales.

Se han realizado numerosos experimentos en distintas áreas, destacando estudios de elementos traza en suelos por Loska *et al.* 2005, Roca *et al.* (2012) y Lecce y Pavlowsky (2014), todos ellos citados por Galuska (2015).

### 3.7.2 Método mediana + 2MAD

Para calcular los índices de calidad de sedimento, es necesario considerar el fondo geoquímico local. Para ello se calcula a partir de los datos originales la medida mediana + 2MAD, donde los valores dentro del rango están permitidos.

Es una medida robusta de variabilidad de una muestra univariada de datos cuantitativos. Se utiliza cuando los datos atípicos superan el 15% del total de datos.

Se define como la mediana de las desviaciones absolutas de la mediana de los datos:

$$(X_1, X_2, \dots, X_n): MAD = \text{mediana}_i (|X_i - \text{mediana}_j(X_j)|)$$

### 3.7.3 Upper Whisker

Es el extremo superior diagrama de cajas o boxplot. Valores por encima de este límite se consideran atípicos. Se calcula según la ecuación:

$$UW = Q3 + 1,5 * IQR$$

Donde:

Q3 = 3° Cuartil

IQR= Distancia intercuartil (Q3-Q1)

### 3.7.4 Método de la función de distribución calculada

Las influencias antropogénicas tienden a conducir a enriquecimientos en compartimientos individuales o partes de los sistemas naturales, lo que perturbará la función de distribución sesgando hacia valores más altos (Matschullat *et al.*, 1999).

Si se asume que los valores más bajos están libres de influencias antropogénicas, se tiene que desde el valor mínimo al valor de la mediana (estable frente a los datos atípicos) es un conjunto representativo de los procesos naturales y del fondo

geoquímico. Bajo esta premisa, una función de distribución no antropogénicamente influida se puede construir.

Para ello, cada valor individual del conjunto calculado se refleja contra el valor de la mediana, sumando a ella la distancia que hay desde dicho valor.

### **3.8 Análisis de los puntos de muestreo en la cuenca del Río**

#### **Llaucano**

Se realizó un estudio univariado, bivariado y uno multivariado, para datos de agua y sedimento. La aplicación de estas técnicas permitió concluir acerca de la distribución de las cargas metálicas, establecer relaciones entre contaminantes e identificar distintas fuentes de contaminación natural y de origen antrópico. Lo anterior, utilizando el software estadístico R versión 3.2.1 (Sáez, 2010).

#### **3.8.1 Análisis univariado:**

##### **3.8.1.1 Estadística descriptiva de los datos de aguas y sedimento**

Mediante estas técnicas, se permitió estudiar la información para cada una de las variables, estimando sus estadísticos descriptivos tales como la media, la mediana, la desviación estándar, el máximo, el mínimo, el coeficiente de asimetría, curtosis y cuartiles.

Así también los respectivos gráficos que facilitaron la interpretación de las medidas de tendencia central y las de dispersión (Devore, 2008).

##### **3.8.2 Métodos de análisis bivariado**

Este método que considera la clasificación cruzada de las variables, tomadas de dos en dos, es una forma muy útil de determinar asociaciones significativas de los elementos metálicos presentes en las muestras (Devore, 2008).

Se logró determinar dichas relaciones mediante el cálculo del coeficiente de correlación de Spearman, construyendo la matriz de correlaciones para los 22 elementos químicos muestreados.

### **3.8.3 Métodos de análisis multivariado**

El análisis multivariado o multivariante, facilita el estudio de tres o más variables, de tal manera de sintetizar la información contenida en grandes cantidades de datos, reduciendo la cantidad de parámetros.

Es una suma de herramientas oportunas y convenientes que contribuyeron en la simplificación del análisis e interpretación de la información.

#### **3.8.3.1 Análisis de componente principales (ACP)**

Es una de las técnicas estadísticas multivariantes que permite definir una estructura de serie más pequeña mediante la agrupación de las variables, con el fin de maximizar la variabilidad explicada y a la vez, perdiendo la menor cantidad posible de información.

Para este estudio, se aplicó ACP para los 22 elementos químicos estudiados en 34 muestras de aguas y 30 muestras de sedimento a lo largo de la cuenca del río Llaucano.

#### **3.8.3.2 Análisis de conglomerados jerárquico**

Como su nombre lo dice, esta técnica sirve para clasificar o agrupar un conjunto de observaciones, en este caso las estaciones de muestreo, en conglomerados con características similares según las observaciones.

Dichos grupos, fueron entregados por el software R Project mediante una representación gráfica conocida como dendrogramas, los que permitieron visualizar los conglomerados para facilitar su interpretación.

## Capítulo 4: Resultados y discusión

---

### Estudio de aguas en la cuenca del Río Llaucano

Para el presente estudio, se utilizaron los siguientes datos de concentraciones de metales totales en las aguas del Río Llaucano y las subcuencas de los Ríos Tingo-Maigasbamba y Arascorgue.

De los elementos que fueron analizados químicamente, catorce fueron seleccionados para el estudio de aguas: aluminio, antimonio, arsénico, cadmio, cromo, cobre, hierro, mercurio, manganeso, níquel, plata, plomo, selenio y zinc.

Éstos en su mayoría se encuentran presentes en el listado prioritario de contaminantes de la OMS (Yan *et al.*, 2004). Además, los elementos seleccionados, tienen alta correlación con otros, es decir, explican la variabilidad de aquellos que fueron desestimados, como se puede corroborar en la tabla 2a del anexo de correlaciones pareadas calculadas mediante el método de Spearman.

#### 4.1 Técnicas de análisis univariante

Se aplicaron técnicas de análisis univariante a los resultados de las muestras químicas obtenidas en el río Llaucano y en las subcuencas de los ríos Tingo-Maigasbamba y Arascorgue.

También, se consideró oportuno aplicar dicho análisis a los puntos no contaminados<sup>5</sup> por actividad minera, con el fin de obtener información útil sobre la concentración natural de metales pesados en la cuenca del Río Llaucano.

Los resultados del estudio univariado se presentan en las tablas 4a a 8a del anexo.

---

<sup>5</sup> Puntos que fueron previamente catalogados como no contaminados por la Universidad de Piura.

De las medidas de distribución, se puede destacar que los elementos más positivamente asimétricos son plata, mercurio, plomo, cobre y arsénico. Esto quiere decir que la mayoría de los valores tienden a reunirse en la parte izquierda de la media.

Por otra parte, las altas curtosis que presentan los mencionados elementos ( $>> 0$ ), denota la forma leptocúrtica, es decir, con un alto apuntamiento en torno a un valor.

En las figuras 1a a 14a del anexo, se muestran los gráficos de histograma, box-plot y frecuencia acumulada de cada uno de los elementos estudiados.

Se observa que en su totalidad los datos no presentan una distribución normal, sino fuerte asimetría positiva, lo que se acerca más a una distribución log-normal. También se puede corroborar observando los diagramas de frecuencia acumulada, que para datos normales toma una inclinación de  $45^\circ$ .

Con respecto a los puntos atípicos, todos los elementos los presentan, destacando entre los más fuertemente afectados el aluminio, arsénico, cromo, manganeso y zinc.

## **4.2 Técnicas de análisis bivalente**

Fueron analizados 22 elementos químicos con 34 muestras cada uno, a los cuales se les aplicó el método de Spearman para determinar las correlaciones entre pares.

En la tabla 2a del anexo, se puede observar que los pares más correlacionados positivamente son cadmio-zinc ( $\rho=0,97$ ), calcio-magnesio ( $\rho=0,93$ ), magnesio-manganeso ( $\rho=0,92$ ), cromo-níquel ( $\rho=0,91$ ), manganeso-zinc ( $\rho=0,91$ ) y arsénico-hierro ( $\rho=0,91$ ). Por lo tanto, existe evidencia de una fuerte dependencia de un elemento hacia otro, lo que puede implicar en que las altas concentraciones de

uno de ellos en el agua, influya en la presencia del otro o que tengan un origen común.

En el otro extremo, se encuentra que la plata, bario, mercurio, potasio y selenio no están significativamente correlacionados con otros elementos ( $<0,50$ ).

### **4.3 Técnicas de análisis multivariante**

#### **4.3.1 Análisis de componentes principales (ACP)**

Se realizó un análisis de componentes principales con el software R Project versión 3.2.1 a las 22 variables que corresponden a elementos químicos muestreados en toda la cuenca del río Llaucano.

En la tabla 3 se encuentran las correlaciones de los elementos con las componentes. También, se incluye el porcentaje de varianza explicada por cada componente principal y su porcentaje acumulado.

De la tabla 3 se puede decir que las 3 primeras componentes principales explican el 80% de la variabilidad de los datos. Dichas componentes son mayoritariamente una combinación lineal de los elementos plata, aluminio, arsénico y oro. Lo anterior se puede corroborar en la figura 29a donde los valores propios de las primeras 3 componentes destacan ante los de las demás por ser mayor a 1.

En la figura 8 se aprecia claramente las altas correlaciones entre arsénico-hierro, magnesio-manganeso, entre otras, calculadas en el ítem anterior de análisis bivariado (correlaciones de Spearman).

Tabla 3: Componentes principales y sus porcentajes de varianza (aguas)

	<b>PC1</b>	<b>PC2</b>	<b>PC3</b>	<b>PC4</b>
<b>Ag</b>	-0,6552	0,8267	0,1666	-0,14
<b>Al</b>	-0,4997	-0,6261	0,3078	0,5431
<b>As</b>	-0,3389	-0,3561	0,0204	0,7304
<b>Au</b>	-0,3561	0,465	0,1005	-0,0765
<b>Ba</b>	0,0075	0,055	-0,5597	-0,0113
<b>Ca</b>	-0,1206	-0,0493	-0,0624	-0,0536
<b>Cd</b>	-0,0823	-0,1161	0,0223	-0,1472
<b>Cr</b>	-0,0989	0,0001	-0,0577	0,0553
<b>Cu</b>	-0,0494	-0,0338	0,0264	0,1337
<b>Fe</b>	-0,0498	-0,057	0,0161	0,0593
<b>Hg</b>	-0,0299	0,0379	0,0082	-0,0064
<b>K</b>	-0,0219	0,0253	0,0006	-0,0085
<b>Mg</b>	-0,0147	-0,0177	0,0029	-0,0235
<b>Mn</b>	-0,0138	-0,0157	-0,0079	-0,02
<b>Na</b>	-0,0087	0,0114	0,0025	-0,002
<b>Ni</b>	-0,0088	0,0042	0,0027	0,0023
<b>Pb</b>	-0,0013	-0,0006	-0,0133	0,0009
<b>Sb</b>	-0,0016	-0,0003	-0,0091	0,0016
<b>Se</b>	-0,0031	0,0039	0,0002	0,0003
<b>Sr</b>	-0,002	0,0005	-0,0012	-0,0003
<b>Zn</b>	-0,0018	-0,0026	0,0007	-0,0033
<b>S</b>	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	<b>PC1</b>	<b>PC2</b>	<b>PC3</b>	<b>PC4</b>
<b>Porcentaje de varianza</b>	37,11%	28,93%	14,27%	11,35%
<b>Porcentaje acumulado</b>	37,11%	66,04%	80,31%	91,66%

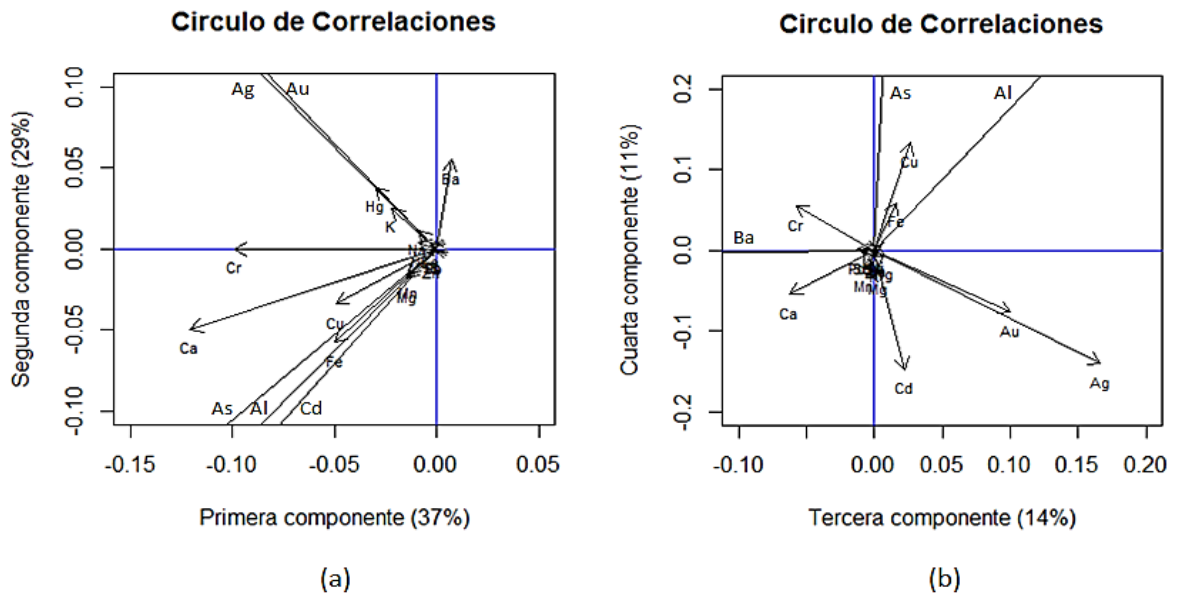


Figura 8: a) Círculo de correlaciones primera y segunda componente, b) Círculo de correlaciones tercera y cuarta componente (agua)

### 4.3.2 Análisis de conglomerados jerárquico

Mediante el paquete Rcmdr del software R project versión 3.2.1 se realizó a los datos de aguas un análisis de agrupación jerárquica para los puntos de muestreo. Al medir las distancias se utilizó el método de la distancia euclídea que corresponde a la raíz cuadrada de las diferencias entre los valores, ya que es una medida por defectos para datos de intervalo.

Como fórmula de agrupación fue utilizado el método de Ward, que utiliza la suma de las distancias al cuadrado a los centros de los grupos.

El cluster conformado por M28 y M43 alberga a las muestras de aguas más extremadamente contaminadas de toda la cuenca del río Llaucano. Ambos puntos presentan niveles muy por sobre los estándares en los elementos aluminio, arsénico, cadmio, cobre, hierro, mercurio, manganeso y zinc. También poseen las conductividades eléctricas más altas en toda la cuenca bajo estudio (4080 y 3130  $\mu\text{mhos/cm}$ ).

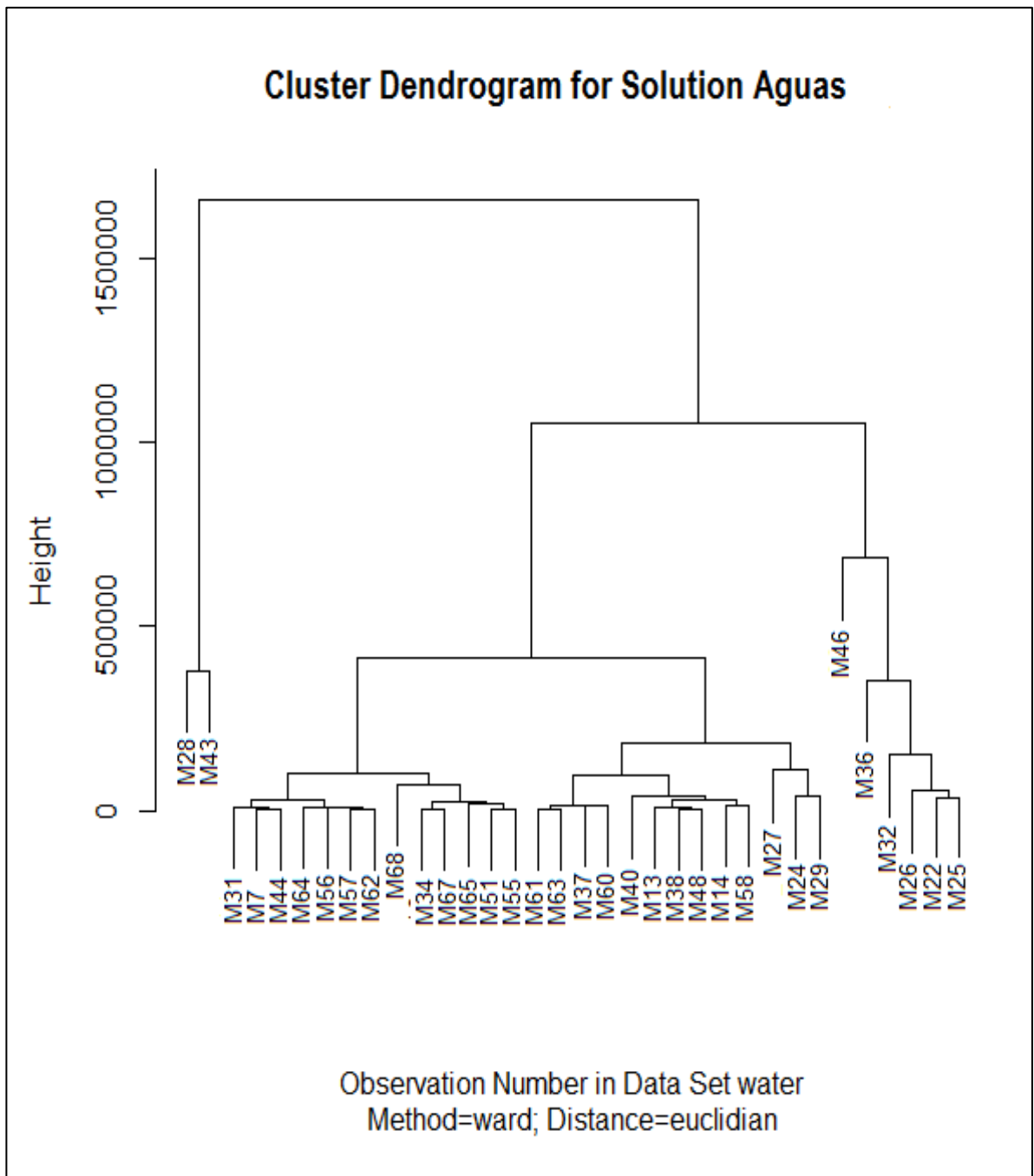


Figura 9: Análisis de conglomerados para aguas de toda la cuenca

Otro conglomerado muy fuertemente correlacionado es el compuesto por M31, M7, M44, M64, M56, M57, M62, M68, M34, M67, M65, M51 y M55. Éste contiene a los puntos de muestreo con mejor calidad de agua, de marginal a excelente, correspondientes a toda la subcuenca del río Llaucano y a los 3 puntos menos contaminados del río Tingo-Maigasbamba, ubicados aguas arriba de instalaciones mineras (31, 34 y 44). También coinciden en ser los puntos con conductividades eléctricas muy bajas, dentro del rango 180-357  $\mu\text{mhos/cm}$ .

Los puntos M61, M63, M37, M60, M40, M13, M38, M48, M14 y M58 integran un conjunto con un muy adecuado nivel de pH (entre 5,7 y 8,5) y a la vez con bajas conductividades eléctricas. En su mayoría poseen pobre calidad de agua y se unen en un nivel superior con los puntos M24, M27 y M29 que poseen también pobre calidad de agua pero a la vez bajo pH y alta conductividad eléctrica.

Por último el conglomerado formado por M46, M36, M32, M26, M22 y M25, muestras que presentan alta conductividad, un similar y adecuado nivel de pH y pobre calidad de agua.

#### **4.4 Índice de calidad de aguas**

Se determinó el índice de calidad de aguas canadiense a toda la cuenca del río Llaucano. Para facilitar el entendimiento e interpretación de los resultados, se dividieron los datos de las 3 subcuencas: Llaucano, Arascorgue y Tingo-Maigasbamba. A continuación, en las tablas 4 a 6 se entregan los resultados del índice calculado según las normativas peruanas.

El río Llaucano, en general obtiene buenos y excelentes resultados al analizar su calidad de agua, sin embargo en los puntos M57 y M64, confluencias con los ríos Arascorgue y Tingo-Maigasbamba respectivamente, su calidad disminuye de buena a marginal.

Tabla 4: Resultados CWQI subcuena del río Llaucano (norma peruana)

Estación	CWQI	Calidad del agua
M7	94,2	Buena
M51	100	Excelente
M55	100	Excelente
M56	94,8	Buena
M57	61,8	Marginal
M62	59,4	Marginal
M64	53,1	Marginal
M65	84,2	Buena
M67	100	Excelente
M68	100	Excelente

Tabla 5: Resultados CWQI subcuena del río Arascorgue (norma peruana)

Estación	CWQI	Calidad del agua
M13	40,6	Pobre
M22	31,4	Pobre
M24	31,1	Pobre
M25	35,5	Pobre
M26	31,1	Pobre
M27	27,6	Pobre
M28	19,8	Pobre
M29	30,8	Pobre

El río Arascorgue es sin duda el más contaminado, con un 100% de puntos con pobre calidad de aguas según la norma peruana. Alcanza sus valores más bajos justo después de recibir el caudal de agua de galería que descarga en quebrada El Dique.

Tabla 6: Resultados CWQI subcuenca del río Tingo-Maigasbamba (norma peruana)

Estación	CWQI	Calidad del agua
M14	44,2	Pobre
M31	63,2	Marginal
M32	30,7	Pobre
M34	100	Excelente
M36	40,9	Pobre
M37	43,4	Pobre
M38	40,7	Pobre
M40	25,8	Pobre
M43	16,1	Pobre
M44	63,2	Marginal
M46	29,7	Pobre
M48	42,9	Pobre
M58	100	Excelente
M60	41,6	Pobre
M61	44,7	Pobre
M63	45,7	Marginal

En la tabla 6 se observa que la calidad del agua en la subcuenca del río Tingo-Maigasbamba es pobre y marginal en gran parte de su extensión, salvo dos excepciones en los puntos M34 y M58 cuyos valores reflejan una excelente calidad, no excediendo la norma en ningún parámetro. El punto M34 corresponde a una muestra aguas arriba de un efluente de la cancha de relaves de Mina Carolina y el M58 a un punto del río Pucpe justo antes de su confluencia con el río Tingo-Maigasbamba.

Luego de determinar el estado de las aguas con los estándares nacionales, se consideró recalcularlos, esta vez con los parámetros más restrictivos de Chile (Conama) y la Organización Mundial de la Salud (OMS). Los resultados de este segundo análisis se entregan en las tablas 7 a 9.

Tabla 7: Resultados CWQI subcuenca del río Llaucano (norma restrictiva)

Estación	CWQI	Calidad del agua
M7	79,7	Aceptable
M51	70,4	Aceptable
M55	74,9	Aceptable
M56	71,5	Aceptable
M57	36,0	Pobre
M62	36,3	Pobre
M64	30,6	Pobre
M65	56,1	Marginal
M67	84,4	Buena
M68	82,7	Buena

Según las normas restrictivas (Conama y OMS), el río Llaucano sigue siendo el menos contaminado de los 3 analizados. No obstante, sus índices de calidad se han visto modificados. Aquellos puntos que según la norma anterior alcanzaban valores buenos y excelentes, ahora solo se consideran aceptables y los que solían ser marginales, según la norma restrictiva disminuyen a calidad pobre luego de su confluencia con las otras dos subcuencas bajo estudio, clara señal de que podrían estar influenciando negativamente al río Llaucano.

Tabla 8: Resultados CWQI subcuenca del río Arascorgue (norma restrictiva)

Estación	CWQI	Calidad del agua
M13	31,2	Pobre
M22	19,9	Pobre
M24	20,0	Pobre
M25	23,5	Pobre
M26	19,8	Pobre
M27	20,0	Pobre
M28	19,6	Pobre
M29	19,9	Pobre

En la tabla 8 se observa que la calidad del agua del río Arascorgue sigue siendo considerada pobre. Al ser comparados con la norma anterior de los estándares peruanos, los valores según esta norma restrictiva caen en promedio 16 puntos.

Tabla 9: Resultados CWQI subcuenca del río Tingo-Maigasbamba (norma restrictiva)

<b>Estación</b>	<b>CWQI</b>	<b>Calidad del agua</b>
<b>M14</b>	28,5	Pobre
<b>M31</b>	36,4	Pobre
<b>M32</b>	23,4	Pobre
<b>M34</b>	71,7	Aceptable
<b>M36</b>	21,9	Pobre
<b>M37</b>	28,4	Pobre
<b>M38</b>	28,0	Pobre
<b>M40</b>	20,4	Pobre
<b>M43</b>	8,3	Pobre
<b>M44</b>	38,0	Pobre
<b>M46</b>	23,2	Pobre
<b>M48</b>	27,8	Pobre
<b>M58</b>	87,4	Buena
<b>M60</b>	27,7	Pobre
<b>M61</b>	28,1	Pobre
<b>M63</b>	28,2	Pobre

Por último, en la tabla 9 se confirma que en ninguno de los puntos analizados bajo normas restrictivas se logra un nivel excelente de calidad de agua. Los resultados de los últimos dos análisis se observan más claramente en la figura 10 a continuación.

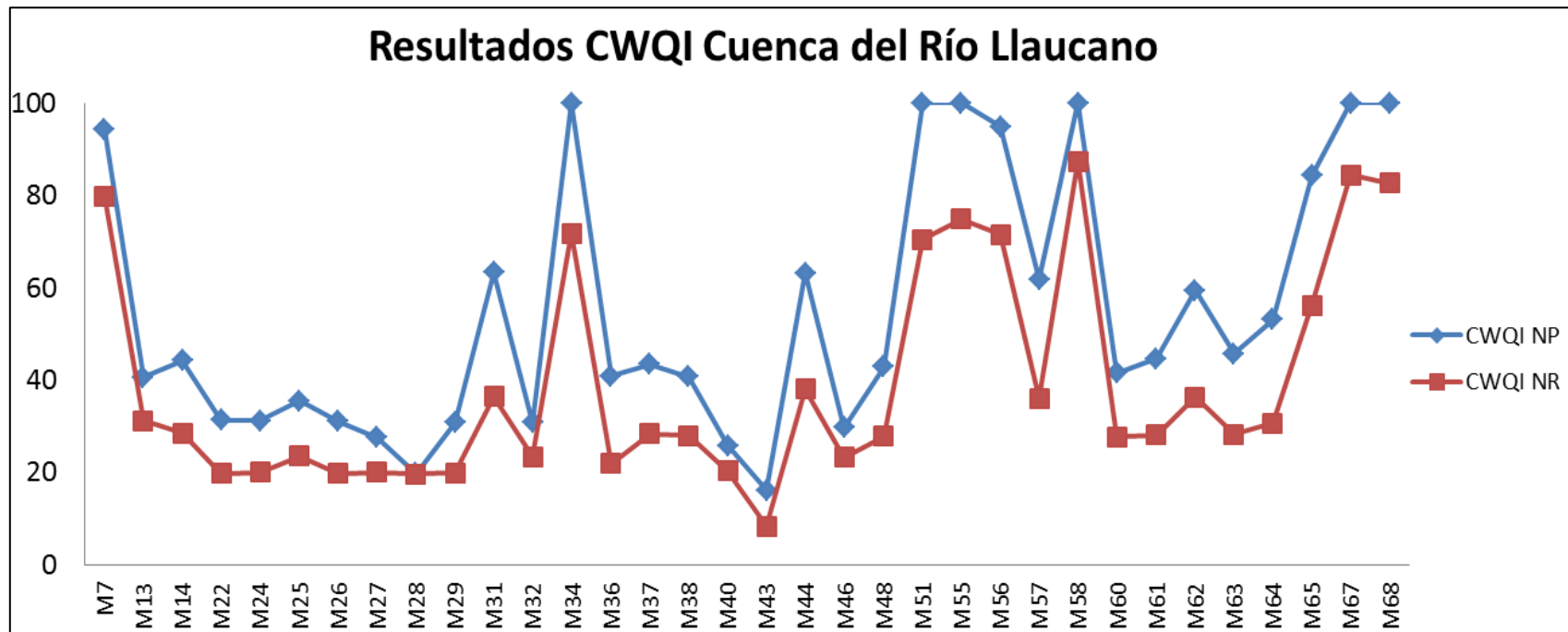


Figura 10: Resultados CWQI toda la cuenca

## **Estudio de sedimentos en la cuenca del río Llaucano**

Análogamente al estudio de aguas, el estudio de sedimentos a continuación considera 14 elementos químicos para calcular los 5 índices de calidad de sedimento considerados.

Se utilizaron los datos de concentraciones de metales totales en sedimentos del río Llaucano y las subcuencas de los ríos Tingo-Maigasbamba y Arascorgue.

### **4.5 Técnicas de análisis univariante**

Fueron aplicadas técnicas de análisis univariante a las observaciones de los 14 elementos químicos en estudio.

Los resultados del análisis se encuentran en las tablas 9a a 12a del anexo.

De las medidas de distribución se puede comentar que varios de los elementos bajo estudio se distribuyen normal o mucho más cercano a una distribución normal en relación a los datos de aguas.

Plata, aluminio, cromo, cobre y selenio poseen coeficientes de asimetría más cercanos a cero que sus pares. En las figuras 15a, 16a, 19a, 20a y 27a del anexo, se pueden ver las gráficas de frecuencia acumulada de estos elementos, que toman la forma de una línea en  $45^\circ$ , lo que corresponde a una distribución normal.

En cuanto a los coeficientes de curtosis, los más cercanos a cero (distribución normal), corresponden a la plata, aluminio, cobre y selenio, lo que indica que estos elementos se distribuyen formando una curva mesocúrtica, es decir, no muy apuntada sobre un valor ni muy dispersa (achatada), sino con un apuntamiento normal.

En el otro extremo, se encuentran el arsénico, cadmio, mercurio, níquel, plomo, antimonio y zinc, cuyos valores de coeficientes de asimetría y curtosis se escapan

por lejos de la normalidad. Los mencionados elementos coinciden también en ser los mayores afectados por la presencia de datos atípicos como se aprecia en las figuras 17a, 18a, 22a, 24a, 25a, 26a y 28a del anexo.

## **4.6 Técnicas de análisis bivalente**

Se calculó la matriz de correlaciones pareadas de Spearman a los 22 elementos químicos muestreados en la cuenca del río Llaucano utilizando el software R Project versión 3.2.1.

En la tabla 3a del anexo, se encuentran las correlaciones para datos de sedimento, donde se puede observar claramente los valores entre 0,80 y 1 y entre 0,60 y 0,79 destacados con color.

Los pares de elementos que poseen mayor dependencia lineal positiva son cadmio-zinc ( $\rho=0,99$ ), zinc-plomo ( $\rho=0,97$ ), plata-antimonio ( $\rho=0,96$ ), cadmio-plomo ( $\rho=0,95$ ), plata-plomo ( $\rho=0,95$ ), plata-mercurio ( $\rho=0,95$ ), plomo-antimonio ( $\rho=0,92$ ), entre otros, cuyos coeficientes se acercan bastante a 1.

El cadmio y magnesio, por su parte, no poseen correlaciones significativas con ningún otro elemento (<60%), excepto cadmio-estroncio que no alcanza el valor 0,8.

## **4.7 Técnicas de análisis multivariante**

### **4.7.1 Análisis de componentes principales (ACP)**

Al igual que en el estudio de aguas, se realizó un análisis de componentes principales a los datos de sedimento de toda la cuenca del río Llaucano.

En la tabla 10, se encuentran las correlaciones de los elementos con las componentes principales. También se incluye el porcentaje de varianza explicada por cada componente y su porcentaje acumulado.

Tabla 10: Componentes principales y sus porcentajes de varianza (sedimento)

	<b>PC1</b>	<b>PC2</b>	<b>PC3</b>	<b>PC4</b>
<b>Ag</b>	0,907	0,3586	0,076	0,3764
<b>Al</b>	-0,4082	0,4019	0,1746	-0,1901
<b>As</b>	0,1982	-0,2727	0,538	0,3145
<b>Au</b>	0,3376	-0,0033	-0,1895	-0,2132
<b>Ba</b>	-0,209	0,1183	-0,3037	0,2257
<b>Ca</b>	0,0788	0,438	0,0634	-0,0863
<b>Cd</b>	0,1956	0,0859	-0,1298	-0,0713
<b>Cr</b>	-0,1074	0,037	0,2294	-0,1195
<b>Cu</b>	0,105	0,0052	0,2277	0,0399
<b>Fe</b>	0,0757	-0,1711	0,112	-0,0554
<b>Hg</b>	0,1401	0,0427	-0,0634	0,0715
<b>K</b>	-0,0693	0,1077	0,0293	-0,0336
<b>Mg</b>	-0,0057	0,108	0,1225	-0,0317
<b>Mn</b>	0,0751	0,0386	-0,0293	-0,0447
<b>Na</b>	-0,0212	0,0123	-0,0106	0,152
<b>Ni</b>	0,0448	0,0335	0,003	-0,0011
<b>Pb</b>	0,0441	0,0198	-0,025	0,0001
<b>Sb</b>	0,0213	0,0057	0,0068	0,0422
<b>Se</b>	0,022	-0,0062	0,0278	0,0103
<b>Sr</b>	-0,0002	0,0276	0,0068	0,0076
<b>Zn</b>	0,0082	0,0041	-0,0048	-0,0033
<b>S</b>	0,0025	-0,0014	0,0002	-0,0017
	<b>PC1</b>	<b>PC2</b>	<b>PC3</b>	<b>PC4</b>
<b>Porcentaje de Varianza</b>	49,20%	15,58%	9,08%	7,35%
<b>Porcentaje acumulado</b>	49,20%	64,78%	73,86%	81,21%

De la tabla 10 se observa que las 4 componentes principales explican el 81% de la variabilidad de los datos. Las componentes mencionadas son mayormente una combinación lineal de plata, aluminio, bario y arsénico. En la figura 30a se confirma que los valores propios sobre 1 corresponden a las 4 primeras componentes.

A continuación en la figura 11 se observa gráficamente las altas correlaciones entre los elementos cadmio-plata, cadmio-mercurio, arsénico-hierro, cadmio-manganeso, entre otros.

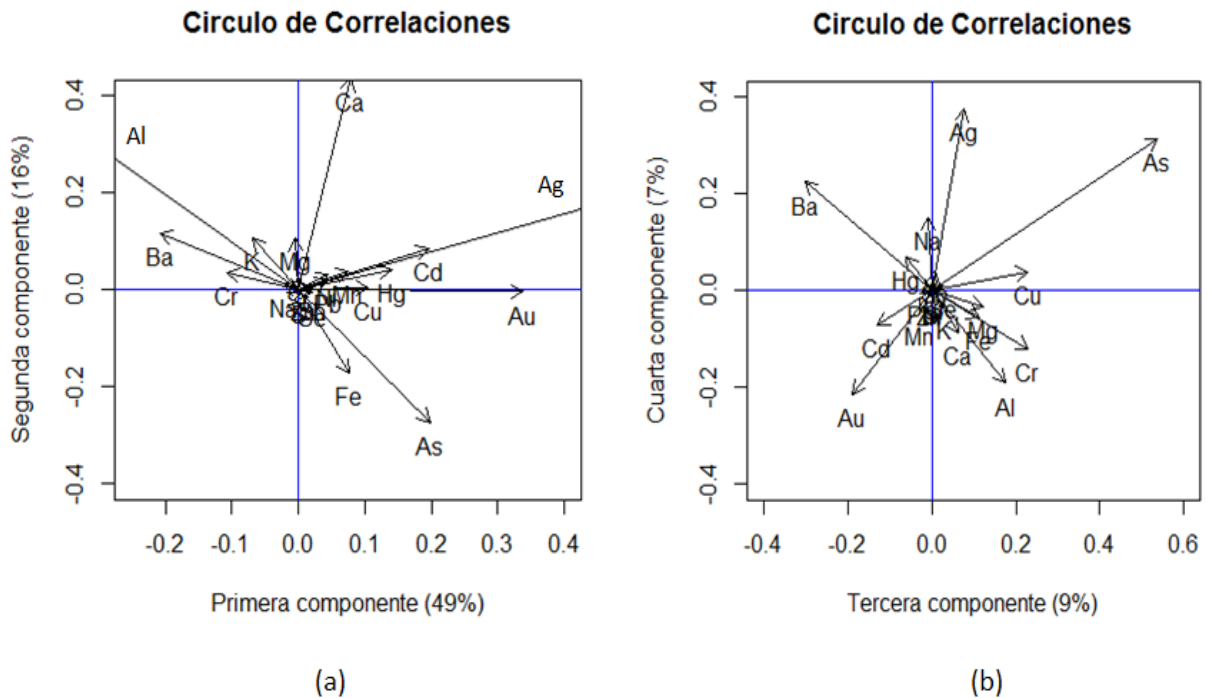


Figura 11: a) Círculo de correlaciones primera y segunda componente, b) Círculo de correlaciones tercera y cuarta componente (sedimento)

#### 4.7.2 Análisis de conglomerados jerárquico

Mediante el paquete Rcmdr del software R Project 3.2.1 se realizó a los datos de sedimento un análisis de conglomerados jerárquico.

Para medir las distancias se utilizó el método de distancia euclídea y como fórmula de agrupación del método de Ward, ambos explicados en el punto 4.3.2.

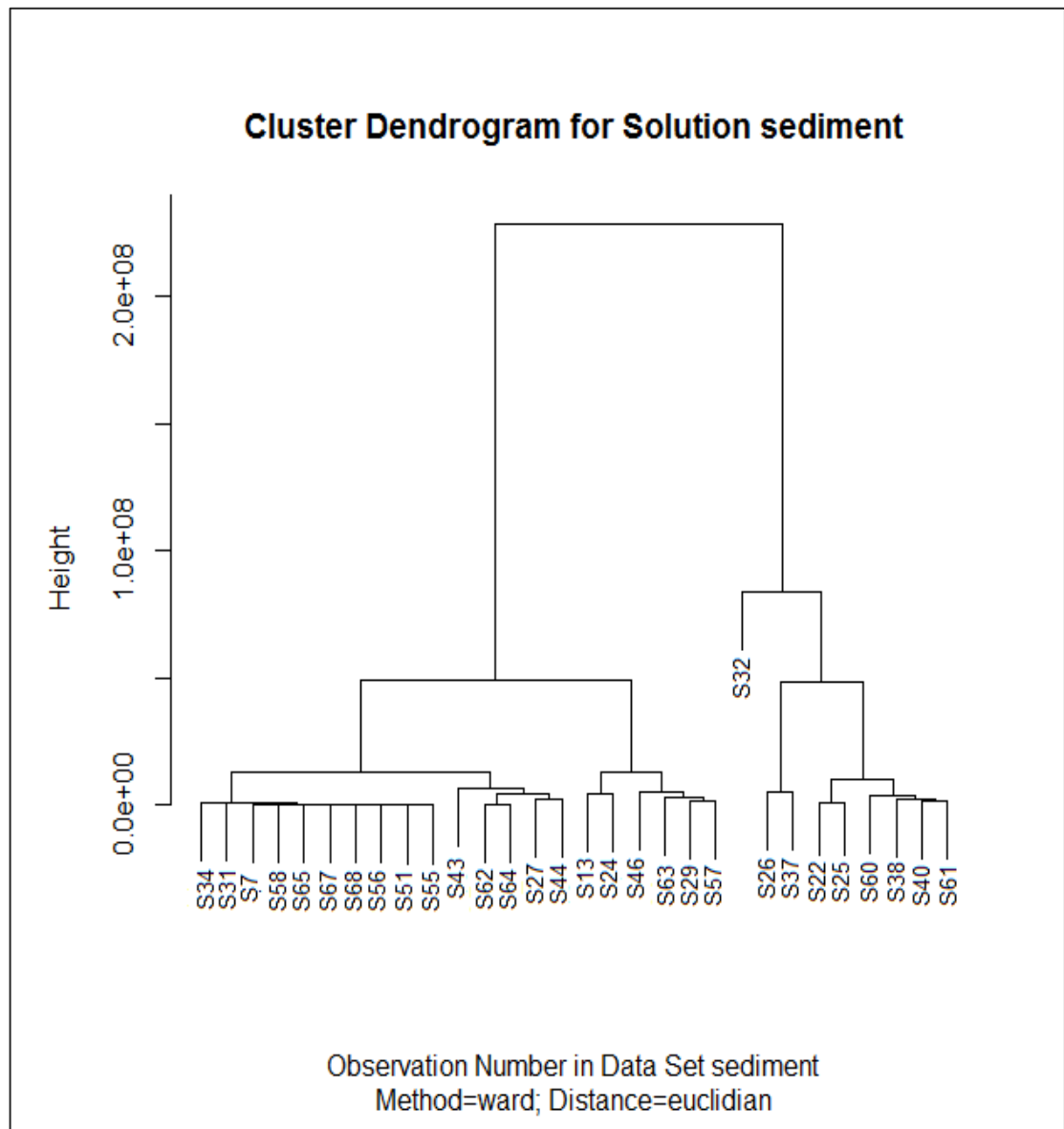


Figura 12: Análisis de conglomerados para sedimentos de toda la cuenca

El clúster conformado por los puntos S26, S37, S22, S25, S60, S38, S40, S61 y S32 presenta enriquecimiento significativo a extremadamente alto por manganeso, baja conductividad eléctrica y adecuados niveles de pH. También una notoria presencia de antimonio, plata, arsénico y mercurio y sus índices de manganeso se observan desde moderado hasta extremadamente contaminado.

S34, S31, S7, S58, S65, S67, S68, S56, S51 y S55 por otra parte forman un grupo de similar comportamiento en todos los índices de sedimento. Son los valores más bajos de concentraciones en todos los elementos, no excediendo los rangos más bajos de los indicadores, salvo contadas excepciones.

Los puntos S43, S62, S64, S27 y S44 que conforman este tercer conjunto poseen niveles de contaminación bajos pero que rozan lo moderado. Exceden la naturaleza del fondo geoquímico en no más de un par de elementos. El punto S43 se aleja un poco del resto del clúster, posiblemente por poseer la conductividad eléctrica más alta de toda la cuenca.

Por último S13, S24, S46, S63, S29 y S57 en general poseen baja conductividad, excepto S46 y adecuado nivel de pH. En su mayoría poseen altas concentraciones de antimonio y moderado a significativo enriquecimiento por manganeso

#### **4.8 Determinación de valores de fondo**

Al comparar los cuatro métodos utilizados para el cálculo de los valores de fondo, en primer lugar se sabe que la mediana es una medida no influenciada por los valores atípicos, por lo tanto los métodos mediana + 2MAD y distribución calculada son aproximaciones fieles de la naturaleza del fondo que no ha sido intervenida por acciones del ser humano. Además, el método mediana + 2MAD es ampliamente utilizado, ya que se encuentra disponible en los paquetes de software relacionados con el tratamiento de datos ambientales (Reimann *et al.*, 2005).

Por otra parte, el método iterativo de la media + 2SD pretende determinar el fondo geoquímico mediante la aproximación a una distribución normal, eliminando datos atípicos tanto sobre como por debajo del rango  $media \pm 2SD$ . Para este caso, los valores bajo el rango corresponden apenas al 1%, por lo que no se consideran

gran influencia para el promedio. Sin embargo, los valores por sobre el rango son una fuerte influencia para el conjunto de datos, razón por la cual mediante el uso de este método se encontraron los valores umbral más altos en promedio luego del método upper whisker.

Según un experimento realizado por Reimann *et al.* (2005), para datos con distribución log-normal, es decir, con asimetría positiva (como es el caso de los datos de este estudio), el método media + 2SD detecta aproximadamente el 3% de datos atípicos, el upper whisker alrededor del 8% y la media + 2MAD el 15% para distintos tamaños de muestra.

Para estos datos, el método de distribución calculada arrojó un 18% de outliers, seguido del método iterativo media  $\pm$  2SD con un 16%, mediana + 2MAD un 14% y por último el upper whisker un 3%. Los resultados de los valores umbral obtenidos con cada método se encuentran en la tabla 15a del anexo.

Con base en lo mencionado en párrafos anteriores, se propone utilizar el método iterativo media  $\pm$  2SD para determinar el fondo geoquímico de la cuenca del río Llaucano, ya que el de distribución calculada, a pesar de ser aparentemente un buen candidato, trabaja bajo un supuesto demasiado radical acerca de la representatividad de los datos. Además, el método iterativo considera tanto valores sobre el rango como por debajo de él, ya que estos también pueden denotar anomalías como por ejemplo el empobrecimiento de ciertos elementos esenciales.

## **4.9 Índices de calidad de sedimento**

### **4.9.1 Factor de enriquecimiento**

En este estudio de calidad de sedimento, se ha calculado el factor de enriquecimiento (FE) para 13 elementos químicos seleccionados. El aluminio es el elemento número 14 utilizado como normalizador. Los resultados y su clasificación se encuentran en la tabla 13a del anexo.

Los puntos de muestreo más fuertemente enriquecidos con metales pesados son S37 y S32. Esto posiblemente se debe a que en la zona se incrementa la actividad minera y ambos son sitios directamente afectados por ella. S32 corresponde a sedimento de arroyo proveniente de planta de flotación de Mina Carolina, ubicada aguas arriba del río Arascorgue, pero que afecta a la subcuenca del Tingo-Maigasbamba. S37 es una muestra de sedimento tomada justo después de la estación de bombeo presente en la subcuenca del río Tingo-Maigasbamba. Todo ello podría influenciar negativamente la calidad del sedimento.

También destacan por altos niveles de enriquecimiento los puntos S26 y S40. El primero se encuentra después de relaves mineros de Mina Carolina y el segundo es afectado por la reciente confluencia con la Quebrada Tres Amigos, lo que podría ser la razón del enriquecimiento principalmente por manganeso, antimonio y plata y en menor proporción por cadmio y zinc.

Los puntos S27, S32, S37, S43 y S46 poseen significativo enriquecimiento con arsénico, todos ellos están justo después de plantas de flotación, cancha de relaves y pilas de lixiviación, los que son activos y pasivos mineros, conocidos por ser la principal amenaza para la calidad de aguas y sedimento.

El resumen del comportamiento de los valores obtenidos para el factor de enriquecimiento se encuentra en la figura 29a del anexo. En esta imagen se encuentran los 8 box-plot realizados mediante el uso del software estadístico R Project, para los elementos críticos utilizados en el cálculo del grado de contaminación.

En dicha figura destacan el antimonio (Sb), cromo (Cr) y cobre (Cu) por poseer los valores de la mediana más altos y punto atípicos que denotan una extremadamente alta contaminación por antimonio en el sedimento.

#### **4.9.2 Índice de geoacumulación**

Según los resultados del índice de geoacumulación presentados en la tabla 15a del anexo, gran parte de la cuenca del río Llaucano presenta un comportamiento similar, es decir, se encuentra prácticamente sin contaminar.

El manganeso (Mn) es la excepción, presentando valores casi extremos del índice en dos puntos del río Tingo-Maigasbamba, S32 y S37. Estas muestras también mostraron altos niveles de enriquecimiento extremadamente alto de manganeso con el índice calculado anteriormente, lo que confirma que no posee buena calidad de sedimento.

El segundo elemento que presenta altos valores para este indicador es el antimonio (Sb). Destacan los puntos S32 y S46, el primero se encuentra en el río Tingo-Maigasbamba y se ha destacado anteriormente por sus altos niveles de contaminación. El S46 corresponde a la subcuenca del río Tingo-Maigasbamba y su acumulación de antimonio se debe posiblemente a la actividad de la mina San Nicolás y sus pilas de lixiviación.

En la figura 30a del anexo se puede observar que al comparar los 8 elementos seleccionados para el cálculo de grado de contaminación, existe cierta tendencia a la inexistencia de contaminación. Los valores de la mediana se encuentran entre -4 y 0. En cuanto a los valores máximos, solo el antimonio alcanza un valor superior a 2, lo que se traduce en un índice de moderada a fuerte contaminación.

#### **4.9.3 Factor de contaminación**

El factor de contaminación, a diferencia de otros índices de calidad de sedimento, se aplicó solamente a los 8 elementos seleccionados en la literatura para este análisis: arsénico (As), cadmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), mercurio (Hg), plomo (Pb), antimonio (Sb) y Zinc (Zn).

Los resultados de este cálculo se presentan en la tabla 16a del anexo, en conjunto con el grado de contaminación y el índice integrado de contaminación.

Con respecto a lo obtenido, el antimonio fue el elemento que se encuentra en mayor proporción en los puntos muestreados. Se observaron concentraciones muy altas en S32 y S46, considerables en S37, S38, S40 y S60, moderadas en S22, S24, S25, S26 S43 y S61.

Las más altas y considerables concentraciones corresponden al río Tingo-Maigasbamba y las moderadas a la subcuenca del río Arascorgue.

Las altas concentraciones del lecho del río Tingo-Maigasbamba se deben quizás a que aguas arriba alberga las instalaciones de Mina San Nicolás y también recibe caudales de arroyos provenientes de Mina Carolina.

Por su parte, el río Arascorgue recibe influencia de las instalaciones de Mina Carolina aguas arriba, debido a su confluencia con la quebrada Mesa de Plata.

En la figura 31a del anexo, se observa que la serie de box-plot para los 8 elementos bajo análisis posee un comportamiento muy similar al del factor de enriquecimiento (figura 29a), donde destaca el antimonio por su alta mediana, tercer cuartil, máximo y puntos atípicos.

El resto de los elementos alcanzan valores de la mediana entre 0 y 1, lo que significa que al menos el 50% de los puntos muestreados tienen niveles de contaminación baja.

#### **4.9.3.1 Grado de contaminación**

El grado de contaminación ( $C_{DEG}$ ) es un derivado del factor de contaminación que corresponde a la sumatoria de los factores obtenidos en cada elemento observado.

Entre sus observaciones, las que destacan con moderada contaminación son S26, S37, S38, S40 y S60. Por otra parte, S32 y S46 superan por lejos con una calificación de contaminación considerable. Esto se debe a que una mayor cantidad de variables superan los valores estándar determinados como fondo geoquímico de la cuenca.

#### **4.9.3.2 Índice integrado de contaminación**

El índice integrado de contaminación (IPI) es otro de los derivados del factor de contaminación. Éste corresponde al promedio de los factores obtenidos en las 8 variables analizadas.

En general el comportamiento entre el índice integrado y el grado de contaminación son bastante similares, como se puede apreciar en la tabla 16a del anexo, donde las clasificaciones de baja, moderada y considerable contaminación coinciden en cada punto de muestreo. Destacan los puntos S32 y S43 con valores que reflejan considerable contaminación.

Estos altos índices de contaminación están mayormente influidos por la gran presencia de antimonio en el fondo del río.

### **4.10 Caracterización conjunta de agua y sedimento en la cuenca del río Llaucano**

A continuación se presenta un análisis que contrasta los datos de agua y sedimento, con el fin de establecer similitudes y diferencias entre ambos grupos de datos. De esta manera facilitar el análisis del comportamiento espacial de las variables observadas.

#### **4.10.1 Análisis estadístico**

Al observar los histogramas de agua (figuras 1a a 14a) y los de sedimento (figuras 15a a 28a), se puede comentar que los datos de agua en su mayoría presentan fuerte asimetría positiva ( $>0$ ), se corrobora en la tabla 4a, donde los coeficientes varían de 1,8 a 5,8. Los datos de sedimento, en cambio, se acercan más a una distribución normal con coeficientes de asimetría mucho más cercanos a cero.

Los gráficos de frecuencia acumulada por su parte, en algunos elementos medidos en el sedimento, toman la forma diagonal en  $45^\circ$ , corroborando el

comportamiento normal de la plata, aluminio, cromo, cobre, hierro, manganeso y selenio.

En cuanto a los puntos atípicos, es el agua la mayor afectada por este comportamiento, ya que se observan datos sobre el upper whisker en todas sus variables. En datos de sedimento, sólo el antimonio presenta una mayor cantidad de datos atípicos.

En el análisis de componentes principales, la variabilidad de los datos de agua está explicada mayormente por la plata, aluminio, arsénico, oro y bario. La variabilidad en sedimentos es explicada por la combinación lineal de plata, aluminio, arsénico y calcio.

#### **4.10.2 índices de calidad de agua y sedimento**

En el mapa de la figura 13 se presenta el índice de calidad calculado bajo los estándares peruanos (ICA 1). En él se puede observar que el alcance de contaminación del agua desde la actividad minera abarca hasta más allá de la confluencia con el río Llaucano.

Es fácil ver que en los puntos aguas arriba de los activos y pasivos ambientales, la calidad de agua se presenta en niveles buenos y excelentes y empeora inmediatamente después del contacto con ellos.

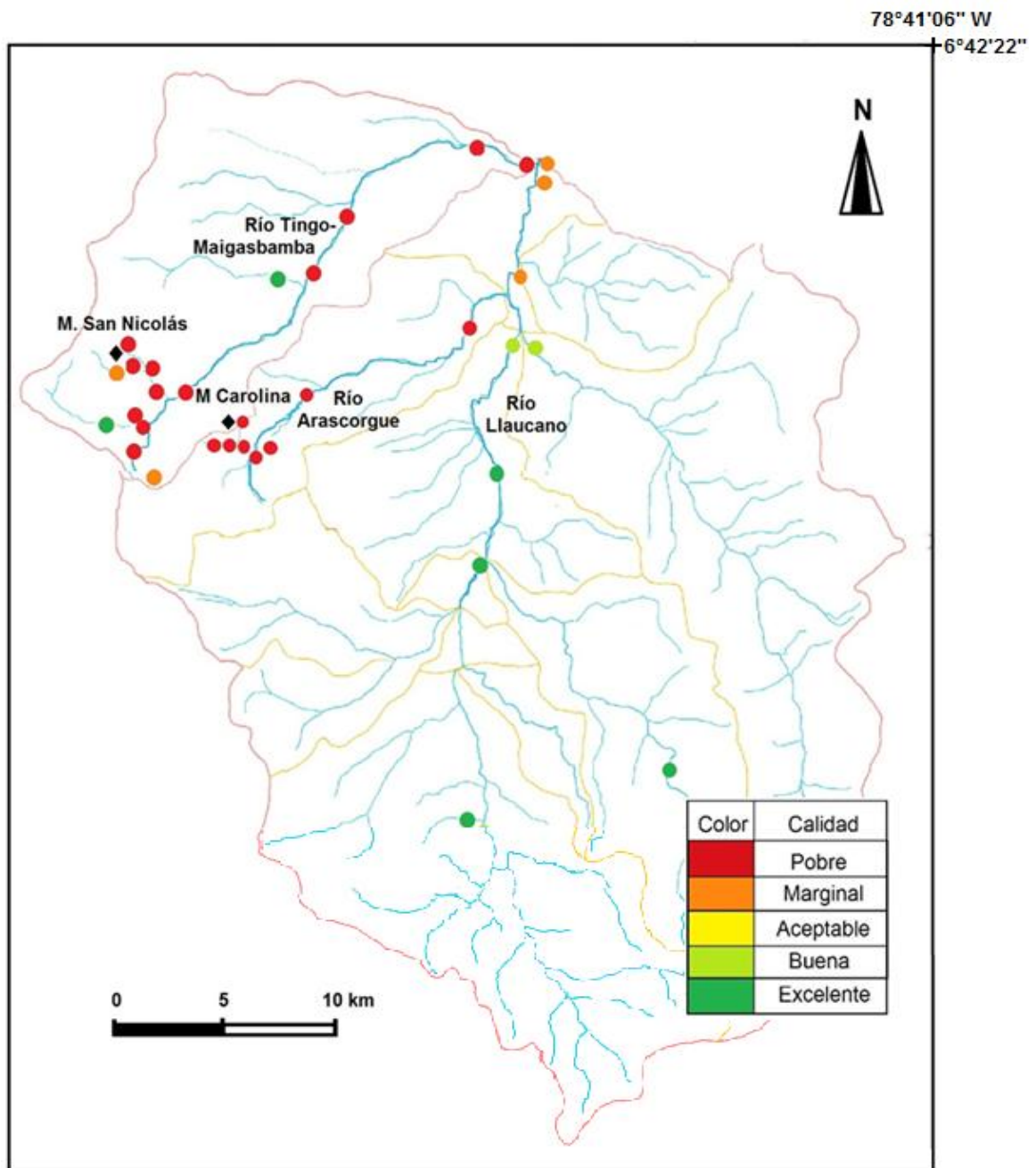


Figura 13: ICA 1 toda la cuenca del río Llaucano

Por otra parte, la figura 14 muestra los niveles de calidad de agua desde una perspectiva exigente, según las normas de la Conama y OMS, donde los mismos puntos con las mismas concentraciones son considerados en su mayoría un nivel más abajo que en la figura 13.

En el río Tingo-Maigasbamba, en los puntos más cercanos a la Mina San Nicolás, los elementos químicos que más afectan la calidad del agua son el aluminio, arsénico, cobre, hierro, manganeso y zinc, que superan la norma exageradamente, coincidiendo también con los elementos mayoritarios en las aguas del río Arascorgue.

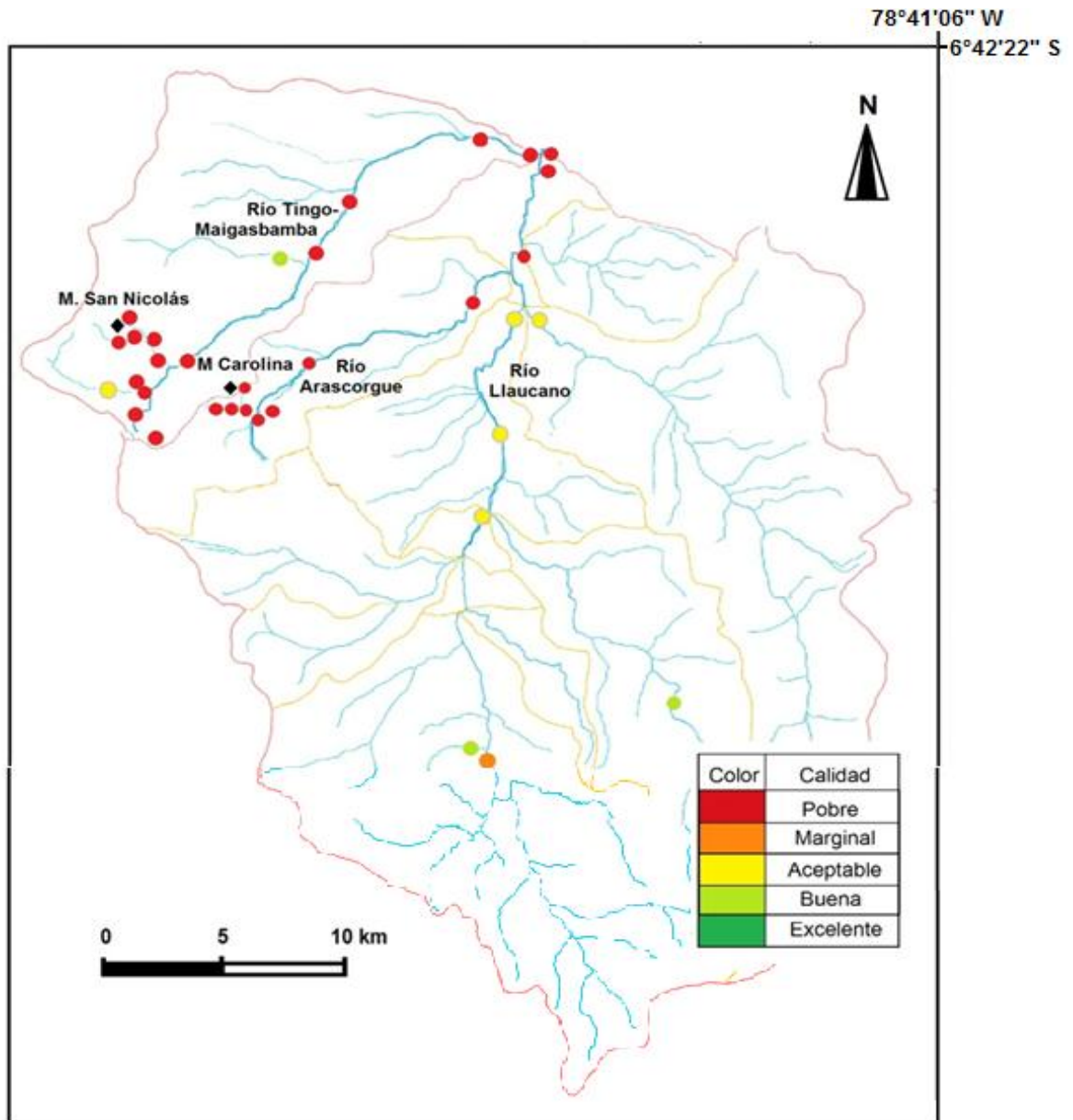


Figura 14: ICA 2 toda la cuenca del río Llaucano

En la figura 15 se observa que en general las muestras de sedimento presentan el nivel más bajo de contaminación, según el criterio del grado de contaminación, que se calcula con los datos de factor de contaminación de cada variable.

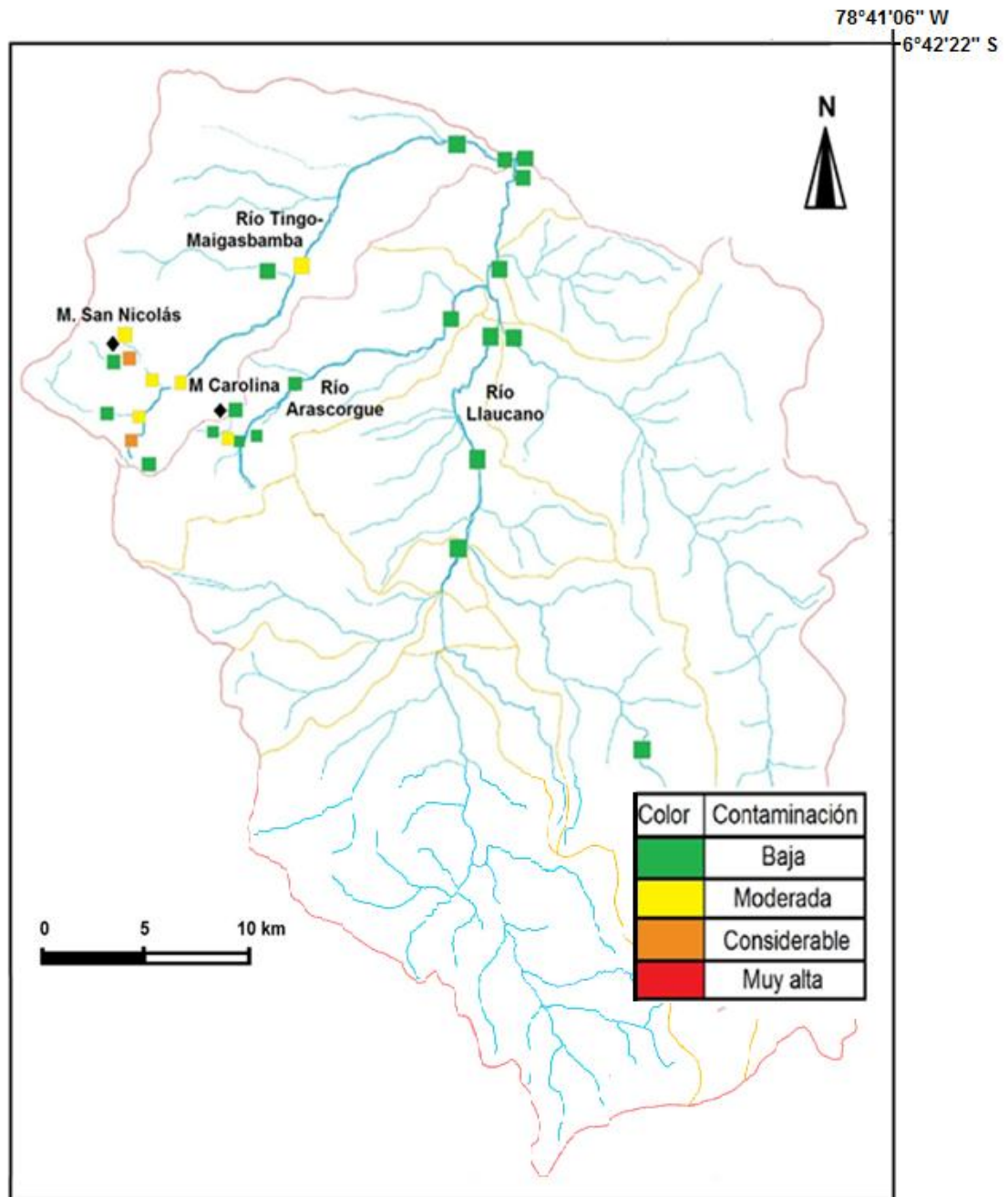


Figura 15: Grado de contaminación toda la cuenca del río Llaucano

Los puntos que presentan niveles considerables de contaminación, S32 y S46 ubicados en la subcuenca del río Tingo-Maigasbamba están mayormente influídos por la gran presencia de antimonio en el lecho del río. El punto S32 además está considerablemente contaminado con arsénico, cadmio, mercurio, plomo y zinc, posiblemente por tratarse de un arroyo que proviene desde Mina Carolina.

En el río Arascorgue, el punto más contaminado, S26, posee alto enriquecimiento por manganeso, antimonio y plata, en menor grado por cadmio, plomo y zinc.

Es importante señalar, que a pesar de estar tomados en el mismo lugar, las muestras de agua pueden presentar una pobre calidad y el sedimento en cambio una baja contaminación.

#### **4.10.3 Análisis individual de los puntos de muestreo de agua y sedimento**

En las tablas a continuación, se presenta un análisis a cada punto muestreado en agua y sedimento. Se resumen los resultados de ICA 1 (norma peruana), ICA 2 (norma restrictiva), factor de enriquecimiento (FE), índice de geoacumulación ( $I_{geo}$ ) y el grado de contaminación ( $C_{deg}$ ).

Tabla 11: Análisis individual de los puntos de muestreo de agua y sedimento

<b>Punto Agua</b>	<b>ICA 1 (N.P.)</b>	<b>ICA 2 (N.R)</b>	<b>Punto Sedim</b>	<b>FE</b>	<b>Igeo</b>	<b>Cf</b>
<b>M7</b>	Buena calidad de agua, excede solo en Al.	Calidad aceptable, excede en Al, Hg y Mn.	<b>S7</b>	Enriquecimiento deficiente en todos los elementos	Sin contaminar	Sin contaminar
<b>M13</b>	Calidad pobre, altas concentraciones de Al, Cd, Fe, Mn y Zn.	Calidad pobre, excede en Al, Cd, Cu, Fe, Hg, Mn y Zn	<b>S13</b>	Enriquecimiento significativo por Mn	Contaminación moderada a fuerte por Mn	Sin contaminar
<b>M14</b>	Calidad pobre, altas concentraciones de Al, As, Cd, Fe, Mn y Zn.	Calidad pobre, excede en Al, As, Cu, Fe, Hg, Mn y Zn	—	—	—	—
<b>M22</b>	Calidad pobre, altas concentraciones de Al, As, Cd, Fe, Mn y Zn. Alta conductividad, bajo pH	Calidad pobre, excede en Al, As, Cd, Cu, Fe, Hg, Mn y Zn. Alta conductividad eléctrica y bajo pH	<b>S22</b>	Enriquecimiento moderado por Ag y Sb, muy alto por Mn	Muy contaminado por Mn	Moderada contaminación por Sb
<b>M24</b>	Calidad pobre, altas concentraciones de Al, As, Cd, Fe, Mn y Zn. Alta conductividad, muy bajo pH	Calidad pobre, excede en Al, As, Cd, Cu, Fe, Hg, Mn y Zn. Alta conductividad eléctrica y bajo pH	<b>S24</b>	Enriquecimiento moderado por Sb y significativo por Mn	Moderadamente contaminado por Mn	Moderada contaminación por Sb
<b>M25</b>	Calidad pobre, altas concentraciones de Al, As, Cd, Fe, Mn y Zn.	Calidad pobre, excede en Al, As, Cd, Cu, Fe, Hg, Mn y Zn. Alta conductividad eléctrica.	<b>S25</b>	Enriquecimiento moderado por Cd y Sb, muy alto por Mn.	Muy contaminado por Mn	Moderada contaminación por Sb
<b>M26</b>	Calidad pobre, altas concentraciones de Al, As, Cd, Fe, Mn y Zn. Alta conductividad eléctrica.	Calidad pobre, excede en Al, As, Cd, Cu, Fe, Hg, Mn y Zn. Alta conductividad eléctrica y bajo pH	<b>S26</b>	Enriquecimiento moderado por Cd, Hg, Ni, Pb y Zn, significativo por Ag y Sb y extremadamente alto por Mn.	Muy contaminado por Mn, no a moderadamente contaminado por Ag, Cd, Pb, Sb y Zn	Moderada contaminación por Cd, Pb, Sb y Zn
<b>M27</b>	Calidad pobre, altas concentraciones de Al, As, Cd, Cu, Fe, Mn y Zn. Alta conductividad, muy bajo pH	Calidad pobre, excede en Al, As, Cd, Cu, Fe, Hg, Mn y Zn. Alta conductividad eléctrica y bajo pH	<b>S27</b>	Enriquecimiento moderado por Cr, Mn y Sb y significativo por As y Fe	No a moderadamente contaminado por Fe	Moderada contaminación por As

Tabla 12: Análisis individual de los puntos de muestreo de agua y sedimento (continuación)

<b>Punto Agua</b>	<b>ICA 1 (N.P.)</b>	<b>ICA 2 (N.R)</b>	<b>Punto Sedim</b>	<b>FE</b>	<b>Igeo</b>	<b>Cf</b>
<b>M28</b>	Calidad muy pobre, excede Al, As, Cd, Cu, Fe, Mn, Ni Pb, y Zn. Muy alta conductividad y bajo pH	Calidad pobre, excede en Al, As, Cd, Cu, Fe, Hg, Mn y Zn. Muy alta conductividad eléctrica y bajo pH	–	–	–	–
<b>M29</b>	Calidad pobre, excede Al, As, Cd, Fe, Mn y Zn. Posee bajo pH	Calidad pobre, excede en Al, As, Cd, Cu, Fe, Hg, Mn y Zn. Bajo pH	<b>S29</b>	Enriquecimiento moderado por Mn	No a moderadamente contaminado por Mn	Sin contaminar
<b>M31</b>	Calidad marginal, excede Al, Cd, Fe y Mn.	Calidad pobre, excede en Al, Cu, Fe, Hg, Mn y Zn.	<b>S31</b>	Enriquecimiento deficiente en todos los elementos	No a moderadamente contaminado por Cr	Sin contaminar
<b>M32</b>	Calidad pobre, excede Al, As, Cd, Fe, Mn, Sb y Zn.	Calidad pobre, excede Al, As, Cd, Cu, Fe, Hg, Mn, Sb y Zn.	<b>S32</b>	Enriquecimiento extremadamente alto por Mn y Sb, muy alto por Ag, Cd, Hg, Pb y Zn, significativo por As, Fe, Ni y Se.	Muy a extremadamente contaminado por Mn, moderada a fuertemente contaminado por Sb, moderada contaminación por Ag, Cd, Hg, Pb, y Zn y no a moderadamente contaminado por As y Ni.	Muy alta contaminación por Sb, considerable contaminación por Cd, Hg, Pb, y Zn y moderada contaminación por As
<b>M34</b>	Excelente calidad de agua, no excede parámetros	Calidad aceptable, excede en Al, Cu, Hg y Mn.	<b>S34</b>	Enriquecimiento deficiente en todos los elementos	Sin contaminar	Sin contaminar
<b>M36</b>	Calidad pobre, excede Al, As, Cd, Fe y Mn.	Calidad pobre, excede en Al, As, Cu, Fe, Hg, Mn y Zn. Alta conductividad eléctrica.	–	–	–	–

Tabla 13: Análisis individual de los puntos de muestreo de agua y sedimento (continuación)

<b>Punto Agua</b>	<b>ICA 1 (N.P.)</b>	<b>ICA 2 (N.R)</b>	<b>Punto Sedim</b>	<b>FE</b>	<b>Igeo</b>	<b>Cf</b>
<b>M37</b>	Calidad pobre, excede Al, As, Cd, Fe y Mn.	Calidad pobre, excede en Al, As, Cu, Fe, Hg, Mn y Zn.	<b>S37</b>	Enriquecimiento extremadamente alto por Ag, Mn y Sb, muy alto por Hg, significativo por As, Cd, Fe, Ni, Pb, Se y Zn.	Muy a extremadamente contaminado por Mn, moderada contaminación por Ag y Sb y no a moderadamente contaminado por Hg.	Considerablemente contaminado por Sb y moderadamente contaminado por As, Cd, Hg, Pb y Zn
<b>M38</b>	Calidad pobre, excede Al, As, Cd, Fe y Mn.	Calidad pobre, excede en Al, As, Cu, Fe, Hg, Mn y Zn.	<b>S38</b>	Enriquecimiento significativo por Mn y Sb, moderado por Ag, As y Cu.	Moderada a fuerte contaminación por Mn, moderada contaminación por Sb y no a moderada contaminación por Ag.	Considerablemente contaminado por Sb y moderadamente contaminado por As y Cu
<b>M40</b>	Calidad muy pobre, excede en Al, As, Cd, Cu, Fe, Mn, Sb y Zn. Posee bajo pH.	Calidad pobre, excede en Al, As, Cu Fe, Hg, Mn, Sb y Zn. Bajo pH.	<b>S40</b>	Enriquecimiento muy alto por Mn, significativo por Ag y Sb y moderado por Hg y Ni.	Moderada a fuerte contaminación por Mn, moderada contaminación por Ag y Sb	Considerablemente contaminado por Sb y moderadamente contaminado por Hg
<b>M43</b>	Calidad muy pobre, excede Al, As, Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sb y Zn. Muy alta conductividad y muy bajo pH	Calidad muy pobre, excede en Al, As, Cd, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Sb y Zn. Muy alta conductividad y muy bajo pH	<b>S43</b>	Enriquecimiento significativo por As y moderado por Cr, Fe y Sb.	Moderada contaminación por As y no a moderadamente contaminado por Sb	Considerablemente contaminado por As y moderadamente contaminado por Sb
<b>M44</b>	Calidad marginal, excede Al, As, Fe y Mn.	Calidad pobre, excede en Al, As, Cu, Fe, Hg, Mn y Zn. Bajo pH	<b>S44</b>	Enriquecimiento deficiente en todos los elementos	Sin contaminar	Sin contaminar
<b>M46</b>	Calidad pobre, excede Ag, Cd, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, Sb, Se. Alta conductividad eléctrica	Calidad pobre, excede Ag, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, Sb, Se y Zn. Muy alta conductividad eléctrica.	<b>S46</b>	Enriquecimiento extremadamente alto por Sb, significativo por Ag, As, Hg y Mn y moderado por Cu, Pb y Se.	Muy contaminado por Sb, moderadamente contaminado por Mn y no a moderadamente contaminado por Ag, As y Hg	Muy alta contaminación por Sb y moderada contaminación por As y Hg

Tabla 14: Análisis individual de los puntos de muestreo de agua y sedimento (continuación)

<b>Punto Agua</b>	<b>ICA 1 (N.P.)</b>	<b>ICA 2 (N.R)</b>	<b>Punto Sedim</b>	<b>FE</b>	<b>Igeo</b>	<b>Cf</b>
<b>M48</b>	Calidad pobre, excede Al, As, Cd, Fe y Mn.	Calidad pobre, excede en Al, As, Cu, Fe, Hg, Mn y Zn.	–	–	–	–
<b>M51</b>	Excelente calidad de agua, no excede parámetros	Calidad aceptable, excede Al, Cu y Hg.	<b>S51</b>	Enriquecimiento deficiente en todos los elementos	Sin contaminar	Sin contaminar
<b>M55</b>	Excelente calidad de agua, no excede parámetros	Calidad aceptable, excede Al, Cu y Hg.	<b>S55</b>	Enriquecimiento deficiente en todos los elementos	Sin contaminar	Sin contaminar
<b>M56</b>	Buena calidad de agua, excede solo en Al.	Calidad aceptable, excede Al, Cu, Hg y Mn.	<b>S56</b>	Enriquecimiento deficiente en todos los elementos	Sin contaminar	Sin contaminar
<b>M57</b>	Calidad marginal, excede Al, Cd, Fe y Mn.	Calidad pobre, excede, Al, Cu Fe, Hg, Mn y Zn.	<b>S57</b>	Enriquecimiento significativo por Mn y moderado por Ag, Fe y Sb.	Moderadamente contaminado por Mn	Sin contaminar
<b>M58</b>	Excelente calidad, no excede parámetros	Buena calidad, excede Al y Hg.	<b>S58</b>	Enriquecimiento deficiente en todos los elementos	Sin contaminar	Sin contaminar
<b>M60</b>	Calidad pobre, excede Al, As, Cd, Fe y Mn.	Calidad pobre, excede en Al, As, Cu, Fe, Hg, Mn y Zn.	<b>S60</b>	Enriquecimiento muy alto por Mn, significativo por Ag y Sb y moderado por Hg	Moderada a fuerte contaminación por Mn, moderada contaminación por Sb y no a moderada contaminación por Ag.	Considerablemente contaminado por Sb y moderadamente contaminado por Hg

Tabla 15: Análisis individual de los puntos de muestreo de agua y sedimento (continuación)

<b>Punto Agua</b>	<b>ICA 1 (N.P.)</b>	<b>ICA 2 (N.R)</b>	<b>Punto Sedim</b>	<b>FE</b>	<b>Igeo</b>	<b>Cf</b>
<b>M61</b>	Calidad pobre, excede Al, As, Cd, Fe y Mn.	Calidad pobre, excede en Al, As, Cu, Fe, Hg, Mn y Zn.	<b>S61</b>	Enriquecimiento muy alto por Mn y moderado por Ag y Sb	Moderada a fuerte contaminación por Mn y no a moderada contaminación por Ag y Sb.	Moderada contaminación por Sb
<b>M62</b>	Calidad marginal, excede Al, Cd, Fe y Mn.	Calidad pobre, excede en Al, Cu, Fe, Hg, Mn y Zn.	<b>S62</b>	Enriquecimiento moderado por Mn	No a moderadamente contaminado por Mn	Sin contaminar
<b>M63</b>	Calidad pobre, excede Al, As, Cd, Fe y Mn.	Calidad pobre, excede en Al, As, Cu, Fe, Hg, Mn y Zn.	<b>S63</b>	Enriquecimiento moderado por Mn	Moderadamente contaminado por Mn	Sin contaminar
<b>M64</b>	Calidad marginal, excede Al, As, Cd, Fe y Mn.	Calidad pobre, excede en Al, As, Cu, Fe, Hg, Mn y Zn.	<b>S64</b>	Enriquecimiento moderado por Mn	No a moderadamente contaminado por Mn	Sin contaminar
<b>M65</b>	Buena calidad de agua, excede solo en Al y Se.	Calidad marginal, excede Al, Cu, Hg, Mn y Zn.	<b>S65</b>	Enriquecimiento moderado por Cr.	Sin contaminar	Sin contaminar
<b>M67</b>	Excelente calidad de agua, no excede parámetros	Buena calidad, excede Al ,Hg y Mn.	<b>S67</b>	Enriquecimiento deficiente en todos los elementos	Sin contaminar	Sin contaminar
<b>M68</b>	Excelente calidad de agua, no excede parámetros	Buena calidad, excede Al, Cu y Hg.	<b>S68</b>	Enriquecimiento deficiente en todos los elementos	Sin contaminar	Sin contaminar

## Conclusiones

Los resultados obtenidos mediante el uso de índice de calidad de aguas canadiense son dependientes del tipo y cantidad de variables utilizadas para su construcción. Así también los límites utilizados que varían según el uso, zona, región, país o conjunto de países.

El índice presentado en este proyecto, permite obtener una comparación entre dos o más cuerpos de agua de manera que cualquier persona, incluso sin conocimiento científico, comprenda y se familiarice con la estimación de la calidad de agua y lo aplique a conveniencia en otro problema de contaminación.

Bajo la normativa peruana, la subcuenca del río Llaucano presenta niveles excelentes y buenos de calidad de agua, disminuyendo sus índices luego de la confluencia con los ríos Arascorgue y Tingo-Maigasbamba.

El río Arascorgue se encuentra contaminado de inicio a fin, sobretodo aguas arriba luego de pasar las instalaciones de Mina Carolina.

El río Tingo-Maigasbamba por su parte, también se ve mayormente afectado en zonas de actividad minera y se extiende hasta su confluencia con el río Llaucano, sin embargo, presenta algunas mejoras en sus índices al recibir cauces de excelente calidad como el del río Pucpe.

Al comparar la normativa peruana con las restrictivas, los índices de calidad de agua disminuyeron 12 puntos en promedio, bajando en la mayoría de los puntos de categoría excelente a buena, marginal a pobre, entre otras.

Con respecto a la conductividad eléctrica del agua, se observó muy aumentada en zonas afectadas por actividad minera como canchas de relaves y pilas de lixiviación (1108-4080  $\mu\text{mhos/cm}$ ) y bastante baja en zonas no afectadas, como la subcuenca del río Llaucano (212-326  $\mu\text{mhos/cm}$ ).

Por otra parte, los índices de calidad de sedimento presentaron un comportamiento independiente de la calidad de agua.

Con respecto al factor de enriquecimiento, se concluye que la zona mayormente enriquecida por metales es el río Tingo-Maigasbamba en dos puntos. El primero es un arroyo proveniente de la Mina Carolina y sus niveles de van de moderado a extremadamente alto enriquecimiento por manganeso, antimonio, plomo, mercurio, plata, cadmio, zinc, níquel, arsénico, hierro, selenio y cobre. El segundo punto y más contaminado aún es el ubicado después de la estación de bombeo, que posee enriquecimiento desde moderado a extremadamente alto en todos los metales analizados.

La geoacumulación de metales en sedimentos de la cuenca del río Llaucano es principalmente por manganeso, antimonio y plata, incrementándose abruptamente en las cercanías a las instalaciones mineras.

Por último, el grado de contaminación corrobora lo mencionado destacando los mismos sectores con niveles de considerable contaminación.

En comparación, los metales con mayor presencia en el cuerpo de agua son aluminio, manganeso, hierro, cadmio, plomo y arsénico. En cambio en sedimentos, la mayor acumulación y enriquecimiento es de manganeso, antimonio y plata.

## Referencias

- Acosta, R., Ríos, B., i Sant, M. R., & Fornells, N. P. (2009). Propuesta de un protocolo de evaluación de la calidad ecológica de ríos andinos (CERA) y su aplicación a dos cuencas en Ecuador y Perú. *Limnetica*, 28(1), 35-64.
- Akbal, F., Gürel, L., Bahadır, T., Güler, İ., Bakan, G., & Büyükgüngör, H. (2011). Water and sediment quality assessment in the mid-Black Sea coast of Turkey using multivariate statistical techniques. *Environmental Earth Sciences*, 64(5), 1387-1395.
- Allieri, M. A. A., & Macías, C. G. (2007). Propuesta de un índice numérico para evaluar la calidad del sedimento influenciado por la industria petrolera. *Interciencia: Revista de ciencia y tecnología de América*, 32(7), 453-459.
- Barenys, M., Boix, N., Farran-Codina, A., Palma-Linares, I., Montserrat, R., Curto, A., ... & Llobet, J. M. (2014). Heavy metal and metalloids intake risk assessment in the diet of a rural population living near a gold mine in the Peruvian Andes (Cajamarca). *Food and Chemical Toxicology*, 71, 254-263.
- Behar, R., Zúñiga de Cardozo, M. D. C., & Rojas Ch, O. (2011). Análisis y valoración del índice de calidad de agua (ICA) de la NSF: casos ríos Cali y Meléndez. *Revista Ingeniería y Competitividad*, 1(1), 17-27.
- Borredon, R., Lafitte, M., & Maury, R. (1983). Composition des sphalérites du district minier de Hualgayoc (Pérou). *Mineralium Deposita*, 18(3), 437-442.
- Brady, J. P., Ayoko, G. A., Martens, W. N., & Goonetilleke, A. (2015). Development of a hybrid pollution index for heavy metals in marine and estuarine sediments. *Environmental monitoring and assessment*, 187(5), 1-14.
- Canchaya, S. (1990). Stratabound ore deposits of Hualgayoc, Cajamarca, Perú. In *Stratabound Ore Deposits in the Andes* (pp. 569-582). Springer Berlin Heidelberg.
- Castillo Gomero, G. (2003). Contaminación del agua, estudio de caso: el agua y la actividad minera en Cajamarca. In *Concertación: Instrumento para la Gestión Sostenible del Agua Dulce en el Siglo XXI* (pp. 1-9). COSUDE.

CONAMA (2015). Guía CONAMA para el establecimiento de las normas secundarias de calidad ambiental para aguas continentales superficiales y marinas. Consultado en Noviembre de 2015. Disponible en: [http://www.bcn.cl/carpeta\\_temas/temas\\_portada.2005-1227.4449440028/GuiaNormaPract.pdf](http://www.bcn.cl/carpeta_temas/temas_portada.2005-1227.4449440028/GuiaNormaPract.pdf).

Criado Sánchez, D. Y., & Herrera López, S. D. (2014). Gestión integral del recurso hídrico en los países de la Comunidad Andina. Consultado en Junio de 2015. Disponible en: [http://repository.ucatolica.edu.co/jspui/bitstream/10983/2088/1/GIRH\\_pa%C3%ADses\\_Comunidad\\_Andina.pdf](http://repository.ucatolica.edu.co/jspui/bitstream/10983/2088/1/GIRH_pa%C3%ADses_Comunidad_Andina.pdf).

Delgado, J., Nieto Liñán, J. M., & MEGASIG, E. (2007). Caracterización geoquímica de los sedimentos superficiales del Estuario del río Guadiana (SW de la Península Ibérica).

Devore, J. L. (2008). Probabilidad Y Estadística Para Ingeniería Y Ciencias/Probability And Statistics For Engineering And Sciences. Cengage Learning Editores.

Digesa (2011). Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano. Consultado en Octubre de 2015. Disponible en: [http://www.digesa.minsa.gob.pe/publicaciones/descargas/reglamento\\_calidad\\_agua.pdf](http://www.digesa.minsa.gob.pe/publicaciones/descargas/reglamento_calidad_agua.pdf)

Gałaszka, A., Migaszewski, Z. M., Dołęgowska, S., Michalik, A., & Duczmal-Czernikiewicz, A. Geochemical background of potentially toxic trace elements in soils of the historic copper mining area: a case study from Miedzianka Mt., Holy Cross Mountains, south-central Poland. *Environmental Earth Sciences*, 1-17.

Hejabi, A. T., Basavarajappa, H. T., Karbassi, A. R., & Monavari, S. M. (2011). Heavy metal pollution in water and sediments in the Kabini River, Karnataka, India. *Environmental monitoring and Assessment*, 182(1-4), 1-13.

Herrera, H. P. (2013). Los pasivos mineros ambientales y los conflictos sociales en Hualgayoc. *Investigaciones Sociales*, 17(30), 265-277.

Howe, P. D., & Dobson, S. (2002). Silver and silver compounds: environmental aspects. *Concise international chemical assessment document*. World Health Organization. Consultado en Noviembre de 2015. Disponible en: <http://www.inchem.org/documents/cicads/cicads/cicad44.htm#6.0>.

Khan, F., Husain, T., & Lumb, A. (2003). Water quality evaluation and trend analysis in selected watersheds of the Atlantic region of Canada. *Environmental Monitoring and assessment*, 88(1-3), 221-248.

Kochhann, D., Behr, E. R., de Chaves, A., Mesko, M. F., Dressler, V. L., Flores, E. M., & Baldisserotto, B. (2013). Environmental quality evaluation of the Vacacaí River, Rio Grande do Sul, Brazil. *Environmental earth sciences*, 70(4), 1727-1733.

López González, N., Borrego Flores, J., Carro Flores, B., & Lozano Soria, O. (2004). Factores de enriquecimiento metálico en sedimentos holocenos del estuario del río Tinto (SO de España).

Lozano Soria, O., Borrego Flores, J., López González, N., & Carro Flores, B. (2005). Características geoquímicas y factores de enriquecimiento (FE) de los Sedimentos Estuarinos de la Costa de Huelva (SW España).

Macfarlane, A. W., & Petersen, U. (1990). Pb isotopes of the Hualgayoc area, northern Peru; implications for metal provenance and genesis of a Cordilleran polymetallic mining district. *Economic Geology*, 85(7), 1303-1327.

Marinović, R. A., & Ruždjak, D. (2015). Evaluation of river water quality variations using multivariate statistical techniques: Sava River (Croatia): a case study. *Environmental monitoring and assessment*, 187(4), 4393-4393.

Matschullat, J., Ottenstein, R., & Reimann, C. (2000). Geochemical background—can we calculate it?. *Environmental Geology*, 39(9), 990-1000.

MINEM (Ministerio de Energía y Minas de Perú), Evaluación ambiental de la cuenca del río Llaucano. (Consulta, Noviembre 2015). Disponible en [http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/publicaciones/evats/llaucano/map\\_llaucano\\_i.htm](http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGAAM/publicaciones/evats/llaucano/map_llaucano_i.htm)

MINEM (2015). Perú: País minero. Consultado en Junio de 2015. Disponible en: [http://www.minem.gob.pe/\\_detalle.php?idSector=1&idTitular=159&idMenu=sub149&idCateg=159](http://www.minem.gob.pe/_detalle.php?idSector=1&idTitular=159&idMenu=sub149&idCateg=159).

Miranda, M., Aramburú, A., Junco, J., & Campos, M. (2010). Situación de la calidad de agua para consumo en hogares de niños menores de cinco años en Perú, 2007-2010. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 27(4), 506-511.

OMS (1993). Estándares europeos de la calidad del agua potable. Consultado en Noviembre de 2015. Disponible en: <http://www.lenntech.es/aplicaciones/potable/normas/estandares-europeos-calidad-agua-potable.htm#ixzz3vYZAIB2H>.

OMS (2011). *Guidelines for drinking-water quality: recommendations* (Vol. 1). World Health Organization. Consultado en Noviembre 2015. Disponible en: [http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/44584/1/9789241548151\\_eng.pdf](http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/44584/1/9789241548151_eng.pdf).

Phung, D., Huang, C., Rutherford, S., Dwirahmadi, F., Chu, C., Wang, X., & Dinh, T. A. D. (2015). Temporal and spatial assessment of river surface water quality using multivariate statistical techniques: a study in Can Tho City, a Mekong Delta area, Vietnam. *Environmental monitoring and assessment*, 187(5), 1-13.

Reimann, C., Filzmoser, P., & Garrett, R. G. (2005). Background and threshold: critical comparison of methods of determination. *Science of the Total Environment*, 346(1), 1-16.

Resongles, E., Casiot, C., Freydier, R., Dezileau, L., Viers, J., & Elbaz-Poulichet, F. (2014). Persisting impact of historical mining activity to metal (Pb, Zn, Cd, Tl, Hg) and metalloid (As, Sb) enrichment in sediments of the Gardon River, Southern France. *Science of the Total Environment*, 481, 509-521.

Sáez, J. Métodos estadísticos con R y R Commander. Consultado en Septiembre de 2015. Disponible en: <https://cran.r-project.org/doc/contrib/Saez-Castillo-RRCmdrv21.pdf>

Toja, J., Alcalá, E., Martín, G., Solá, C., Plans, M. & Prat, N. (2003). Evaluación del efecto del vertido tóxico sobre la calidad del agua y los sedimentos de los ríos Agrío y Guadiamar. *Ciencia y Restauración del río Guadiamar*, Consejería de Medio Ambiente, Sevilla, Spain, 78-92.

Torres, P., Cruz, C. H., & Patiño, P. J. (2009). Water quality index in surface sources used in water production for human consumption: A critical review. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(15), 79-94.

Tume, P., King, R., González, E., Bustamante, G., Reverter, F., Roca, N., & Bech, J. (2014). Trace element concentrations in schoolyard soils from the port city of Talcahuano, Chile. *Journal of Geochemical Exploration*, 147, 229-236.

Valdes-Basto, J., Samboni-Ruiz, N. E., & Carvajal-Escobar, Y. (2011). Desarrollo de un Indicador de la Calidad del Agua usando Estadística Aplicada, Caso de Estudio: Subcuenca Zanjón Oscuro. *Tecno Lógicas*, (26), 165-180.

Vásquez, M. S. G. C. GOBIERNO REGIONAL DE CAJAMARCA. Estudio de geología. Consultado en Noviembre de 2015. Disponible en: <http://zeeot.regioncajamarca.gob.pe/sites/default/files/GEOLOGIA.pdf>.

Vieira, J. S., Pires, J. C., Martins, F. G., Vilar, V. J., Boaventura, R. A., & Botelho, C. M. (2012). Surface water quality assessment of Lis river using multivariate statistical methods. *Water, Air, & Soil Pollution*, 223(9), 5549-5561.

WALSH PERÚ S.A. 2011 Estudio de impacto ambiental para la perforación exploratoria en el Lote z-35. Resumen ejecutivo. Consulta: 06 de Octubre de 2015.

Yan, J., Wang, L., Fu, P. P., & Yu, H. (2004). Photomutagenicity of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons from the US EPA priority pollutant list. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 557(1), 99-108.

Zhang, X., Wang, Q., Liu, Y., Wu, J., & Yu, M. (2011). Application of multivariate statistical techniques in the assessment of water quality in the Southwest New Territories and Kowloon, Hong Kong. *Environmental monitoring and assessment*, 173(1-4), 17-27.

# Anexo