



## **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

### **Instituto de Ciencias Químicas y Ambientales**

**“CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA E ISOTÓPICA DEL AGUA  
SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA EN EL ÁREA DE INFLUENCIA DEL RÍO  
SIETE Y DE LAS ACTIVIDADES MINERAS EN EL DISTRITO MINERO DE  
PONCE ENRÍQUEZ”**

#### **TESIS DE GRADO**

Previa a la obtención del Título de:

#### **INGENIERO QUÍMICO**

Presentada por:

**PRISCILA ESTEFANÍA VALVERDE ARMAS**

**BYRON ANDRÉS GALARZA ROMERO**

**GUAYAQUIL-ECUADOR**

**2012**

## **DEDICATORIA**

A mi mami Bequito, a mi mami Mónica y a mi papi Héctor por brindarme su amor, apoyo y confianza incondicional.

A la Dra. Paola Romero por guiarnos con cariño y paciencia.

Al Dr. Paúl Carrión por brindarnos su apoyo y sabios consejos.

Priscila Estefanía Valverde Armas

## **DEDICATORIA**

Dedico esta Tesis a Dios por darme la fuerza, y la fe de seguir adelante.

A mi papá que siempre me ha apoyado incondicionalmente en mis estudios académicos, y por ser mi ejemplo.

A mi mamá, mis hermanos, abuelos, tíos, primos, y mi sobrina que son el soporte de mi vida.

A mis amigos que a través de su amistad me brindaron su calidez de persona.

Al Dr. Paúl Carrión por haberme acogido en el CIPAT.

A la Dra. Paola Romero por guiarme  
en el camino profesional y personal.

Al Instituto de Ciencias Químicas y  
Ambientales por el soporte  
académico.

Byron Andrés Galarza Romero

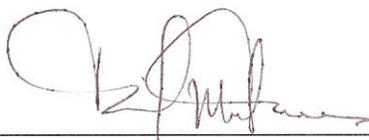
## **AGRADECIMIENTO**

Expresamos nuestro sincero agradecimiento a Dios, a nuestras familias, al Centro de Investigación Científica y Tecnológica CICYT, a la Facultad de Investigación y Postgrado, al Centro de Investigación y Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra CIPAT y al Instituto de Ciencias Químicas y Ambientales ICQA por su incondicional apoyo.

Byron Andrés Galarza Romero

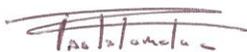
Priscila Estefanía Valverde Armas

## TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



---

**Ph.D. David Matamoros  
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**



---

**Ph.D. Paola Romero Crespo  
DIRECTORA DEL TRABAJO  
FINAL DE GRADUACIÓN**



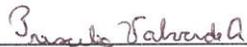
---

**M.Sc. Francisco Torres Andrade  
VOCAL PRINCIPAL DE  
SUSTENTACIÓN**

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, nos corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma, a la Escuela Superior Politécnica del Litoral”

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la ESPOL)



**Priscila Valverde Armas**



**Byron Galarza Romero**

## RESUMEN

La presente Tesis de Grado fue auspiciada por el Centro de Investigación Científica y Tecnológica dentro del marco de la I CONVOCATORIA 2011 A FONDOS CONCURSABLES PARA TESIS DE GRADO Y POSTGRADO, en cooperación técnica del Instituto de Ciencias Químicas y Ambientales y del Centro de Investigación y Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra que desarrollan los proyectos ECU/8/026: Caracterización de Acuíferos Costeros en la Península de Santa Elena y RLA/8/041: Application of Isotopic Tools for Integrated Management of Coastal Aquifers, auspiciados por el Organismo Internacional de Energía Atómica.

El área de estudio se encuentra ubicada en la provincia del Azuay dentro del distrito minero de Ponce Enríquez, donde el río Siete ha sido uno de los cuerpos de agua dulce afectado por las actividades mineras del sector, para realizar el presente estudio se tomaron un total de once muestras de agua superficial representativas del río Siete y sus principales afluentes como el río Margarita, quebradas La Florida y El Paraíso, río Nueve de Octubre, río Fermín y río Guanache, también se recolectaron cuatro muestras de drenaje de mina y cuatro muestras de agua subterránea (agua de pozo) para analizar

metales pesados (Arsénico, Cadmio, Cobre, Hierro, Mercurio, Plomo y Zinc), cianuro total, y otros parámetros físico-químicos que permiten caracterizar el agua (Calcio, Magnesio, Sodio, Bicarbonatos, Cloruros y Sulfatos). Por medio de los análisis realizados se determinó que la facie hidroquímica del río Siete es sulfatada-bicarbonatada cálcico-magnésica hasta el punto de agua Pe-3 y a partir del punto de agua Pe-5 la facie hidroquímica cambia a bicarbonatada-sulfatada cálcico-magnésica, además el río Siete presentó una cantidad de coliformes totales en el punto inicial de muestreo (Pe-2) de  $6,8 \times 10^7$  nmp/100 ml y aumenta a  $8,3 \times 10^7$  nmp/100 ml en su punto final de muestreo (Pe-8). De esta forma se identificaron dos fuentes principales de contaminación, la principal originada por el incremento de la actividad minera y la secundaria por la red de saneamiento deficiente del cantón de Ponce Enríquez y las descargas de aguas negras sin recibir tratamiento previo. El estudio sirve como una línea base para futuras investigaciones ya que es la primera vez que se caracteriza isotópicamente el agua de este sector, donde se ha determinado que el río Siete y sus afluentes presentan valores isotópicos similares, es decir ligeramente enriquecidos (desde -26,59‰ a -12,08‰ para el Deuterio y -2,82‰ a -4,17‰ para el Oxígeno-18).

## ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	II
AGRADECIMIENTO .....	V
TRIBUNAL DE GRADUACIÓN .....	VI
DECLARACIÓN EXPRESA.....	VII
RESUMEN .....	VIII
ÍNDICE GENERAL .....	X
ABREVIATURAS .....	XIII
SIMBOLOGÍA.....	XIV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XVI
ÍNDICE DE TABLAS .....	XXII
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Preámbulo.....	2
1.2. Planteamiento del Problema.....	5
1.3 Hipótesis .....	7

1.4 Objetivos .....	7
1.4.1 Objetivo General .....	7
1.4.2 Objetivos Específicos .....	8
1.5 Investigaciones previas .....	8
1.6 Metodología de estudio .....	9
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>15</b>
<b>DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....</b>	<b>15</b>
2.1 Marco geográfico .....	16
2.2 Marco socioeconómico .....	21
2.3 Climatología .....	25
2.4 Geología .....	30
2.5 Hidrología .....	33
2.5.1 Hidrología superficial.....	33
2.5.2 Hidrología subterránea .....	37
<b>CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>39</b>
<b>INFORMACIÓN EXPERIMENTAL.....</b>	<b>39</b>
3.1 Campañas de muestreo .....	40
3.2 Muestreo de agua superficial e isotópico .....	44
3.3 Muestreo de agua subterránea y de drenaje de mina.....	46
<b>CAPÍTULO 4 .....</b>	<b>50</b>
<b>CARACTERIZACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO.....</b>	<b>50</b>

4.1 Interpretación de datos .....	51
4.1.1 Evaluación físico-química .....	52
4.1.1.1 Interpretación físico-química.....	56
4.1.2 Evaluación microbiológica .....	111
4.1.3 Evaluación isotópica.....	116
4.1.3.1 Interpretación Isotópica .....	121
4.2 Identificación de fuentes contaminantes .....	124
4.3 Análisis de los resultados .....	129
<b>CAPÍTULO 5 .....</b>	<b>134</b>
<b>DIAGNÓSTICO DE EFLUENTES MINEROS .....</b>	<b>134</b>
5.1 Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos .....	135
5.2 Medidas de Prevención y Control .....	143
5.3 Casos de Estudio.....	145
<b>CAPÍTULO 6 .....</b>	<b>151</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>151</b>
CONCLUSIONES.....	152
RECOMENDACIONES .....	159
ANEXOS	
BIBLIOGRAFÍA	
BIBLIOGRAFÍA DE CONSULTA	

## **ABREVIATURAS**

C.E	Conductividad Eléctrica
DBO <sub>5</sub>	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
EPA	Environmental Protection Agency
GEMS	Global Environment Monitoring System
LAAA	Laboratorio de Análisis Agrícola y Afines
LMP	Límite Máximo Permisible
OEА	Organismo de Acreditación Ecuatoriano
OEIA	Organismo Internacional de Energía Atómica
NTE	Norma Técnica Ecuatoriana
PEAD	Polietileno de alta densidad
pH	Potencial de Hidrógeno
PSI	Productos y Servicios Industriales
SM	Standard Methods
SOMILOR	Sociedad Minera Liga de Oro S.A
STD	Sólidos Totales Disueltos
T	Temperatura
TULAS	Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria

## SIMBOLOGÍA

°C	Grados centígrados
Ca <sup>+2</sup>	Ión calcio
CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de calcio
Cl <sup>-1</sup>	Ión cloruro
HCN	Ácido cianhídrico
HCO <sub>3</sub> <sup>-1</sup>	Ión bicarbonato
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Ácido sulfúrico
K <sup>+1</sup>	Ión potasio
Km.	Kilómetros
m	Metros
mm	Milímetros
m <sup>3</sup> /s	Metros cúbicos por segundo
mg/l	Miligramos por litro
meq/l	Miliequivalente por litro
m.s.n.m.	Metros sobre el nivel del mar
nmp/100 ml	Número más probable por cien mililitros
NaCN	Cianuro de sodio
NaOH	Hidróxido de sodio

$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$	Metabisulfito de sodio
$\text{NO}_3^{-1}$	ión nitrato
pH	Potencial de hidrógeno
$\text{SO}_4^{-2}$	ión sulfato
$\mu\text{g/l}$	Microgramos por litro
$\mu\text{s/cm}$	Microsiemens por centímetro
$\delta^2\text{H}$	Contenido isotópico de Deuterio (‰)
$\delta^{18}\text{O}$	Contenido isotópico de Oxígeno-18 (‰)

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> Pequeña minería ubicada en el sector de La López. ....	4
<b>Figura 1.2</b> Efluentes cercanos al sector de La López. ....	5
<b>Figura 1.3</b> Metodología de estudio empleada durante la realización de la tesis de grado.....	14
<b>Figura 2.1</b> Mapa de Ubicación general del área de estudio de Ponce Enríquez.....	18
<b>Figura 2.2</b> Mapa topográfico del área de estudio.....	19
<b>Figura 2.3</b> Mapa de las principales comunidades del área de estudio.....	20
<b>Figura 2.4</b> Actividad agrícola en Ponce Enríquez. ....	22
<b>Figura 2.5</b> Distribución porcentual del tipo de Minería que se realiza en el sector de Ponce Enríquez.....	24
<b>Figura 2.6</b> Distribución porcentual de cargos ocupados por el personal dentro de una sociedad minera en Camilo Ponce Enríquez. ....	25
<b>Figura 2.7</b> Precipitación promedio mensual en el sector de Ponce Enríquez (período 1975-2009). ....	26
<b>Figura 2.8</b> Temperatura media promedio mensual en el sector de Ponce Enríquez (periodo 1982-2009). ....	27

<b>Figura 2.9</b> Humedad Relativa mensual promedio en el sector de Ponce Enríquez (período 1982- 2009). .....	28
<b>Figura 2.10</b> Evaporación potencial mensual promedio en el área de Ponce Enríquez (período 1985-2009). .....	29
<b>Figura 2.11</b> Mapa Geológico del área de estudio de Ponce Enríquez. ....	32
<b>Figura 2.12</b> Promedio mensual por año de nivel, (período 1975 al 2010). ....	34
<b>Figura 2.13</b> Promedio anual de niveles (período 1975-2010). .....	34
<b>Figura 2.14</b> Mapa Hidrológico del área de estudio, sector de Ponce Enríquez. ....	35
<b>Figura 2.15</b> Promedio anual del caudal, en el área de Ponce Enríquez, (período 2003-2009). .....	36
<b>Figura 2.16</b> Promedio mensual por año del caudal, en el área de Ponce Enríquez, (período 2003-2009). .....	37
<b>Figura 3.1</b> Campañas de muestreo en agua superficial del río Siete .....	42
<b>Figura 3.2</b> Muestreo superficial en el río Margarita .....	46
<b>Figura 3.3</b> Muestreo de agua de drenaje subterránea dentro de una mina artesanal. ....	47
<b>Figura 3.4</b> Ficha de campo utilizada para registrar datos de parámetros medidos in situ. ....	48
<b>Figura 3.5</b> Mapa de muestreo de agua superficial, de drenaje de mina y agua subterránea (agua de pozos) y zonas de influencia. ....	49

<b>Figura 4.1</b> Variación de pH en el agua superficial de los puntos de muestreo del río Siete y sus afluentes.....	56
<b>Figura 4.2</b> Variación temporal de pH en los cuerpos de agua superficial del área de estudio (período 2002-2011).....	58
<b>Figura 4.3</b> Variación temporal de Conductividad Eléctrica, Sulfatos, Dureza y Alcalinidad en el río Guanache (período 2002-2011).....	67
<b>Figura 4.4</b> Variación temporal de Conductividad Eléctrica, Sulfatos, Dureza y Alcalinidad en el río Fermín, (período 2002-2011). ....	69
<b>Figura 4.5</b> Variación espacial de parámetros entre el agua de la quebrada La Florida (Pe-1) y el inicio del río Siete (Pe-2). ....	72
<b>Figura 4.6</b> Valores de pH en el agua de drenaje de mina. ....	75
<b>Figura 4.7</b> Valores de Conductividad Eléctrica y Sólidos Totales Disueltos del agua de drenaje de mina. ....	76
<b>Figura 4.8</b> Concentración de Calcio y Magnesio en el agua de drenaje de mina en el sector La López y San Francisco de Muyuyacu. ....	77
<b>Figura 4.9</b> Valores de pH en los pozos de agua subterránea muestreados en el sector de La Independencia. ....	78
<b>Figura 4.10</b> Diagrama de Piper de agua superficial, de drenaje de mina y agua subterránea (pozos), en el sector de Ponce Enríquez. ....	80
<b>Figura 4.11</b> Diagrama de Stiff de los puntos de agua subterránea de pozo Ps-a, Ps-b, Ps-c, Ps-d.....	81

<b>Figura 4.12</b> Mapa hidroquímico del agua superficial, drenaje de mina y agua subterránea..	84
<b>Figura 4.13</b> Concentración de Arsénico en el río Siete (período 1996-2008).	94
<b>Figura 4.14</b> Concentración de Arsénico en los afluentes del río Siete (período 1996-2002).	94
<b>Figura 4.15</b> Concentración de Cobre en el río Siete (período 1996-2008)...	97
<b>Figura 4.16</b> Concentración de Cobre en los afluentes del río Siete (período 1996- 2002).	98
<b>Figura 4.17</b> Concentración de Cadmio en el río Siete (período 1996-2002).	101
<b>Figura 4.18</b> Concentración de Cadmio en los afluentes del río Siete (período 1996- 2002).	102
<b>Figura 4.19</b> Concentración de Plomo en el río (período 1996- 2002).	102
<b>Figura 4.20</b> Concentración de Plomo en los afluentes del río Siete (período 1996-2002).	103
<b>Figura 4.21</b> Relación entre el HCN con el $\text{CN}^-$ y con el pH.	107
<b>Figura 4.22</b> Concentración de Hierro en el agua superficial del río Siete y sus afluentes.	109
<b>Figura 4.23</b> Concentración de Hierro en el agua de drenaje de mina de infiltración en el sector de Ponce Enríquez.	110

<b>Figura 4.24</b> Concentración de Coliformes Fecales del agua superficial del río Siete (Pe-2, Pe-8) y del río Fermín (Pe-10). .....	113
<b>Figura 4.25</b> Concentración de Coliformes Totales del agua superficial del río Siete (Pe-2, Pe-8) y en el río Fermín (Pe-10). .....	114
<b>Figura 4.26</b> Concentración de Coliformes Fecales en el agua de drenaje de mina de infiltración. ....	115
<b>Figura 4.27</b> Concentración de Coliformes Totales en el agua de drenaje de mina de infiltración. ....	115
<b>Figura 4.28</b> Resultados de Oxígeno 18 vs. Deuterio, Línea Meteórica Mundial. ....	120
<b>Figura 5.1</b> Distribución porcentual de pequeña minería y minería artesanal que realizan sus actividades cumpliendo con la Ley de Minería. ....	136
<b>Figura 5.2</b> Distribución porcentual de mineros que reutilizan el agua en Ponce Enríquez. ....	137
<b>Figura 5.3</b> Distribución porcentual de pequeña minería que realiza tratamiento al agua en Ponce Enríquez. ....	138
<b>Figura 5.4</b> Distribución porcentual de minería artesanal que realiza tratamiento al agua en Ponce Enríquez. ....	138
<b>Figura 5.5</b> Distribución porcentual de los métodos de tratamiento de agua empleados por la Pequeña Minería, en el Sector de Ponce Enríquez. ....	139

<b>Figura 5.6</b> Distribución porcentual de los métodos de tratamiento de agua empleados por la Minería Artesanal, en el Sector de Ponce Enríquez. ....	139
<b>Figura 5.7</b> Relavera situada en el sector de La López, la cual tiene protección arcillosa para almacenar colas mineras. ....	143
<b>Figura 5.8</b> Humedal artificial que utiliza un sistema de flujo bajo la super para la remoción de trazas de contaminantes .....	147
<b>Figura 5.9</b> Diagrama del proceso de tratamiento del agua residual utilizado por la empresa ORENAS S.A. ....	150

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla I.</b> Hipótesis del estudio, variables e indicadores.....	7
<b>Tabla II.</b> Lugares de muestreo de agua superficial, agua subterránea de drenaje de mina y agua subterránea (agua de pozos), codificación y coordenadas.....	43
<b>Tabla III.</b> Requisitos para realización de análisis de agua en el laboratorio LAB-PSI. ....	45
<b>Tabla IV.</b> Métodos empleados para la realización de ensayos químicos en agua superficial, drenaje de mina y agua de pozo empleados en el Laboratorio de Análisis Agrícola y Afines. ....	53
<b>Tabla V.</b> Métodos Estándares empleados para la realización de ensayos químicos y microbiológicos en agua superficial, drenaje de mina y agua de pozo por el LAB-PSI.....	53
<b>Tabla VI.</b> Resultados de análisis físico-químico y microbiológico realizados por los laboratorios PSI y LAAA, en agua superficial, de drenaje de mina. ...	54
<b>Tabla VII.</b> Resultados de análisis físico-químicos y microbiológicos realizados por los laboratorios PSI y LAAA, en agua de drenaje de mina y agua de pozo. ....	55

<b>Tabla VIII.</b> Variación Temporal del pH del agua superficial del río Siete y sus afluentes (período 2002-2011).....	68
<b>Tabla IX.</b> Concentración de metales pesados en el agua superficial y de drenaje de mina para los puntos analizados en el sector de estudio de Ponce Enríquez.....	86
<b>Tabla X.</b> Concentración de toxicidad crónica de Sulfatos de acuerdo a la Dureza del agua. ....	90
<b>Tabla XI.</b> Límites Máximos de Concentración de metales pesados para la protección de la vida acuática en sistemas de agua dulce de acuerdo a la dureza del agua. ....	92
<b>Tabla XII.</b> Concentración de metales pesados en el período 2008-2009 en el río Siete (Pe-5) a la altura de San Miguel de Brazil, sector de Ponce Enríquez.....	105
<b>Tabla XIII.</b> Resultados de valores isotópicos Oxígeno-18 y Deuterio. ....	119

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUCCIÓN**

## 1.1 Preámbulo

La explotación minera ha sido desde la década de 1980 el principal sustento de los habitantes del distrito de Ponce Enríquez, la cual ha dejado secuelas en el aspecto ambiental debido a las explotaciones mineras que tuvieron limitaciones en el aspecto técnico, en las medidas de seguridad y más importante aún la protección al medio ambiente, estos tres criterios actualmente resultan indispensables para un manejo sustentable de los recursos naturales no renovables como la minería, y de recursos naturales, en especial la del recurso hídrico, las actividades conllevaron a la contaminación de ríos y suelos debido a que los desechos de la actividades de las plantas de beneficio eran descargadas directamente en quebradas y ríos sin ningún tipo de medida de control.

El agua en este sector constituye el principal recurso para su desarrollo, principalmente para el riego en la agricultura y para el consumo humano. Las principales fuentes de abastecimiento de agua superficial y subterránea en el sector de Ponce Enríquez son seis cuencas hidrográficas con descarga directa al mar, comprende la de los ríos Balao Grande, Gala, Tenguel, Siete, Pagua y Bonito [1]. Mientras el agua de drenaje subterránea se origina en los acuíferos por fisuración de lavas andesíticas de la Formación Macuchi del Cretácico.

La problemática en la gestión del recurso hídrico va más allá de un problema de contaminación asociado exclusivamente por el sector minero, existen además otros problemas iguales o relevantes como la falta de un plan de manejo de los desechos domésticos (diseño de depósitos, clasificación de la basura y reciclaje), manejo de aguas servidas (sistema de alcantarillado, diseño de reservorios ), además del poco suministro de agua potable a través de un tratamiento idóneo para el consumo humano, estos parámetros conforman un punto inflexible en la gestión integral del agua.

Algunos problemas en el distrito minero se presentan con la turbidez y la contaminación de las aguas superficiales debido al vertido en ríos y quebradas de agua proveniente de plantas de trituración y tratamiento (procesos de cianuración y amalgamación), así como los problemas de contaminación que provocan las obras de almacenamiento del mineral, como las presas de relaves y escombros, como se ilustra en la Figura 1.1.

Los mayores problemas de contaminación se presentan en los ríos: Siete, Guanache y Gala; así como las quebradas: Manantial, La Florida y Jabón, debido a las descargas de la minería en los ríos [1].



**Figura 1.1** Pequeña minería ubicada en el sector de La López.  
**Fuente:** Galarza, B., Valverde, P., 2011.

Los efluentes de aguas ácidas son un problema común de contaminación ambiental en el mundo entero, el drenaje ácido de roca se produce por la meteorización y lixiviación natural de las rocas que contienen sulfuros. Afortunadamente la formación de drenaje ácido de roca no es uno de los principales problemas de las áreas mineras en el sur del Ecuador [1]. En la Figura 1.2 se muestra un efluente cercano al sector de La López con un color característico de la formación de drenaje ácido de roca.



**Figura 1.2** Efluentes cercanos al sector de La López.

**Fuente:** Galarza, B., Valverde, P., 2011.

Es escasa la información actualizada del área de influencia en el río Siete, por lo cual la generación de información sobre el estado actual ambiental del río Siete, ayuda a interpretar su evolución a través del tiempo y así establecer la influencia del sector minero en los cuerpos de agua del sector de estudio.

## **1.2. Planteamiento del Problema**

A pesar de algunas mejoras en los últimos años, la minería en el Ecuador está dominada por las operaciones artesanales y semi-mecanizadas, con poca supervisión gubernamental. Desde el punto de vista ambiental, la situación es insatisfactoria ya que en las operaciones hay limitada preocupación por proteger la naturaleza, como ejemplo, los residuos de las actividades de las plantas mineras, suelen desbordar las estructuras

que los contienen, o con frecuencia son descargados directamente en los ríos o son dispuestos sobre el suelo sin ninguna medida especial de control. La contaminación resultante constituye un riesgo potencial para los propios mineros, los habitantes locales y demás actividades productivas de la región, como la agricultura y los criaderos de camarones.

En el año 1998 el estudio Proyecto de Desarrollo Minero y Control Ambiental informó que anualmente son descargadas 10,000 toneladas de colas, el principal metal/metaloide es el Arsénico y las concentraciones de Cobre, Cadmio y Plomo también son elevadas. Así, el río transportaba 10 kilogramos de Mercurio prácticamente en partículas en suspensión y hay indicios de que el cianuro era la principal causa de erradicación de la fauna del río Siete. Como consecuencia de prácticas inadecuadas respecto al control de las colas el río mencionado y algunos de sus tributarios están densamente contaminados por las descargas mineras, a tal punto que toda la macro fauna ha sido erradicada. En el estuario, donde la vida reaparece, muchos de los organismos estudiados contienen en principio arsénico y también mercurio [1].

El problema de la contaminación afecta directamente a la población en general en cuanto a salud y productividad. Por lo cual es necesario

actualizar la situación del río Siete y sus cuerpos de agua tributarios, ¿cuál es la influencia actual de la minería en la composición natural del río Siete y demás cuerpos de agua de la zona de estudio?.

### 1.3 Hipótesis

En la tabla I se muestra la hipótesis del trabajo de investigación, variable dependiente e independiente y sus indicadores.

**Tabla I.** Hipótesis del estudio, variables e indicadores.

<b>HIPOTESIS</b>	<b>VARIABLES</b>	<b>INDICADORES</b>
La minería es la principal fuente de contaminación del río Siete por las descargas de los efluentes mineros.	<b>X:</b> Composición física, química, microbiológica e isotópica del agua superficial, agua de drenaje de mina y agua subterránea.	<b>X<sub>1</sub>:</b> Contenido físico, químico y microbiológico. <b>X<sub>2</sub>:</b> Contenido isotópico de Oxígeno-18 y Deuterio.
	<b>Y:</b> Contaminación del agua del río Siete.	<b>Y<sub>1</sub>:</b> Límites Máximos Permisibles establecidos en el Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria, Libro VI, Anexo 1, Tabla 3.

### 1.4 Objetivos

#### 1.4.1 Objetivo General

Caracterizar la composición química e isotópica del agua superficial, de drenaje de mina y subterránea para determinar la

influencia de las actividades mineras en el río Siete y demás cuerpos de agua de la zona de estudio.

#### **1.4.2 Objetivos Específicos**

1. Caracterizar la composición química e isotópica de los recursos hídricos de la zona de estudio.
2. Identificar las principales fuentes de contaminación del río Siete.
3. Identificar y exponer las medidas de control, prevención y gestión del agua que realiza el sector minero de Ponce Enríquez.

#### **1.5 Investigaciones previas**

Existen algunas investigaciones que muestran resultados de estudios realizados en Ponce Enríquez, de los cuales los más relevantes son:

**Swedish Environmental Systems (1998)**, a través del Ministerio de Energía y Minas se realizó un estudio que abarcó el monitoreo ambiental de las áreas mineras en el sur del Ecuador, entre ellas el área de Ponce Enríquez, implicó el monitoreo y la evaluación de la contaminación y el impacto relacionado con las actividades mineras en el Sur del Ecuador entre 1996 y 1998. Los principales medios investigados fueron el agua de ríos y estuarios, los sedimentos de río y la fauna acuática, determinando

que la contaminación por Arsénico, Mercurio Cobre, Cianuro y Plomo era muy elevada, la contaminación por Cadmio como elevada y baja a moderada la contaminación por Zinc en la cuenca del río Siete [1].

**Ministerio de Energía y Minas (2002)**, en colaboración con el Ministerio de Ambiente y de la Dirección Regional Minera de El Oro se llevó a cabo un estudio que permite examinar y a la vez controlar la explotación minera en las cuencas de los ríos Santa Rosa, Caluguro, Tenguel y Siete, en el cual se evidenció una disminución en las concentraciones de los metales pesados en el agua [2].

**PROMAS-Universidad de Cuenca (2009)**, en colaboración con el SENPLADES se realizó un estudio para la evaluación de los recursos hídricos de las subcuencas de los ríos San Francisco, Vivar, Jagua, Balao, Gala, Tenguel y Siete, en el marco de la realización del Inventario de Recursos Hídricos del Azuay (IRHA) de cuya Secretaría Técnica es miembro el Centro de Reconversión Económica de Azuay (CREA), a fin de contar con información sobre el estado de los recursos hídricos mediante un inventario, lo cual resulta importante para la construcción de políticas provinciales ambientales y de agua [3].

## **1.6 Metodología de estudio**

Para alcanzar los objetivos específicos antes mencionados, se llevaron a cabo las siguientes fases durante el desarrollo de la tesis:

**FASE I: *Recopilación de Información y toma de datos.***- Se compiló información bibliográfica de tesis de grado previas, artículos científicos de revistas y de investigaciones relacionadas con estudios de carácter ambiental. Las principales fuentes de información fueron dos estudios realizados por el Ministerio de Energía y Minas (años 1998 y 2002), conocido actualmente como el Ministerio de Recursos Naturales No Renovables y un estudio realizado por la Muy Ilustre Municipalidad de Guayaquil (años 2008 y 2009); el estudio publicado en el año 1998 se llama Proyecto de Asistencia Técnica para el Desarrollo Minero y Control Ambiental (PRODEMINCA) y el estudio del año 2002 se llama Examen Especial al Control de Explotación Minera en las cuencas de los ríos Santa Rosa, Caluguro, Tenguel y Siete. El informe publicado en el año 2009 por el Municipio de Guayaquil se llama Plan de monitoreo de la calidad de los ríos Gala, Chico, Tenguel y Siete, aguas de pozo, suelos, sedimentos y algunos productos agrícolas en la parroquia Tenguel. De la misma forma se obtuvieron datos valiosos del sector de Ponce Enríquez del Informe llamado Evaluación Social-Técnica de los recursos hídricos de las subcuencas de los ríos Jagua, Balao, Gala, Tenguel y Siete en la provincia del Azuay presentado por la Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo (SENPLADES) en el año 2009.

La información meteorológica e hidrológica fue proporcionada por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), mientras que el

mapa topográfico y geológico (escala 1:100000) del sector de Ponce Enríquez fue facilitado por el Instituto Geográfico Militar (IGM).

La información recopilada fue integrada en una base de datos de ArcGis versión 9.3, para ubicar los lugares de muestreo estratégicos y conocer integralmente la situación actual de la cuenca hidrográfica del río Siete.

Se realizó una visita previa a la zona de estudio con la presencia de estudiantes de Ingeniería de Minas e Ingeniería Química para conocer con más detalle el proceso desarrollado en cada una de las etapas de la minería. Se realizaron tres salidas de campo, en la primera campaña realizada durante el mes de diciembre (época seca) se tomaron once muestras de agua superficial, en la segunda campaña de muestreo en el mes de enero (época lluviosa) se tomaron cuatro muestras de drenaje de mina y en la última campaña (época lluviosa) se tomaron cuatro muestras de agua de pozo, el procedimiento para el muestreo superficial, subterráneo y de drenaje de mina fue siguiendo los lineamientos del Manual de Usuario de Muestreo del Centro de Investigación y Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra (CIPAT) [4], y las recomendaciones del laboratorio Productos y Servicios Industrial (PSI), donde se realizaron los análisis de agua, este laboratorio se encuentra certificado por el Organismo Ecuatoriano de Acreditación, los análisis de iones mayoritarios se efectuaron en el Laboratorio de Análisis Agrícola y Afines

que obtuvo resultados satisfactorios en la evaluación realizada por la institución GEMS de las Naciones Unidas (ver Anexo A).

**FASE II: *Interpretación, resultados y recomendaciones.***- A partir de los resultados de los análisis físico-químicos se realizaron los diagramas hidroquímicos, como el diagrama de Piper para visualizar e identificar los grupos de agua de la zona de estudio, además se elaboraron los diagramas de Stiff integrándolos en un mapa hidroquímico, en el cual puede analizar e interpretar la composición química que tiene el río Siete y sus principales afluentes.

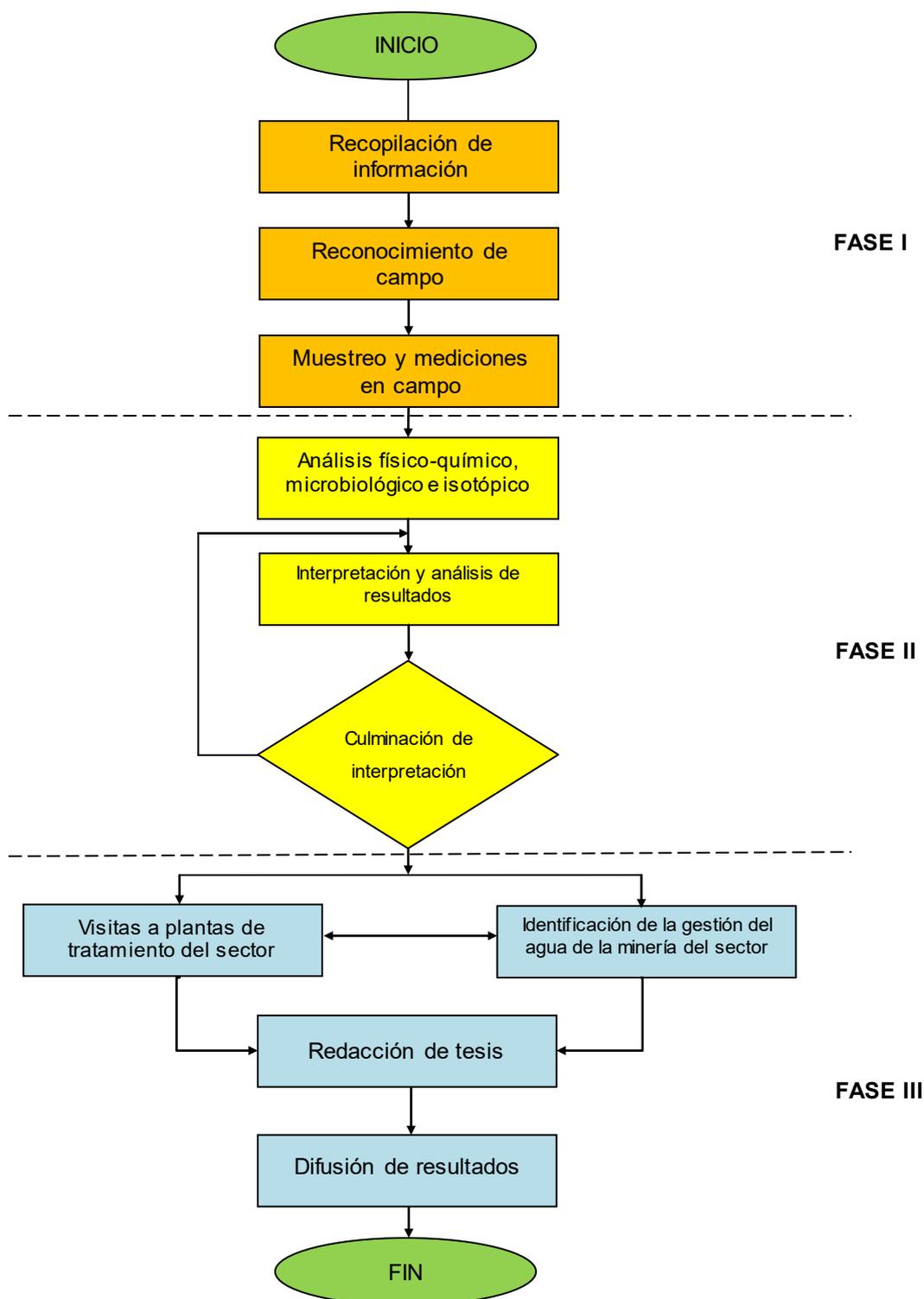
En el laboratorio del Instituto de Ciencias Químicas Ambientales (ICQA), se realizaron los análisis isotópicos de Oxígeno-18 y Deuterio de todas las muestras de agua, los resultados de abundancia de los isótopos ambientales fueron procesados e interpretados por medio de la hoja electrónica proporcionada por el OIEA, además se estableció el tipo de agua del sector, de acuerdo a su contenido isotópico.

Las concentraciones de metales pesados de los informes de 1998, 2002 y 2008 así como los resultados del análisis bacteriológico (del presente estudio) se presentan en diagramas de barras para observar la variación que existe.

**FASE III: *Identificación de la gestión del agua que realiza la minería del sector de estudio.***- El Instituto Nacional de Investigación Geológica

Minero Metalúrgico (INIGEMM) a través de la Universidad de Cuenca proporcionó una base de datos llamada Diagnóstico de la Pequeña Minería y Minería Artesanal en la provincia de Azuay, realizado en el mes de diciembre del 2011; el cual se encuentra en su fase de diagnóstico, por medio de la cual se conoce la situación actual de la gestión de los efluentes mineros y del uso que se le da al agua en minería en el sector de Ponce Enríquez, y los métodos de tratamiento químico que utilizan para tratar el agua. Además se realizaron dos visitas técnicas a la empresa minera ORENAS S.A. y a la empresa SOMILOR (Sociedad Minera Liga de Oro S.A.) del sector de Ponce Enríquez sector La López, empresas que tienen adelantos tecnológicos en todas las fases del desarrollo de la minería y tratamiento de aguas, los métodos de tratamiento de agua que ambas empresas emplean fueron incluidos en como casos de estudio.

En esta fase de la tesis se integró información bibliográfica sobre la eficiencia que tienen los métodos de tratamiento químico y la exposición de resultados de la gestión de los recursos hídricos que realiza actualmente la pequeña minería y la minería artesanal del distrito minero de Ponce Enríquez.



**Figura 1.3** Metodología de estudio empleada durante la realización de la tesis de grado.

**Fuente:** Galarza, B., Valverde, P., 2011.

## **CAPÍTULO 2**

### **DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**

## 2.1 Marco geográfico

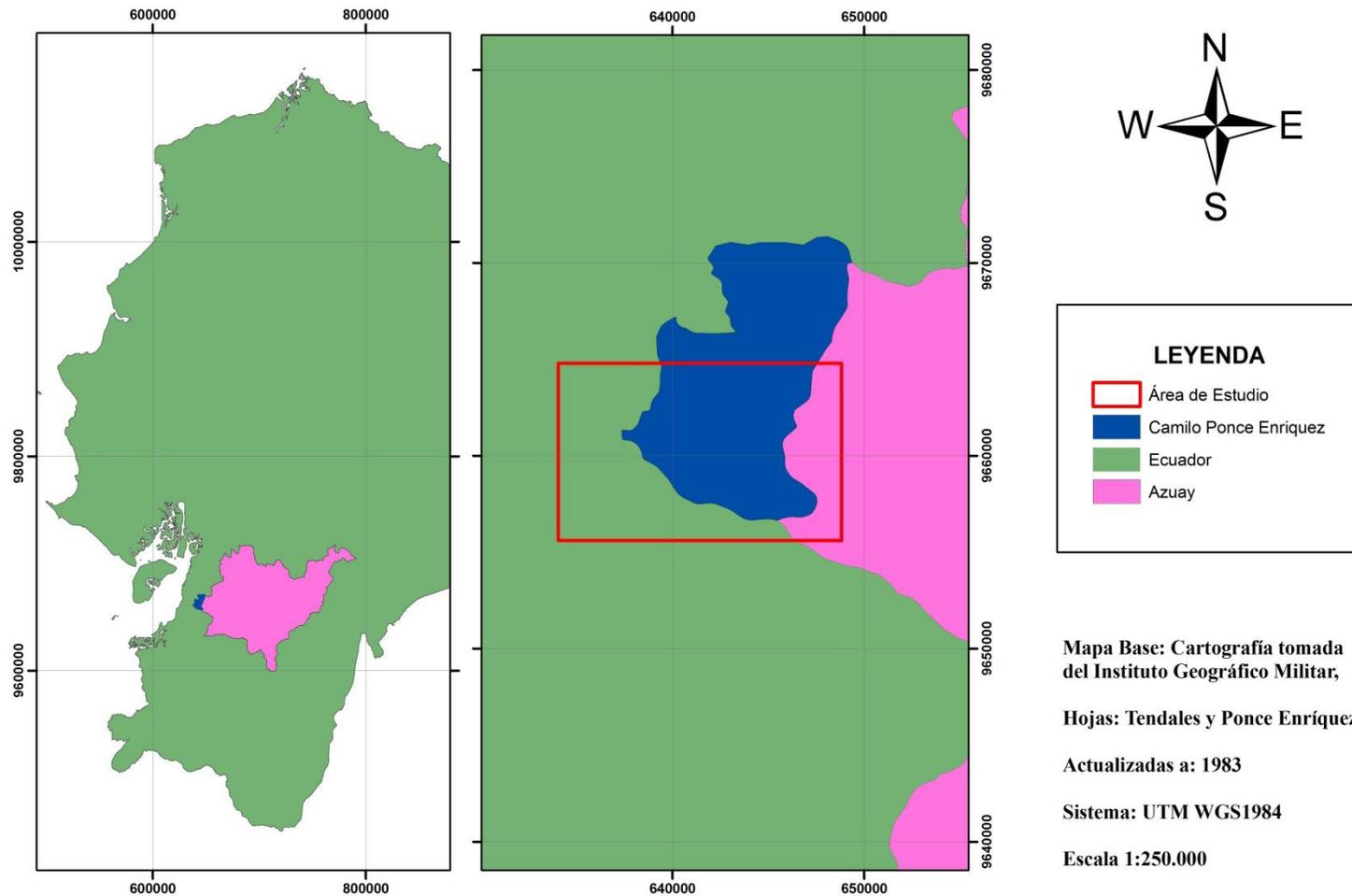
El área de estudio contempla al río Siete como principal centro de análisis, el cual se sitúa en el cantón Camilo Ponce Enríquez que está ubicado en la provincia del Azuay, la cual se encuentra al suroeste del país, el río Siete se posiciona entre los ríos Tenguel y Pagua, y se origina en la ladera del cerro La Rica Ensellada, hacia el Este. Limita al Norte con el río Tenguel, al Sur con el río Pagua, al Este limita con el río Nueve de Octubre, y al Oeste desemboca en el canal de Jambelí [1].

El cantón Camilo Ponce Enríquez limita al Norte con el cantón de Balao, al Sur con la parroquia Tendales perteneciente a El Guabo, al Este con el cantón Pucará, y al Oeste con la parroquia Tenguel. En la Figura 2.1 se encuentra el mapa ubicación general del área de estudio y en la Figura 2.2 se encuentra el mapa topográfico del área de estudio [3].

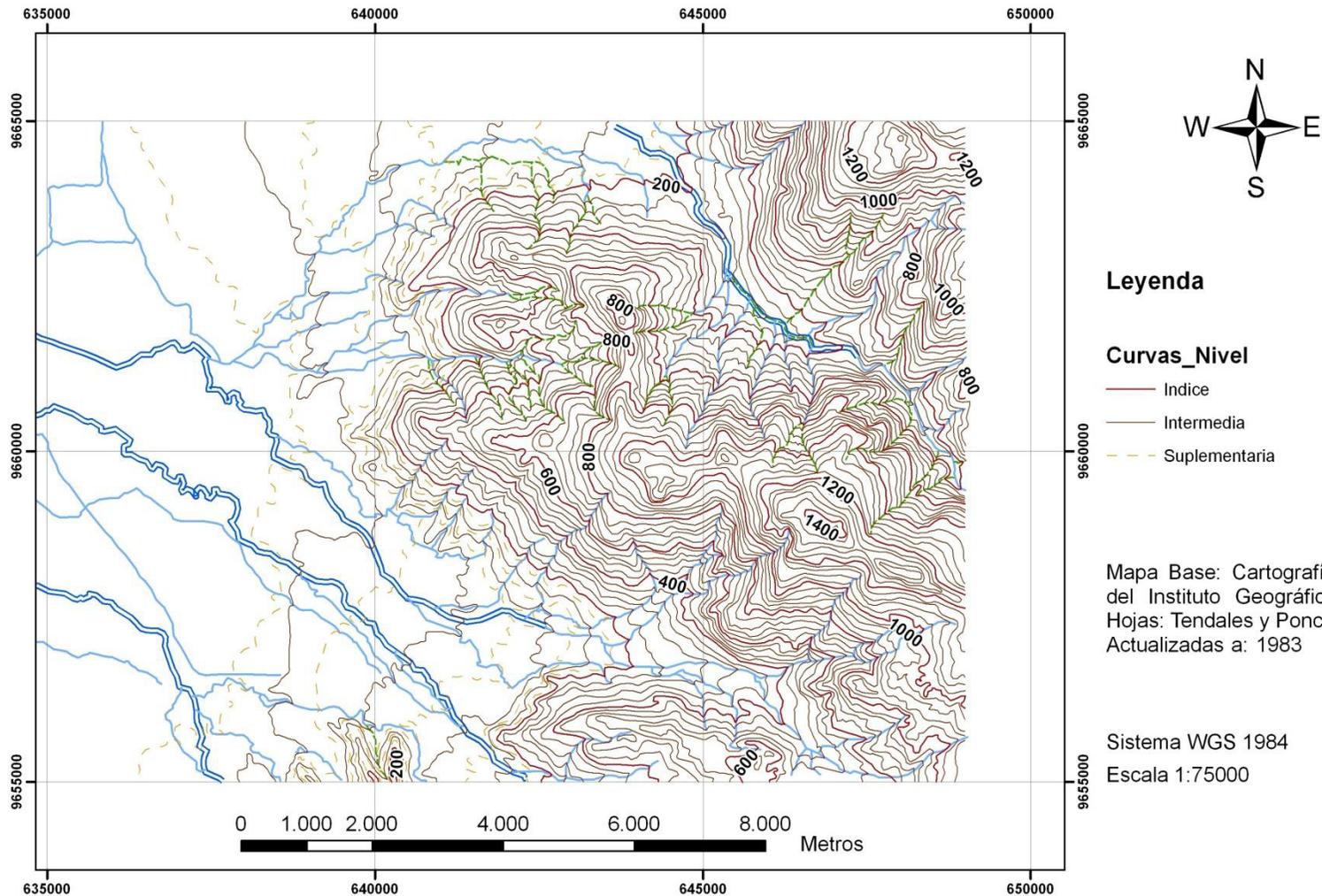
El distrito minero de Ponce Enríquez presenta características montañosas de pendientes pronunciadas, alturas que sobrepasan los 1100 m.s.n.m. Haciendo referencia a la orografía del sitio se encuentra rodeado por un lado de altas montañas y por otro lado con planicies extendidas hasta llegar al Océano Pacífico [3].

Dentro de los límites considerados por el Municipio de Camilo Ponce Enríquez se han establecido 47 comunidades ubicadas en tres zonas agro-ecológicas diferenciadas mediante la altitud de la geografía. La

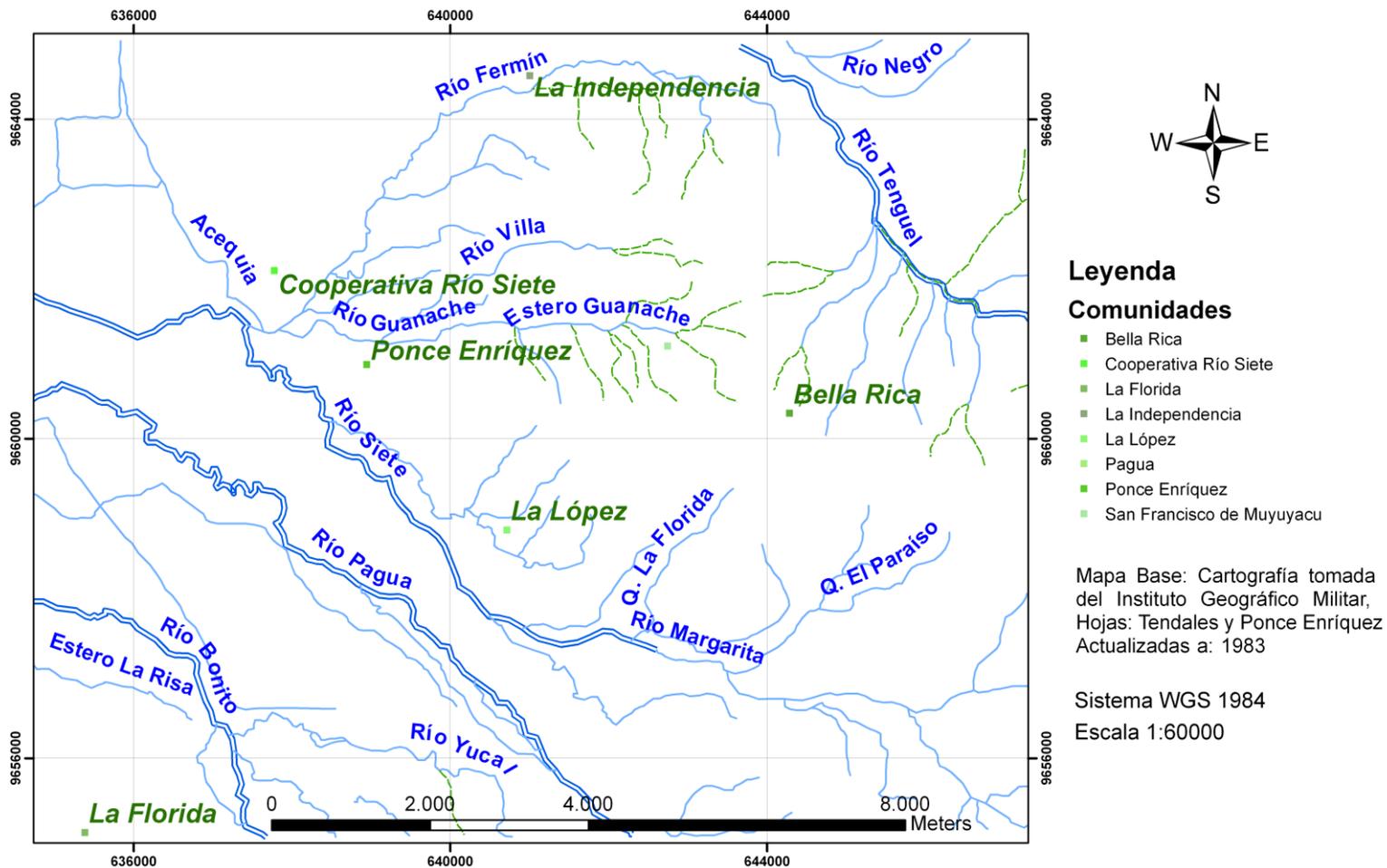
altitud de cada comunidad permitió establecer tres zonas dentro del cantón, la zona baja que va hasta los 500 metros de altura y corresponde a la zona tropical propiamente dicha, en la que se ubican 20 comunidades; la zona media que está entre los 500 y los 1000 metros de altitud, posee un clima subtropical hasta templado, se ubicaron 12 comunidades, y por último la zona alta que está a más de 1000 metros de altitud, con un clima que va de templado a frío, se localizaron 15 comunidades. En la Figura 2.3 se encuentran las principales comunidades de la zona de estudio entre las cuales se destacan la comunidad de Ponce Enríquez como tal, La Independencia, La López y la Cooperativa Bella Rica [3].



**Figura 2.1** Mapa de Ubicación general del área de estudio de Ponce Enriquez.  
**Fuente:** Mapa base, cartografía tomada del Instituto Geográfico Militar.  
**Modificado:** Galarza, B., Valverde, P., 2011.



**Figura 2.2** Mapa topográfico del área de estudio.  
**Fuente:** Mapa base, cartografía tomada del Instituto Geográfico Militar.



**Figura 2.3** Mapa de las principales comunidades del área de estudio.  
**Fuente:** Mapa base, cartografía tomada del Instituto Geográfico Militar.

## 2.2 Marco socioeconómico

El número de habitantes en el cantón Camilo Ponce Enríquez es de 21.998 según el último censo poblacional realizado en el 2010 a través del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). La edad media de la población es de 25,6 años. Se estipula que apenas el 23,4% de las viviendas poseen los servicios básicos públicos. Y además, que el 54% de los hogares le dan un tratamiento al agua antes de beberla [5].

Los habitantes del sector se dedican principalmente a tres actividades, entre las cuales consta la minería, específicamente en la explotación del oro, la agricultura y el comercio, propiciada por la actividad minera y el transporte. El hecho de encontrarse en la cercanía del eje vial de la Panamericana que enlaza a las provincias de El Oro y el Guayas trae consigo beneficios de carácter comercial [3].

Las actividades que desarrollan los habitantes del sector a través de la agricultura presentan una gran diversidad de cultivos entre los que predomina el cacao fundamentalmente, también se encuentra el banano y el café, como se ilustra en la Figura 2.4 [3].



**Figura 2.4** Actividad agrícola en Ponce Enríquez.

**Fuente:** Galarza, B., Valverde, P., 2011.

La actividad minera surgió en los años 70 con los trabajos de exploración de la empresa Copperfields Mining Corporation, con la finalidad de determinar su potencial aurífero al final del estudio y principalmente impulsados ante la crisis que dejó el fenómeno de El Niño y por los precios internacionales del oro, las sociedades de mineros informales se agruparon e invadieron la compañía, lo que llevó explotar el mineral de una manera informal. El proceso de la minería, desde el redescubrimiento de los yacimientos auríferos mineros en la década de 1980, provocó un alto nivel de movilidad poblacional; es preciso acotar que el crecimiento poblacional se ha dado a pesar de los altibajos en la producción minera en el distrito minero del cantón [6].

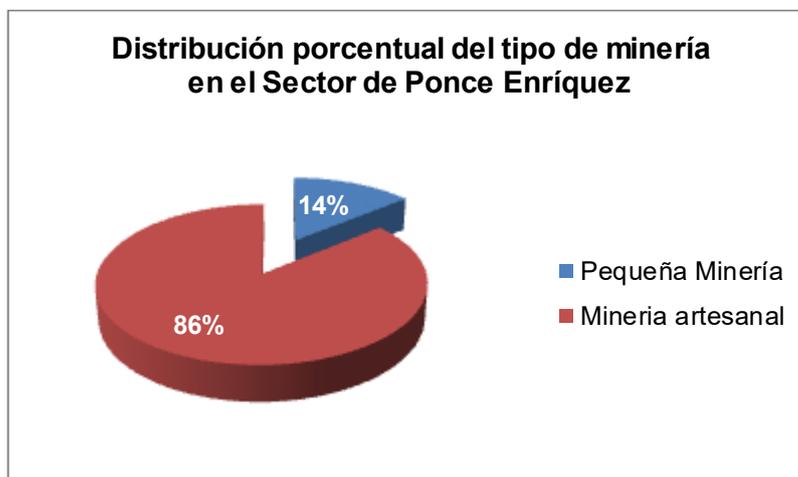
La población de Camilo Ponce Enríquez se encuentra afectada por varias enfermedades, entre ellas la parasitosis, infecciones respiratorias agudas

como la silicosis, enfermedades cutáneas como la dermatitis, y enfermedades diarreicas agudas debido a la deficiente calidad del agua. La dermatitis es consecuente de la mala manipulación de la pólvora, afectando principalmente a la población que se encuentra involucrada en labores mineras [3].

En la actualidad el Gobierno Nacional a través del Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico (INIGEMM) que realizó en el mes de diciembre del año 2011 un diagnóstico de las labores mineras artesanales y de pequeña minería en todos los distritos mineros del país para elaborar un programa de capacitación en técnicas de exploración, extracción y prevención ambiental. Como parte de este diagnóstico se incluyó el distrito minero de Ponce Enríquez, la institución que realizó el diagnóstico fue la Universidad de Cuenca, arrojando resultados de carácter socioeconómico en cuanto a la situación minera del sector [7].

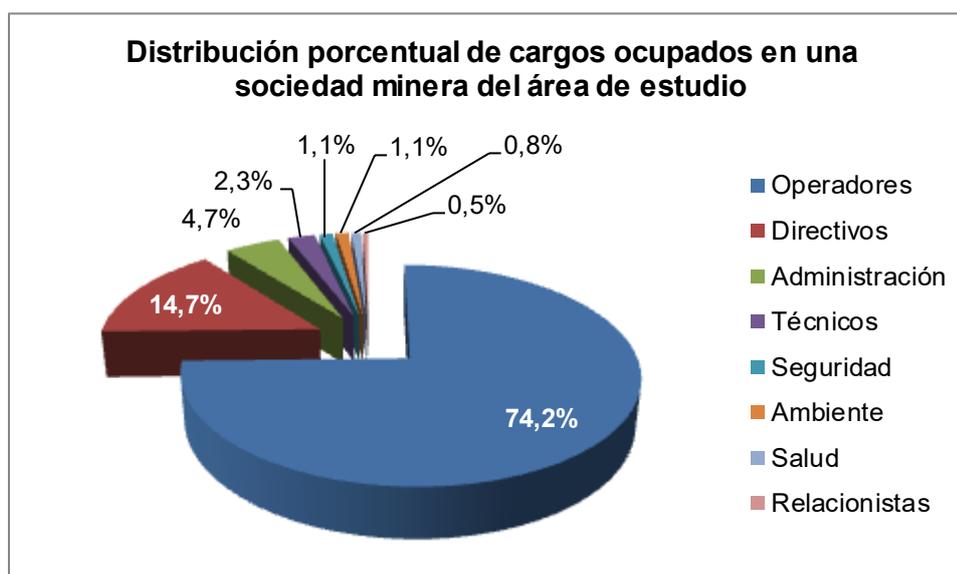
El sector cuenta con dos tipos de minería, pequeña minería representada por un 14% y minería artesanal representada por un 86% en el sector de Ponce Enríquez, tal como se ilustra en la Figura 2.5 [7]. La pequeña minería es aquella en la cual incorporan a sus actividades extractivas el uso de palas mecánicas, y otras de poca tecnificación, y aquella también en la que sus predios no alcanzan más de 150 hectáreas. En cambio, la minería artesanal se caracteriza por sus actividades extractivas en que

se realizan de forma manual utilizando herramientas sencillas como pico y pala [8].



**Figura 2.5** Distribución porcentual del tipo de Minería que se realiza en el sector de Ponce Enríquez.  
**Fuente:** INIGEMM, 2011.

Dentro de una sociedad minera, en este caso de forma general a través de las encuestas, se encuentran diferentes escalafones en cuanto a la distribución y manejo del personal. En la Figura 2.6, se aprecia la distribución del personal en una mina. Se encuentran los directivos quienes son los dueños de la mina, personal de administración, técnicos operativos, que por lo general son ingenieros en minas o geólogos, y estos se encargan de manejar a los operadores y obreros dentro de la mina, así como también se dispone de personal de seguridad, ambiental y salud ocupacional, y un relacionista que es el encargado de mediar entre la sociedad minera y la comunidad.



**Figura 2.6** Distribución porcentual de cargos ocupados por el personal dentro de una sociedad minera en Camilo Ponce Enríquez.

**Fuente:** INIGEMM, 2011.

En pocas sociedades mineras se encuentran en su totalidad estos cargos, ya que usualmente se encuentra al dueño de la mina manejando directamente al personal de obreros para la extracción del mineral, y de vez en cuando se contrata un ingeniero de profesión relacionada al campo de acción para que se evalué el trabajo que se está llevando a cabo.

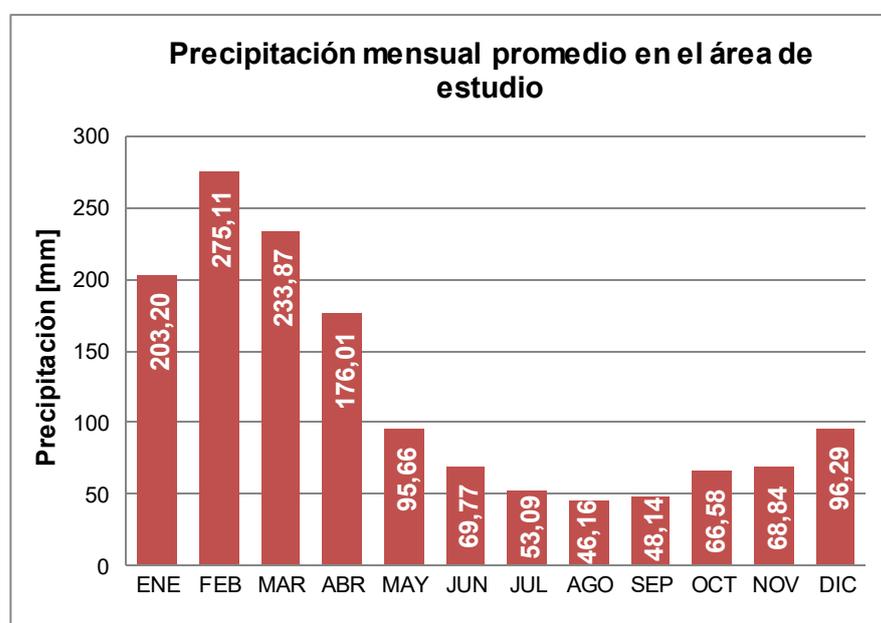
### 2.3 Climatología

El clima en el área de estudio es del tipo tropical húmedo, con dos estaciones climáticas, que son la temporada de lluvia durante los meses de enero a abril, donde las lluvias son abundantes y se alternan con períodos despejados, la temporada seca que comprende los meses de

mayo a diciembre, caracterizada por la frecuencia de garúas y neblina [9]. Debido a sus condiciones meteorológicas el área de estudio tiene una gran biodiversidad de flora y fauna.

### Precipitación

La precipitación anual promedio desde el año 1975 al año 2010 es de 1432,73 mm, registrándose precipitaciones máximas de 3982,9 mm, y mínimas de 565,23 mm [9]. En la Figura 2.7 se puede apreciar el promedio de precipitación por meses desde el año 1975 al 2009, se observa un aumento de la precipitación en los meses de enero a abril, que varía desde 203,2 mm de agua en el mes de enero a 176,01 mm de agua en abril.



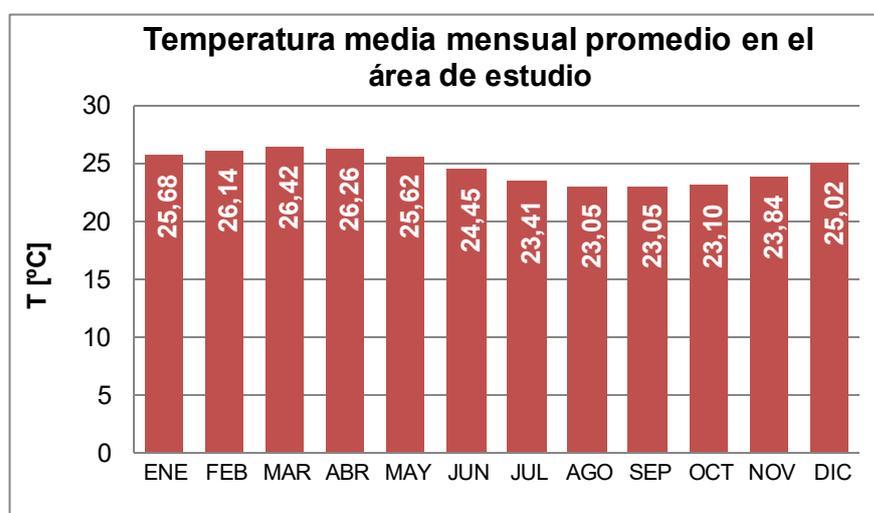
**Figura 2.7** Precipitación promedio mensual en el sector de Ponce Enríquez (período 1975-2009).

**Fuente:** INAMHI, 2011.

## Temperatura Media

La temperatura media anual promedio es de 24,57 °C y se ha registrado una temperatura media máxima anual promedio de 27,6 °C y mínima de 21,3 °C.

En la Figura 2.8 se observa la temperatura media promedio desde el año 1982 hasta el 2009, se observa un aumento de la temperatura media en los meses de enero a mayo, que varía desde 26,42 °C hasta 25,62 °C, y se mantiene a partir de junio hasta diciembre en rango entre 24,51 °C y 23,05 °C.



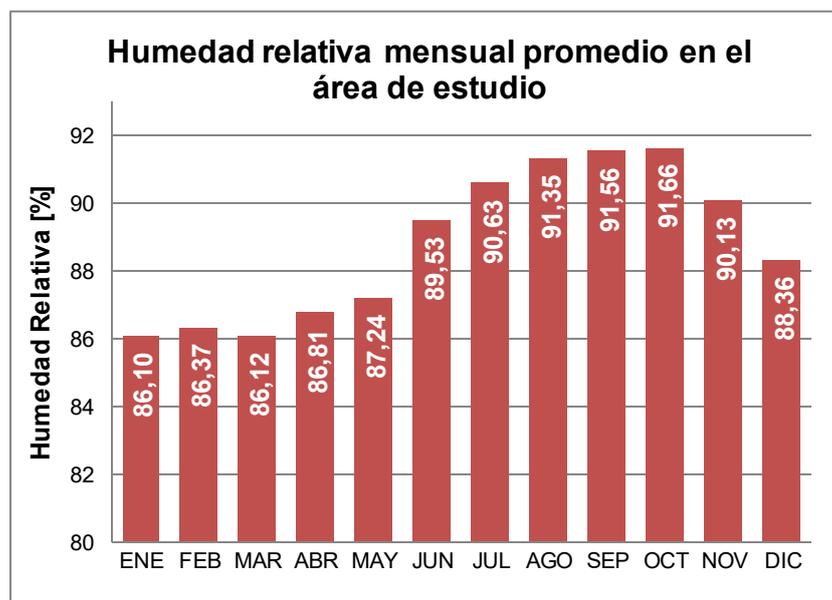
**Figura 2.8** Temperatura media promedio mensual en el sector de Ponce Enríquez (periodo 1982-2009).

**Fuente:** INAMHI, 2011.

## Humedad Relativa

La humedad relativa anual promedio es de 89,92% y se ha registrado una humedad relativa máxima anual promedio de 98% y mínima de 85%.

En la Figura 2.9 se observa la humedad relativa promedio desde el año 1982 hasta el 2009, se observa un aumento de la humedad relativa en los meses de junio a diciembre, que varía desde 89,53% hasta 91,56%.



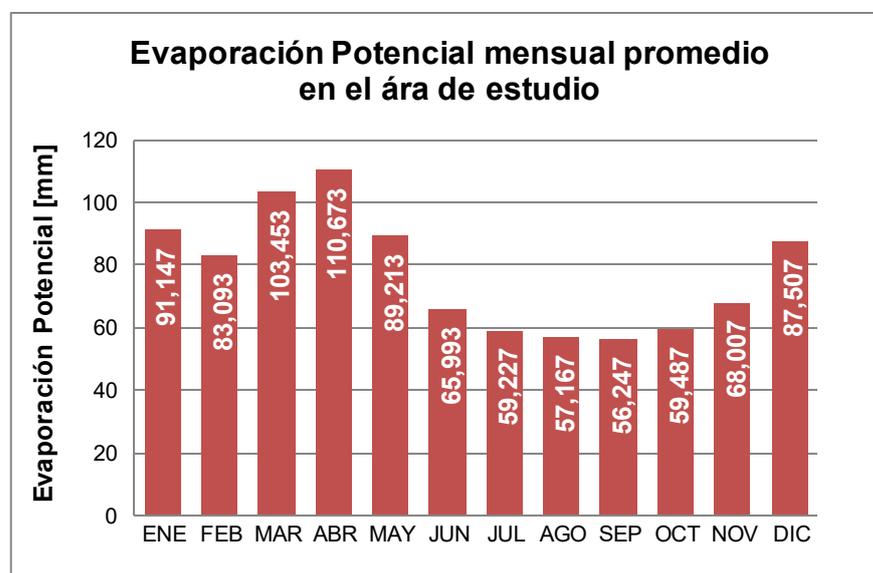
**Figura 2.9** Humedad Relativa mensual promedio en el sector de Ponce Enríquez (período 1982- 2009).

**Fuente:** INAMHI, 2011.

## Evaporación Potencial

La evaporación potenciales el efecto combinado de la evaporación del agua del suelo y de la transpiración de las plantas, la evaporación potencial promedio anual desde el año 1982 al 2009 es de 76,53 mm de agua. Se ha registrado una evaporación potencial máxima anual promedio de 270 mm y mínima de 31,7 mm.

En la Figura 2.10 se observa la evaporación potencial promedio desde el año 1985 hasta el 2009, se observa un aumento de la evaporación potencial en los meses de diciembre a mayo, variando entre 87,5 mm y 110,67 mm.



**Figura 2.10** Evaporación potencial mensual promedio en el área de Ponce Enríquez (período 1985-2009).

**Fuente:** INAMHI, 2011.

## 2.4 Geología

El distrito aurífero de Ponce Enríquez es un yacimiento en producción que constituye parte de la trilogía de mayor importancia aurífera del país junto con los distritos de Portovelo y Nambija. Ubicado aproximadamente a 38 Km al noroeste de la ciudad de Machala. El área de estudio pertenece a la vertiente pacífica de la Cordillera Occidental de los Andes sur-ecuatorianos [10].

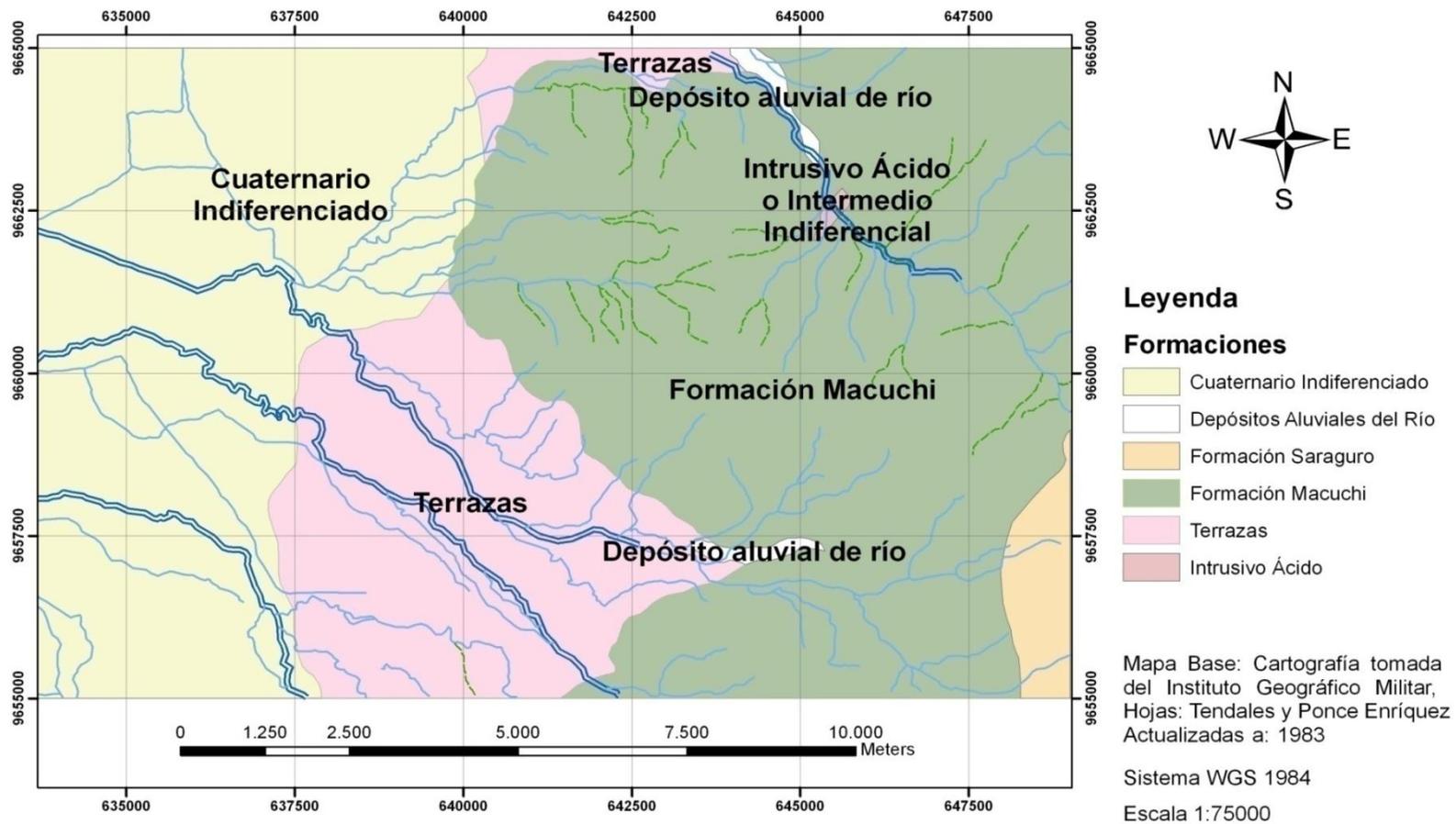
Este distrito se encuentra dentro de la cuenca sedimentaria Azuay-Cañar, ubicada en la región austral ecuatoriana, y se trata de una depresión interandina, de aproximadamente 100 Km de largo, en sentido norte-sur por 25 Km de ancho [10].

En el mapa geológico 1:75000 de Machala en la Figura 2.11, se observa que la formación donde se realizan las labores mineras es en la formación Macuchi, la cual corresponde a una secuencia de arco submarino, volcanoclástica, predominantemente sedimentaria, con volcánicos intercalados, posiblemente lavas u hojas subvolcánicas [11].

Litológicamente está compuesta por areniscas volcánicas de grano grueso, brechas, tobas, hialoclásticas, limolitas volcánicas, microgabros / diabasas, basaltos sub porfíricos, lavas en almohadillas y escasas calcarenitas [11].

Geoquímicamente, la Unidad Macuchi muestra características que comprende basaltos a andesitas basálticas subalcalinos de afinidad toleítica a cal alcalina con características geoquímicas relacionadas a subducción [11].

La formación Macuchi comprende areniscas volcánicas, limolitas, tobas turbidíticas redepositadas y lavas andesíticas, andesitas basálticas, volcanoclásticos gruesos y sedimentos clásticos de grano fino. Son rocas típicamente de colores gris verdoso a gris, duros y compactos, interestratificadas con estratos volcanoclásticos duros, y de gran volumen [10].



**Figura 2.11** Mapa Geológico del área de estudio de Ponce Enríquez.  
**Fuente:** Mapa base, cartografía tomada del Instituto Geográfico Militar.

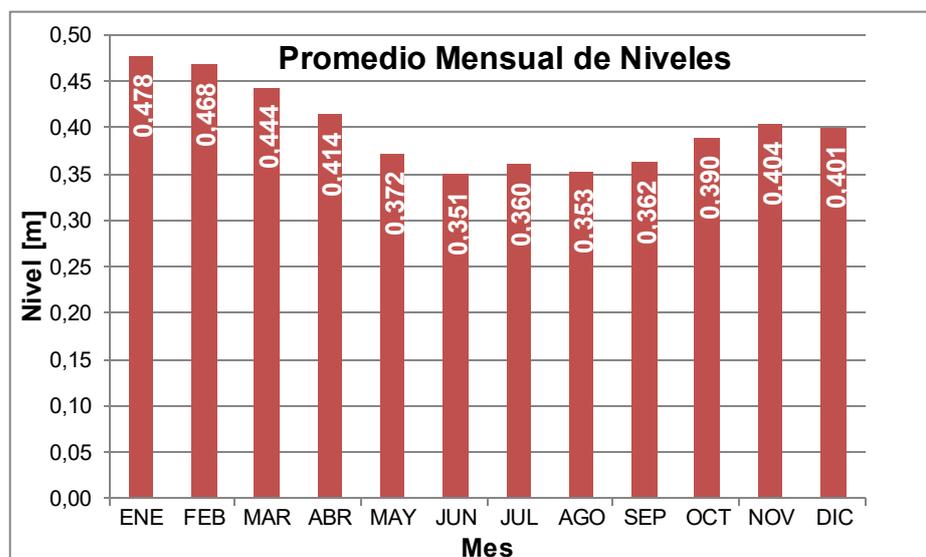
## 2.5 Hidrología

### 2.5.1 Hidrología superficial

El río Siete se origina en la ladera del cerro La Rica Ensellada naciendo a partir del río Margarita, tiene aproximadamente 30 Km. de extensión. Al inicio de su extensión, recibe la descarga de la quebrada La Florida y El Paraíso. En la mitad de su extensión, recibe las aguas del río Nueve de Octubre y el río Fermín, este último, recibe las aguas del río Guanache y del río Villa, que llegan unidos desde el noreste, y al final de su extensión desemboca en el Canal de Jambelí [3].

En la Figura 2.12 se encuentra el promedio mensual de niveles, el nivel promedio del sectores de 0.40 m. Se han registrado niveles máximos de 1.20 m, y mínimos de 0.010 m. Los meses en los cuales hay una mayor actividad en cuanto al nivel corresponden a los meses de enero, febrero, marzo y abril, producto de la estación lluviosa y en los que se presenta un bajo nivel corresponden a los meses de agosto y septiembre, consecuente de la estación seca.

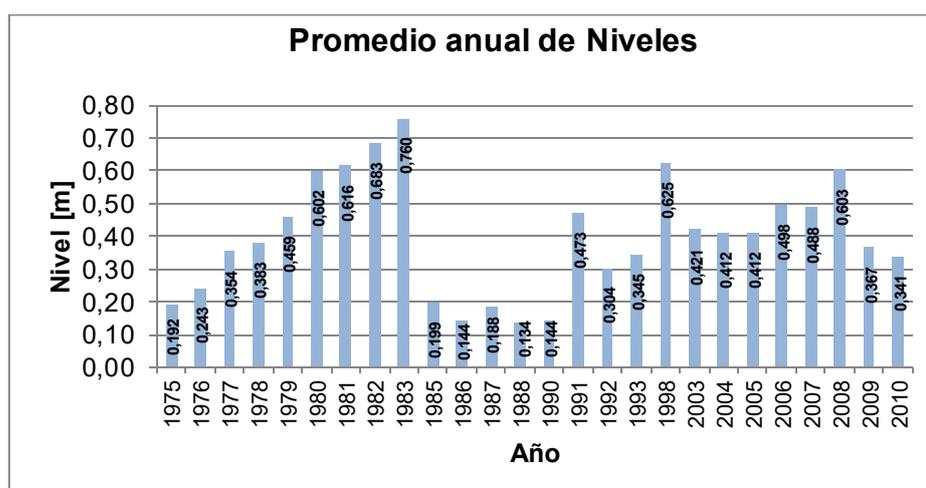
En la Figura 2.14 se encuentra el mapa de la hidrología superficial de la zona de estudio.



**Figura 2.12** Promedio mensual por año de nivel, (período 1975 al 2010).

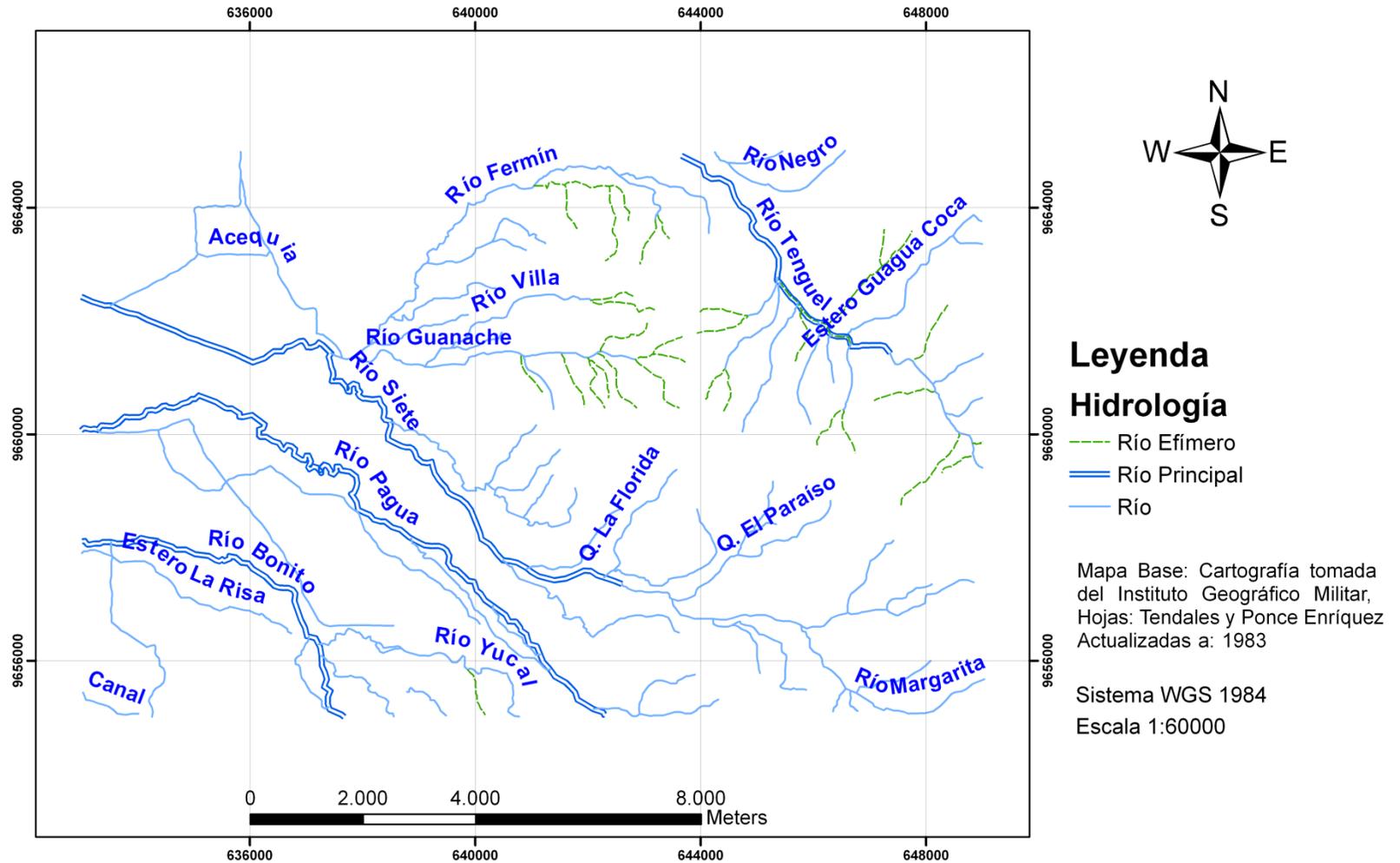
Fuente: INAMHI, 2011.

Los altos niveles que se registran en los años 1983 y 1997 fueron producto del denominado fenómeno de El Niño, tal como se muestra en la Figura 2.13, lo que causó inundaciones en la población, a más de los reboses de los ríos situados en el sector como el río Fermín, Villa, Guanache y el río Siete.



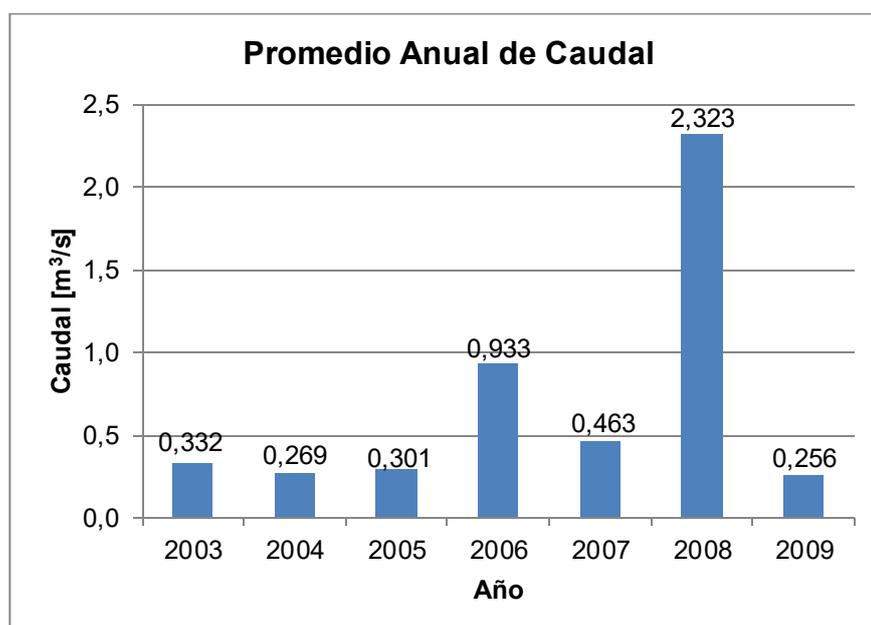
**Figura 2.13** Promedio anual de niveles (período 1975-2010).

Fuente: INAMHI, 2011.



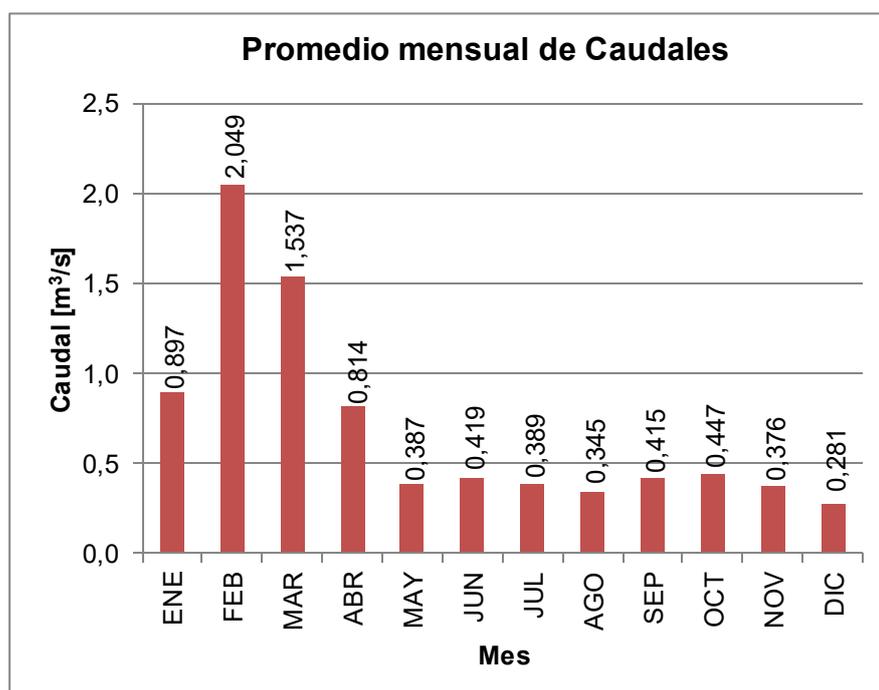
**Figura 2.14** Mapa Hidrológico del área de estudio, sector de Ponce Enríquez.  
**Fuente:** Mapa base, cartografía tomada del Instituto Geográfico Militar.

El caudal promedio del sector es de  $0.69 \text{ m}^3/\text{s}$ . En la Figura 2.15 se aprecian los valores registrados, cabe indicar que en los últimos 27 años se han registrado caudales máximos de  $2.3 \text{ m}^3/\text{s}$  producto del fenómeno de El Niño, y mínimos de  $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Figura 2.15** Promedio anual del caudal, en el área de Ponce Enríquez, (período 2003-2009).  
Fuente: INAMHI, 2011.

En la Figura 2.16 se aprecian los meses en que se presenta un bajo nivel correspondiente a los meses de septiembre y octubre, cuando se desarrolla la estación seca y la época en la cual hay un incremento del caudal que corresponde a los meses de febrero, marzo, abril y mayo porque se desarrolla la estación lluviosa.



**Figura 2.16** Promedio mensual por año del caudal, en el área de Ponce Enríquez, (período 2003-2009).

**Fuente:** INAMHI, 2011.

### 2.5.2 Hidrología subterránea

El agua de drenaje subterránea se encuentra localizada en un medio fracturado de las rocas volcánicas de la Formación Macuchi, en las labores mineras esta agua de drenaje subterránea en su mayoría (70%) es drenada de forma natural por gravedad, y en algunos casos es bombeada (30%), con un caudal aproximado entre 5 a 10 litros por segundo [7].

El agua de drenaje subterránea es de tipo bicarbonatada cálcica y el pH es ligeramente ácido lo que puede ser explicado por la mineralización del sector [12].

Esta agua en general no se aprovecha en las labores mineras, así lo registra el estudio realizado por el INIGEMM (Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico), donde se determinó que en el sector de pequeña minería el 77% no utiliza esta agua y solo un 23% emplea el agua para riego, actividades dentro de la mina y tratamiento del mineral [7].

En el sector de la minería artesanal un 66% no emplea el agua de drenaje subterránea y un 34% lo utiliza en las labores mineras y en agricultura [7].

# **CAPÍTULO 3**

## **INFORMACIÓN EXPERIMENTAL**

### 3.1 Campañas de muestreo

Para cumplir con el objetivo general de la tesis que consiste en caracterizar química e isotópica del agua superficial y subterránea del río Siete y de las zonas de influencia de las actividades mineras se realizó un reconocimiento de campo y tres campañas de muestreo para recolectar un total de once muestras de agua superficial, cuatro muestras del drenaje de mina, y cuatro muestras de pozos de agua subterránea que son representativas de la zona de estudio.

Previo a la toma de muestras de agua, se realizó el reconocimiento de campo en el mes de diciembre del 2011 que corresponde a la estación seca del sector (meses de junio a diciembre), consistió en tomar coordenadas de los lugares donde realizó el muestreo. También se consideró como un factor importante la accesibilidad hacia los puntos de muestreo.

En la primera campaña se recogieron once muestras de agua superficial (cuatro muestras del río Siete y siete muestras de los afluentes). Además se tomó una muestra de agua en la mitad del río Siete (Pe-5) para establecer o descartar la presencia de pesticidas organoclorados y organofosforados.

Se tomaron dos muestras de agua al inicio (Pe-2) y al final del río Siete (Pe-8) para evaluar la calidad del agua en el aspecto

bacteriológico, y también se tomó una muestra para este tipo de análisis en el río Fermín.

La segunda campaña de muestreo fue ejecutada en el mes de enero (2012) en la época lluviosa del sector, se recogieron dos muestras de agua de drenaje de mina que surgen de las rocas que forman las paredes de la bocamina y dos muestras de desagüe minero, además en la tercera campaña (época lluviosa) se tomaron cuatro muestras de agua subterránea ubicadas en el sector La Independencia (sector que aún utiliza agua de pozo). En la Figura 3.1 se ilustra el muestreo de agua superficial en el río Siete.

Para realizar el análisis de metales pesados, microbiológico y de pesticidas se trabajó con el laboratorio LAB-PSI Productos y Servicios Industriales certificado bajo la Norma ISO 17025 avalado por el Organismo de Acreditación Ecuatoriano (OAE) con certificado de acreditación OAE-LE-2C-05-003 en el campo ambiental, aguas y suelos. LAB-PSI Productos y Servicios Industriales está ubicado en la ciudad de Guayaquil en las calles Emma Ortiz y Gerónimo Avilés en la Manzana 15 Solar 1 Oficina 1-1.



**Figura 3.1** Campañas de muestreo en agua superficial del río Siete  
**Fuente:** Galarza, B., Valverde, P., 2011.

En la tabla II se exponen los lugares de muestreo, codificación asignada a las muestras de agua superficial, drenaje de mina y agua subterránea (agua de pozos) con sus respectivas coordenadas.

**Tabla II.** Lugares de muestreo de agua superficial, agua subterránea de drenaje de mina y agua subterránea (agua de pozos), codificación y coordenadas.

Lugar de muestreo	Código de Muestra	X	Y
Quebrada La Florida <sup>1</sup>	Pe-1	643101	9657374
Río Siete* <sup>1</sup>	Pe-2	642109	9657539
Río Siete <sup>1</sup>	Pe-3	640014	9658404
Río Nueve de Octubre <sup>1</sup>	Pe-4	639595	9659574
Río Siete** <sup>1</sup>	Pe-5	638304	9660372
Río Guanache y río Villa <sup>1</sup>	Pe-6	638727	9661184
Río Fermín <sup>1</sup>	Pe-7	639827	9663818
Río Siete*	Pe-8	637012	9661936
Río Margarita <sup>1</sup>	Pe-9	643395	9657052
Río Fermín* <sup>2</sup>	Pe-10	639394	9661936
Quebrada El Paraíso <sup>2</sup>	Pe-11	643631	9657064
Agua de drenaje subterránea <sup>2</sup>	Ps-1	642504	9659376
sector La López <sup>1</sup>	Ps-sub1	642466	9659402
Agua de drenaje subterránea <sup>2</sup>	Ps-2	645270	9662138
sector San Francisco de Muyuyacu <sup>1</sup>	Ps-sub2	645270	9662138
Pozo La Independencia* <sup>2</sup>	Ps-a	640550	9664467
Pozo Brisas* <sup>2</sup>	Ps-b	640355	9664956
Pozo El Pantanal* <sup>2</sup>	Ps-c	640518	9665594
Pozo San Alfonso <sup>2</sup>	Ps-d	640594	9664744

\*Muestras destinadas a análisis microbiológico

\*\*Muestra de agua para análisis de pesticidas organoclorados y organofosforados.

1 Se realizó análisis de metales pesados, iones mayoritarios y análisis isotópico.

2 Se realizó sólo análisis de iones mayoritarios.

**Fuente:** Galarza, B., Valverde, P., 2011.

En cuanto al análisis de iones mayoritarios se trabajó con el Laboratorio de Análisis Agrícolas y Afines que participó en una evaluación de interlaboratorios realizada en el año 2010 auspiciada por el Programa GEMS de las Naciones Unidas, el cual se encarga de proveer información científica y global de la calidad del agua para un manejo sustentable del agua dulce a nivel mundial. El Laboratorio de Análisis Agrícola y Afines obtuvo resultados satisfactorios con respecto a las concentraciones de iones mayoritarios, los resultados

pueden observarse en el Anexo A, el laboratorio está ubicado en Urdesa Norte Av. 4ta. # 203 y calle segunda.

### **3.2 Muestreo de agua superficial e isotópico**

Se solicitó al LAB-PSI algunas recomendaciones en cuanto a los recipientes para el muestreo, si los recipientes de plástico de PEAD o de vidrio ámbar no fueran nuevos se debe realizar un lavado previo con detergente libre de fósforo y enjuagar varias veces con agua destilada y dejar que se sequen al ambiente caso contrario las botellas no necesitan de dicho tratamiento.

Antes de recolectar la muestra de agua superficial se procedió a enjuagar tres veces los envases de PEAD y vidrio ámbar con el agua del lugar donde se recogió la muestra para que la botella se impregne de la calidad del agua muestreada [4] como se ilustra en la Figura 3.2.

Para la conservación de las muestras de agua se siguieron los lineamientos del manual de usuario de muestreo del Centro de Investigación y Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra (CIPAT), lo cual se resume en la Tabla III

Los requisitos para el análisis de iones mayoritarios del Laboratorio de Análisis Agrícola y Afines consistieron en almacenar la muestra a una

temperatura igual o menor a 4 °C y utilizar botellas de plástico de 1L de PEAD.

**Tabla III.** Requisitos para realización de análisis de agua en el laboratorio LAB-PSI.

Parámetro	Tipo de Recipiente	Cantidad de Muestra	Conservación de muestra
Metales pesados	Polietileno de Alta Densidad(PEAD)	1 L	3 gotas de HNO <sub>3</sub> Menor o igual a 4°C
Coliformes Totales y Fecales	Recipientes estériles de muestras de orina	150 ml.	Menor o igual a 4°C
Pesticidas, DBO <sub>5</sub> Y DQO	Vidrio ámbar	2 L	

**Fuente:** Centro de Investigación y Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra, 2011.

Para el muestreo isotópico se necesitaron botellas de Polietileno de Alta Densidad de 25 ml, dichas botellas no deben ser reutilizables por lo cual no es necesario realizar algún tipo de lavado previo al recipiente. También es necesario refrigerar las muestras a una temperatura menor o igual a 4 °C [4].

Para la refrigeración de las muestras se utilizaron equipos de campo como hieleras con hielo artificial refrigerados 24 horas antes de salir al campo.

Durante el muestreo isotópico es necesario enjuagar la botella 3 veces, se debe llenar la botella en su totalidad evitando que tenga burbujas en su interior y taparla para que no ocurra evaporación de isótopos ligeros.



**Figura 3.2** Muestreo superficial en el río Margarita  
**Fuente:** Galarza, B., Valverde, P., 2011.

Para tomar la muestra de análisis bacteriológico no se debe realizar el enjuague del recipiente ni de la tapa ya que pueden contaminarse y se debe destapar el envase estéril sólo en el momento de llenar el recipiente con el agua.

### 3.3 Muestreo de agua subterránea y de drenaje de mina

Para realizar el muestreo de agua de drenaje de mina se siguieron los lineamientos en una guía operativa de muestreo de agua subterránea [13].

El muestreo consiste principalmente en tomar la muestra de agua, enjuagar tres veces el recipiente de PEAD, para que la botella se impregne de la calidad del agua a muestrear y agregar el conservante (ácido nítrico) al agua destinada para análisis de metales pesados.



**Figura 3.3** Muestreo de agua de drenaje subterránea dentro de una mina artesanal.

**Fuente:** Galarza, B., Valverde, P., 2011.

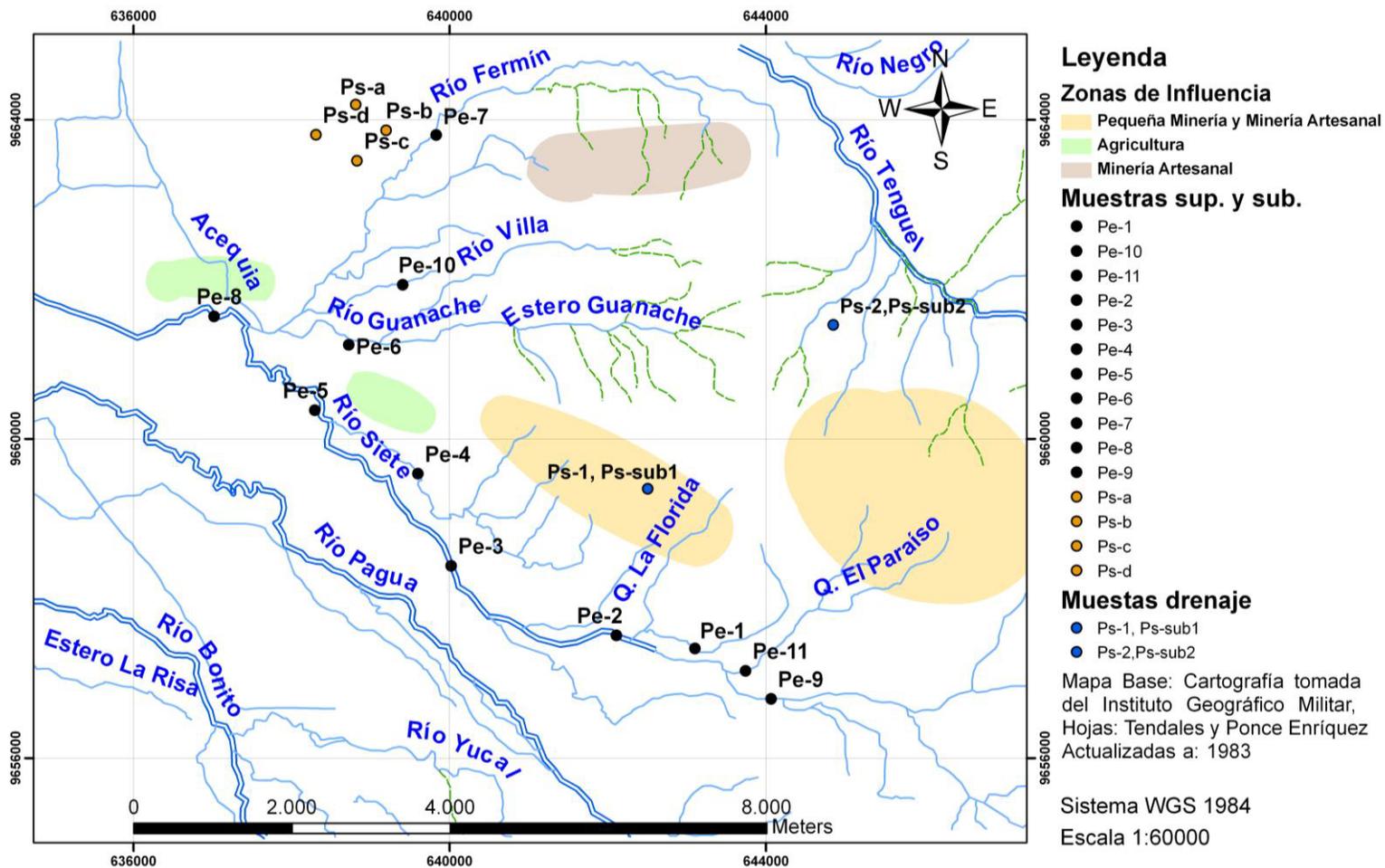
Se elaboró una ficha de campo para muestreo de agua superficial, agua de drenaje de mina y agua subterránea. En la Figura 3.4 se muestra un ejemplo de la ficha de campo y en el Anexo D se encuentran las fichas de los demás puntos de muestreo. En la Figura

3.5 se visualizan los puntos en los cuales se realizó el muestreo de agua superficial, agua subterránea de drenaje de mina y agua subterránea (agua de pozos) dentro del área de estudio, así como las zonas de influencia del sector observado.

Río Fermín	
<b>Código:</b> Pe-10	<b>Fecha:</b> 14/12/2012
<b>Envase:</b> 2 envases de polietileno	<b>Hora:</b> 14:00 pm
<b>Observaciones:</b> Tomada en el río Fermín, el agua presenta turbidez.	<b>Cantidad:</b> 2 L
	<b>Coordenadas</b>
	<b>X:</b> 639394 <b>Y:</b> 9661936
	
Parámetros medidos in situ	
pH	6,18
C.E [ $\mu\text{s}/\text{cm}$ ]	419
STD [mg/l]	268
T [°C]	26,8

**Figura 3.4** Ficha de campo utilizada para registrar datos de parámetros medidos in situ.

**Fuente:** Galarza, B., Valverde, P., 2011.



**Figura 3.5** Mapa de muestreo de agua superficial, de drenaje de mina y agua subterránea

**Fuente:** Mapa base, cartografía tomada del Instituto Geográfico Militar.

**Modificado:** Galarza, B., Valverde, P., 2011.

# **CAPÍTULO 4**

## **CARACTERIZACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO**

El objetivo principal de caracterizar el recurso hídrico es conocer sus propiedades físico-químicas, microbiológicas e isotópicas, además la presentación de resultados de los análisis de agua debe ser objetiva y pragmática para su posterior evaluación.

#### **4.1 Interpretación de datos**

En este apartado se presentan los resultados de los análisis que fueron proporcionados por los laboratorios LAB-PSI y Laboratorio de Análisis Agrícola y Afines.

Para la interpretación y evaluación físico-química se consideraron los Límites Máximos Permisibles establecidos en el Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria (TULAS), Libro VI, Anexo 1, Tabla 3- Criterios de calidad admisibles para la preservación de la flora y fauna en aguas dulces, frías o cálidas, y en aguas marinas y de estuario [16] además se consideraron los Límites Máximos Permisibles de la Environmental Protection Agency (EPA) para el Plomo. En el programa AquaChem versión 5.1 se realizó el diagrama de Piper para observar la clasificación del agua del sector de estudio y se realizaron los Diagramas de Stiff para conocer las facies hidroquímicas del agua superficial, de drenaje de mina y de agua subterránea (agua de pozo).

#### **4.1.1 Evaluación físico-química**

El análisis físico-químico se refiere a la determinación de las proporciones en las que se encuentran los distintos componentes en el agua mediante el uso de técnicas analíticas de evaluación realizadas en el laboratorio y mediciones in situ, las cuales son de carácter obligatorio por su variabilidad, los parámetros que deben ser medidos en el momento del muestreo son pH, Temperatura, Conductividad Eléctrica y Sólidos Totales Disueltos.

Los métodos de ensayos químicos utilizados en el laboratorio LAB-PSI son avalados por organismos internacionales como la EPA que define los Métodos Estándares aprobados para la determinación de contaminantes inorgánicos en aguas residuales y de consumo humano (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater-SM).

En la tabla IV se presentan los parámetros analizados en el Laboratorio de Análisis Agrícola y Afines con los métodos instrumentales empleados (los resultados de la evaluación realizada por GEMS en la que participó el Laboratorio de Análisis Agrícola y Afines se muestra en el Anexo A). En la tabla V se presentan los parámetros analizados en el LAB-PSI llevados a cabo bajo los Métodos Estándares respaldados por la EPA.

**Tabla IV.** Métodos empleados para la realización de ensayos químicos en agua superficial, drenaje de mina y agua de pozo empleados en el Laboratorio de Análisis Agrícola y Afines.

<b>Laboratorio de Análisis Agrícola y Afines</b>	
<b>Parámetro</b>	<b>Método de Análisis</b>
Dureza Total	Volumétrico
Bicarbonatos	Volumétrico
Calcio	Volumétrico EDTA
Magnesio	Volumétrico EDTA
Potasio	Absorción Atómica
Cloruros	Volumétrico
Sulfatos	Turbidimétrico
Fosfatos	Absorción Atómica
Alcalinidad	Volumétrico

**Fuente:** Laboratorio de Análisis Agrícola y Afines, 2011.

**Tabla V.** Métodos Estándares empleados para la realización de ensayos químicos y microbiológicos en agua superficial, drenaje de mina y agua de pozo por el LAB-PSI.

<b>PSI Productos y Servicios Industriales</b>	
<b>Parámetro</b>	<b>Método de Análisis</b>
Demanda Bioquímica de Oxígeno	SM 5210 B
Demanda Química de Oxígeno	EPA 410.4
Sólidos Suspendidos Totales	EPA 160.2
Sodio	SM 4500 Na
Arsénico	SM 3114 C
Cadmio	SM 3111 B
Cobre	SM 3111 B
Hierro	SM 4500 Fe
Mercurio	SM 3112 B
Nitratos	SM 4500 NO3
Nitritos	SM 4500 NO2
Plomo	SM 3111 B
Zinc	SM 3111 B
Coliformes Fecales	SM 9222 B
Coliformes Totales	SM 9222 B
Pesticidas Organoclorados	EPA 8081
Pesticidas Organofosforados	EPA 8141

**Fuente:** PSI Productos y Servicios Industriales, 2011.

Los resultados totales de los análisis de los laboratorios de agua superficial, drenaje de mina y agua subterránea (agua de pozos) se presentan en las tablas VI y VII.

**Tabla VI.** Resultados de análisis físico-químico y microbiológico realizados por los laboratorios PSI y LAAA, en agua superficial, de drenaje de mina.

Parámetros	Valor de Fondo	Pe-1	Pe-2	Pe-3	Pe-4	Pe-5	Pe-6	Pe-7	Pe-8	Pe-10	Pe-9	Pe-11
C. E [µs/cm]	81	590	377	358	199	348	425	367	402	419	50,8	629
pH	7,8	7,04	6,92	6,76	7,15	6,83	6,40	7,05	6,34	6,18	7,17	7,4
Temperatura [°C]	-----	22,2	23,0	25,3	25,4	26,3	26,3	26,7	27,1	26,8	24	24
STD [mg/l]	65	378	241	229	127	223	272	235	247	268	31	442
Bicarbonatos [mg/l]	-----	79,91	78,69	50,02	108,58	86,62	67,1	103,09	89,06	102,48	39,35	91,5
Calcio [mg/l]	-----	72	40	78,4	21,2	31,6	40	39,6	38,8	40	5,8	72
Cloruros [mg/l]	-----	9,22	8,15	6,38	4,96	8,15	8,15	6,74	11,34	22,33	2,83	30,48
Alcalinidad [mg/l]	37	65,5	64,5	41	89	71	55	84,5	73	84	32,25	75
Dureza Total [mg/l]	34	290	140	142	90	129	178	165	128	152	21	275
DBO <sub>5</sub> [mg O <sub>2</sub> /l]	-----	2,7	1,7	1,4	1,2	1,8	1,1	2,4	2,7	2,6	-----	-----
DQO [mg O <sub>2</sub> /l]	-----	127	77	52	46	67	56	62	94	94	-----	-----
Magnesio [mg/l]	-----	26,75	9,48	10,67	8,99	12,15	18,96	16,04	13,85	12,64	1,56	22,8
Nitratos [mg/l]	-----	-----	9,9	-----	-----	-----	-----	-----	2,7	-----	-----	-----
Nitritos [mg/l]	-----	-----	0,579	-----	-----	-----	-----	-----	0,289	-----	-----	-----
Potasio [mg/l]	-----	1,17	1,17	1,17	0,78	1,17	1,56	0,78	1,56	15,64	0,585	0,897
SST [mg/l]	4,0	-----	50	-----	-----	-----	-----	-----	21	-----	-----	-----
Sodio [mg/l]	-----	6,19	4,95	4,54	6,19	6,19	6,61	5,78	8,67	10,12	3,45	11,78
Sulfatos [mg/l]	1,0	223,68	97,44	106,75	4,80	61,44	114,24	65,28	72	78,24	6,0	177,6
Arsénico [mg/l]	0,0011	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	-----	-----
Cadmio [mg/l]	0,00002	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	-----	-----
Cobre [mg/l]	0,0017	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	-----	-----
Hierro [mg/l]	-----	0,12	0,14	0,31	0,25	0,47	0,12	0,05	0,17	-----	-----	-----
Mercurio [mg/l]	0,000078	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	-----	-----
Plomo [mg/l]	0,00025	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	-----	-----
Zinc [mg/l]	0,0048	<0,17	<0,17	<0,17	<0,17	<0,17	<0,17	<0,17	<0,17	<0,17	-----	-----
Cianuro Total [mg/l]	-----	0,006	0,007	0,007	0,004	0,005	0,004	0,003	0,014	-----	-----	-----
Coliformes Fecales [nmp/100 ml]	-----	-----	3,6x10 <sup>3</sup>	-----	-----	-----	-----	-----	5,1x10 <sup>3</sup>	8,6x10 <sup>4</sup>	-----	-----
Coliformes Totales [nmp/100 ml]	-----	-----	6,8x10 <sup>7</sup>	-----	-----	-----	-----	-----	8,3x10 <sup>7</sup>	2,7x10 <sup>3</sup>	-----	-----

Fuente: Galarza, B., Valverde, P., 2011.

**Tabla VII.** Resultados de análisis físico-químicos y microbiológicos realizados por los laboratorios PSI y LAAA, en agua de drenaje de mina y agua de agua de pozo.

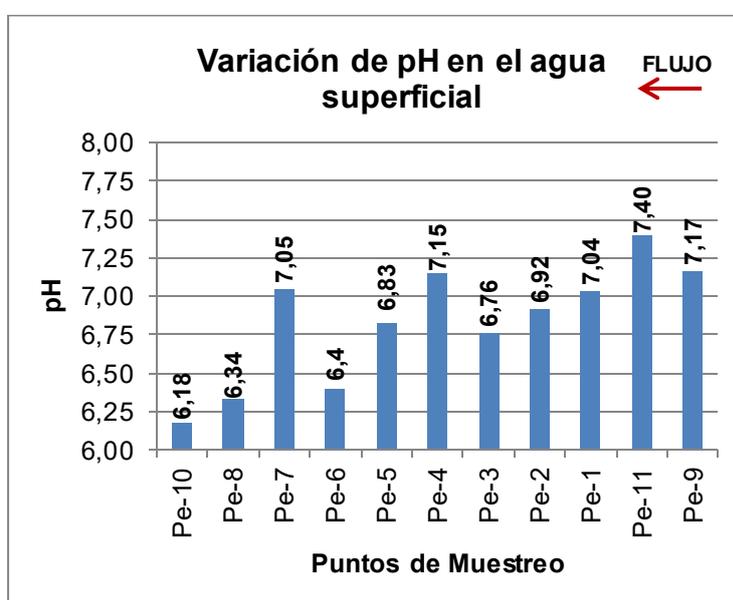
Parámetros	Valores de Fondo	Ps-1	Ps-sub1	Ps-2	Ps-sub2	Ps-a	Ps-b	Ps-c	Ps-d
C.E [µs/cm]	81	360	120	480	148	135	200	107,6	108
pH	7,8	6,45	6,51	6,92	6,55	5,77	6,37	5,52	5,80
Temperatura [°C]	-----	24,1	23,8	24,4	24,1	26,4	27,2	25,1	25,6
STD [mg/l]	65	232	79	325	95	91	130	71	75
Bicarbonatos [mg/l]	-----	103,7	92,72	122	62,22	61	104,92	67,1	65,27
Calcio [mg/l]	-----	43,2	15,2	22	9,2	8,6	14,8	6,4	7,6
Cloruros [mg/l]	-----	5,67	5,32	5,32	6,02	8,86	7,09	3,545	7,09
Alcalinidad [mg/l]	-----	85	76	110	51	50	86	55	53,75
Dureza [mg/l]	34	150	63	69	62	46	82,5	37,5	43
Magnesio [mg/l]	-----	10,21	6,56	6,68	9,45	5,88	10,32	5,16	5,76
Potasio [mg/l]	-----	0,78	0,39	2,34	0,11	0,507	1,014	3,003	3,9
Sodio [mg/l]	-----	-----	3,5	-----	5,75	4,83	6,99	4,00	4,60
Sulfatos [mg/l]	1,0	62,53	2,88	9,62	10,1	6,48	9,60	12,00	6,24
Cadmio [mg/l]	0,00002	-----	<0,01	-----	<0,01	-----	-----	-----	-----
Cobre [mg/l]	0,0017	-----	<0,05	-----	<0,05	-----	-----	-----	-----
Hierro [mg/l]	-----	-----	0,06	-----	0,016	-----	-----	-----	-----
Zinc [mg/l]	0,0048	-----	<0,17	-----	<0,17	-----	-----	-----	-----
Coliformes Fecales [nmp/100 ml]	-----	-----	200	-----	4500	-----	-----	-----	-----
Coliformes Totales [nmp/100 ml]	-----	-----	7700	-----	5,2x10 <sup>4</sup>	5,4x10 <sup>5</sup>	5,88x10 <sup>5</sup>	5,87x10 <sup>5</sup>	-----

Fuente: Galarza, B., Valverde, P., 2011.

#### 4.1.1.1 Interpretación físico-química

##### Potencial de Hidrógeno en las estaciones de muestreo

La variación del potencial de hidrógeno en los puntos seleccionados de agua superficial se muestra en la Figura 4.1. El pH en el agua es importante porque afecta la disponibilidad de nutrientes, la solubilidad de sustancias y cómo estas sustancias serán utilizadas por los organismos acuáticos. De acuerdo a los resultados de agua superficial, el pH varía desde 6,18 (ligeramente ácido) hasta 7,40 (ligeramente alcalino) [14].

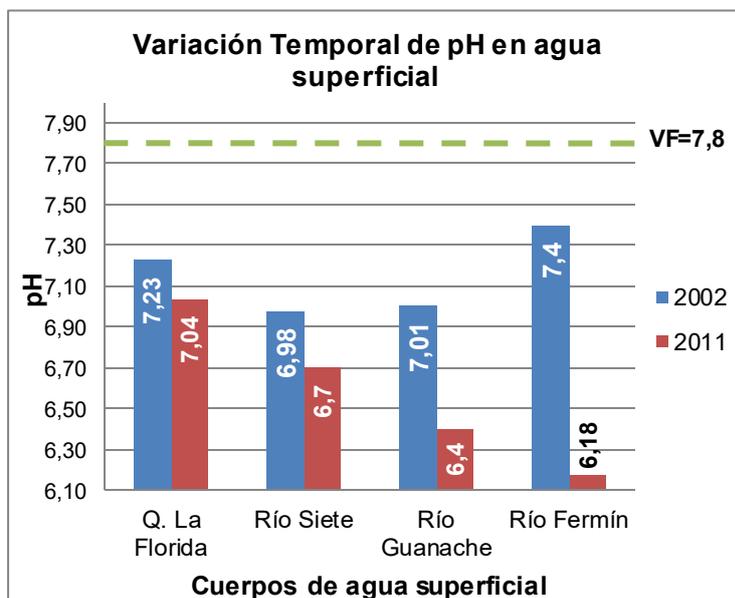


**Figura 4.1** Variación de pH en el agua superficial de los puntos de muestreo del río Siete y sus afluentes.

**Fuente:** Galarza, B., Valverde, P., 2011.

El valor de fondo del pH en el sector es de 7,8 [1], de esta forma se conoce que la geología del área de estudio tiende a presentar un pH ligeramente alcalino de forma natural. Sin embargo, la descarga continua de colas mineras con agentes ácidos y que no reciben tratamiento previo o adecuado podría provocar que el medio natural pierda dicha propiedad, en la Figura 4.2 se observa la disminución de pH originada a través del tiempo en el río Siete como en sus afluentes, debido a que los valores de pH son cercanos a la neutralidad, la variación espacial de pH no es considerada significativa, pero se evidencia que los valores se alejan del valor de fondo, entre estos, el registro de pH de 6,18 del río Fermín (Pe-10) es el resultado más alejado del valor de fondo y denota que este río se ha acidificado diez veces más en los últimos años, el río Nueve de Octubre presenta un pH de 7,15 y la quebrada El Paraíso un pH de 7,40 siendo los más cercanos al valor de fondo del sector.

El pH del río Siete se ve afectado por las actividades mineras del sector; varía desde 6,92 en su punto inicial de muestreo (Pe-2) hasta 6,34 en su punto final de muestreo (Pe-8).



**Figura 4.2** Variación temporal de pH en los cuerpos de agua superficial del área de estudio (período 2002-2011).

**Fuente:** Ministerio de Energía y Minas, 2002.

Estudios realizados anteriormente sobre supervivencia y crecimiento de especies acuáticas demuestran que existe un efecto combinado entre la dureza y pH del agua, al existir valores de pH de 6 a 8, y valores de dureza entre 25 mg/l a 50 mg/l de  $\text{CaCO}_3$ , el crecimiento y supervivencia de los organismos acuáticos no se ven afectados, mientras que a valores por debajo de 25 mg/l de dureza y un pH de 7 presentan una tasa más alta de mortalidad [15]. Los valores de pH registrados en el presente estudio (cercano a neutro) en conjunto con la dureza del agua considerada como dura y moderadamente dura (la cual se tratará más adelante),

favorecen el crecimiento y supervivencia de especies acuáticas [15].

El Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria, Tomo V, Anexo 1, Tabla 3- Criterios de calidad admisibles para la preservación de la flora y fauna en aguas dulces, frías o cálidas, y en aguas marinas y de estuario establece un rango de pH de 6,5 hasta 9 para proteger la vida acuática [16], de acuerdo a este rango, la flora y fauna acuática pueden verse afectadas en el río Fermín, ríos Guanache y Villa y río Siete (Pe-8) al presentar valores de pH de 6,18, 6,40 y 6,34 respectivamente. Cabe añadir que los organismos acuáticos poseen un sistema de autorregulación interno que les permite adaptarse y sobrevivir fuera de su margen óptimo de pH (6,5 a 9) de acuerdo a la especie, siempre y cuando el pH no varíe 0.3 unidades diarias [17].

Los valores de pH cercanos a neutros se justifican principalmente a los elevados valores de alcalinidad que le confieren al agua propiedades amortiguadoras, así los impactos más serios de la inmisión de efluentes ácidos pueden ser mitigados por los efectos de auto-neutralización

(consumo de carbonatos y otras sustancias alcalinas propias de la roca encajante).

### **Río Margarita**

El río Siete se origina a partir del caudal del río Margarita, por lo cual es relevante caracterizar su composición hidroquímica para analizar si el río Siete recibe algún tipo de contaminación desde el río Margarita.

Tiene un pH de 7,17 a una temperatura de 24 °C. Presenta la Conductividad Eléctrica más baja de los cuerpos de agua superficial del estudio siendo de 50  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , por lo tanto la cantidad de Sólidos Totales Disueltos también es baja y es de 31 mg/l. A diferencia del resto de afluentes del río Siete se la considera como un agua blanda al contener 21 mg/l de dureza como  $\text{CaCO}_3$ . Las concentraciones de Calcio y Magnesio son 5,8 mg/l y 1,56 mg/l respectivamente.

Tiene una alcalinidad de 32,25 mg/l, siendo el único valor cercano a la alcalinidad de fondo del sector que es de 37 mg/l, esto la convierte en un agua poco amortiguadora [18], tiene un contenido de Sulfatos de 6 mg/l que es el valor más bajo de Sulfatos después del río Nueve de Octubre.

La facie hidroquímica del río Margarita es bicarbonatada cálcica-magnésica, al no presentar características de alteración en su composición hidroquímica se demuestra que este río aún no sido impactado por actividades mineras.

### **Quebrada La Florida**

La quebrada La Florida recibe las descargas de efluentes mineros de la cooperativa Bella Rica ubicada en la ladera sur del cerro [1], tiene un pH de 7,04 a una temperatura de 22,2 °C como se analizó anteriormente.

El agua de la quebrada La Florida (Pe-1) tiene una alcalinidad de 65,5 mg/l y 79,91 mg/l de bicarbonatos que le confiere al agua propiedades neutralizantes y se clasifica como agua moderadamente amortiguadora [18].

El agua presenta una concentración de Sólidos Totales Disueltos (STD) de 378 mg/l y Conductividad Eléctrica (C.E) de 590  $\mu\text{s}/\text{cm}$ , que son concentraciones altas.

El agua de esta quebrada tiene una concentración de Sulfatos de 223,68 mg/l siendo la concentración más alta de todos los afluentes del río Siete. Los sulfatos son un claro indicador de contaminación por minería y se originan por la

oxidación de sulfuros; el valor de fondo del sector es de 1 mg/l de Sulfatos, indicando que las concentraciones altas de Sulfatos no tienen un origen natural sino que se producen por la intensa actividad minera que se realiza en el sector de Ponce Enríquez, específicamente en el campamento minero de Bella Rica.

El valor de fondo de los Sólidos Totales Disueltos es de 65 mg/l [1] y el agua de la quebrada excede aproximadamente seis veces (al tener 378 mg/l de STD) el citado valor de fondo; el incremento de los STD puede deberse al aumento tanto de sales como materia orgánica que se disuelven en el agua.

La Demanda Biológica de Oxígeno ( $DBO_5$ ) con 2,7 mg/l indica que la fuente principal de aumento de los STD se debe a la incorporación de sales al agua que provienen de las actividades mineras y no de materia orgánica de origen doméstico o de aguas negras.

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) es de 127 mg/l y corrobora que el agua se encuentra mayormente contaminada por materia inorgánica no biodegradable,

siendo además el valor de DQO más alto de toda el área de estudio.

El agua de la quebrada La Florida tiene una Dureza de 290 mg/l y se la clasifica como dura, esto es un resultado positivo del estudio, ya que a mayor dureza en el agua la toxicidad de los metales disminuye [19].

La dureza del agua está relacionada directamente con el Calcio y el Magnesio, que son elementos que se encuentran presentes en el agua en cantidades considerables debido a la disolución de minerales alcalinos durante las reacciones de neutralización que se originan en el medio. La cantidad de Calcio es de 72 mg/l y 26,75 mg/l de Magnesio, que son los valores más altos de estas sustancias en el área de influencia del río Siete.

La facie hidroquímica del agua de la quebrada La Florida es sulfatada-bicarbonatada cálcico-magnésica, evidenciando una alteración en el medio acuático natural, al predominar la facie sulfatada sobre la bicarbonatada; también denota que la incorporación del agua de lluvia no es suficiente para que predominen los bicarbonatos en el grupo aniónico del agua

superficial; se debería analizar el cambio de ésta situación durante la estación lluviosa.

### **Quebrada El Paraíso**

La quebrada El Paraíso recibe los efluentes mineros de las actividades que se realizan en Bella Rica, tiene un pH de 7,4 a 24 °C y es un pH cercano al valor de fondo del sector de 7,8.

Tiene una gran cantidad de Sólidos Totales Disueltos (442 mg/l) que influyen directamente en el aumento de la Conductividad Eléctrica (629  $\mu\text{s}/\text{cm}$ ), ambos parámetros son los más altos de todo el sector de estudio.

El agua de esta quebrada es considerada dura (275 mg/l) y por ende tiene una gran cantidad de Calcio (72 mg/l) y de Magnesio (22,8 mg/l). Se clasifica también como un agua muy amortiguadora al contener una Alcalinidad de 75 mg/l. Además presenta la segunda concentración más alta de Sulfatos de 177,60 mg/l.

Presenta la misma facie hidroquímica de la quebrada La Florida, sulfatada-bicarbonatada cálcico-magnésica.

### **Confluencia del río Guanache y Villa**

Las aguas del río Guanache y Villa drenan las actividades mineras en la ladera oeste de la cooperativa Bella Rica, atraviesan la Municipalidad de Ponce Enríquez y desembocan en el río Fermín que a su vez lo hace en el río Siete, así se observa en la Figura 2.3, el pH del agua es de 6,40 a 6,3 °C de temperatura y el caudal del río Guanache es en promedio de 0,22 m<sup>3</sup>/s en la estación seca [1].

El agua de los ríos Guanache y Villa a pesar de presentar una concentración de bicarbonatos baja de 67,1 mg/l y la una alcalinidad registrada de 55 mg/l, aún puede ser clasificada como un agua con propiedades moderadamente amortiguadoras.

La Conductividad Eléctrica al igual que los Sólidos Totales Disueltos son los segundos valores más altos registrados en la zona de estudio; desde el año 2002 hasta la presente fecha la conductividad eléctrica ha aumentado desde 235 µs/cm hasta 425 µs/cm.

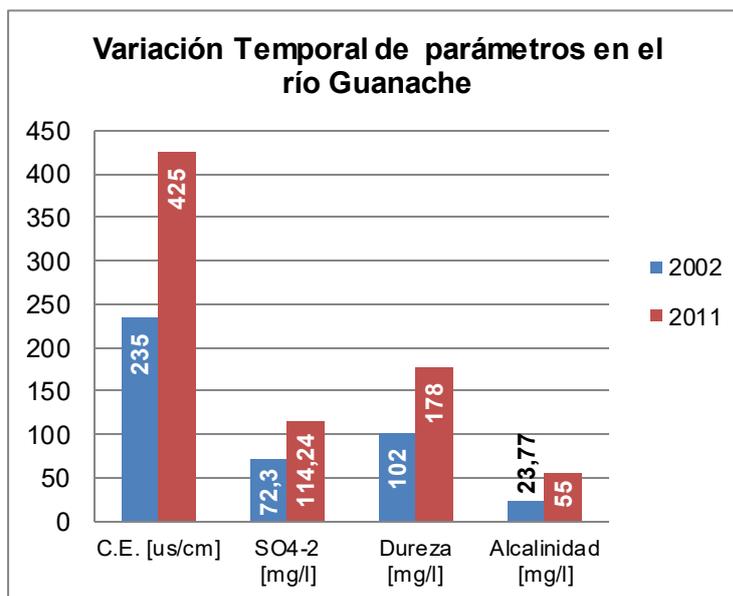
La concentración de Sulfatos (tercera más alta) también presenta un aumento significativo a través del tiempo, al incrementarse de 72,3 mg/l a 114,24 mg/l.

El incremento de los parámetros mencionados de Conductividad Eléctrica, Sólidos Totales Disueltos y Sulfatos indica un aumento de compuestos inorgánicos provenientes de las actividades mineras del sector.

Las altas concentraciones de Magnesio (18,96 mg/l) y Calcio (40 mg/l) producen que el agua superficial de la confluencia de los ríos Guanache y Villa, sea catalogada como dura al presentar un contenido de Dureza de 178 mg/l.

En la fase aniónica prevalecen los  $\text{SO}_4^{-2}$  con el 32% seguido de los  $\text{HCO}_3^{-1}$  con el 15% y en la fase catiónica domina el  $\text{Ca}^{+2}$  con un 26% y el  $\text{Mg}^{+2}$  con el 21%, de este modo la facie hidroquímica del agua del río Guanache y Villa es sulfatada-bicarbonatada cálcico-magnésico.

En la Figura 4.3 se puede observar la variación temporal desde el año 2002 al año 2011, donde parámetros como C.E, Sulfatos, Dureza y Alcalinidad se incrementan.



**Figura 4.3** Variación temporal de Conductividad Eléctrica, Sulfatos, Dureza y Alcalinidad en el río Guanache (período 2002-2011).

**Fuente:** Ministerio de Energía y Minas, 2002.

De acuerdo a los resultados de los análisis físico-químicos y entre estos la Demanda Química de Oxígeno con 56 mg/l, demuestra que el agua del río Guanache tiene el tercer grado de contaminación minera del sector.

### Río Fermín

El agua del río Fermín tiene la capacidad más alta después del río Nueve de Octubre para neutralizar ácidos, y es clasificada como muy amortiguadora debido al elevado contenido de Alcalinidad (84,5 mg/l) y también de Bicarbonatos (103,09 mg/l) que posee, pero la continua

descarga de efluentes mineros sin tratamiento de forma indiscriminada podría provocar que el medio natural pierda dicha propiedad, así lo demuestra el registro de pH de 6,18 del río Fermín que es el resultado más alejado del valor de fondo del sector de 7,8 y también es el valor de pH que ha disminuido más con respecto a los demás tributarios del río Siete, lo que puede observarse en la Tabla VIII.

**Tabla VIII.** Variación temporal del pH del agua superficial del río Siete y sus afluentes (período 2002-2011).

<b>Quebrada/Río</b>	<b>pH 2002</b>	<b>pH 2011</b>
Q. La Florida	7,23	7,04
Q. El Paraíso	7,69	7,17
Río Siete	6,98	6,70
Río Guanache	7,01	6,40
Río Fermín (Pe-10)	7,4	6,18

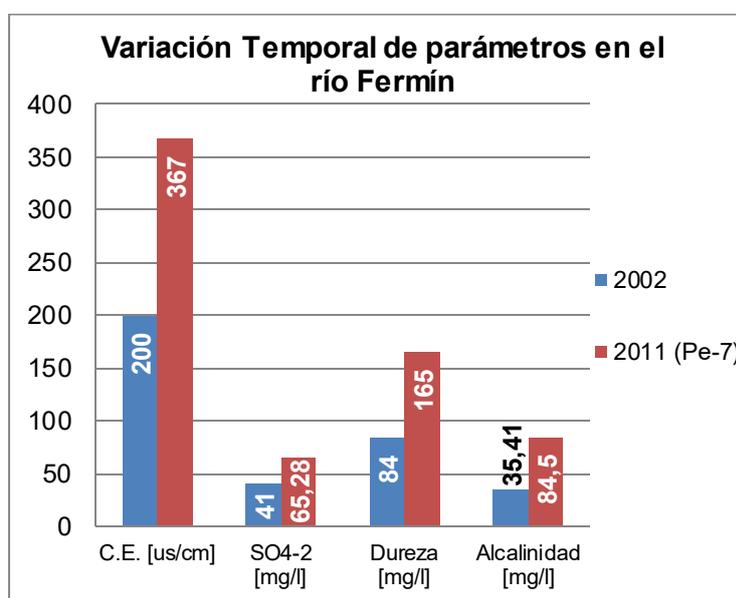
**Fuente:** Ministerio de Energía y Minas, 2002.

**Fuente:** Galarza, B., Valverde, P., 2011.

El aumento de los parámetros Conductividad Eléctrica, Sulfatos, Dureza y Alcalinidad se muestran en la Figura 4.4 del año 2002 al 2011.

Se observa que el parámetro que más ha aumentado es la dureza del agua, incrementándose desde 84 mg/l a 165 mg/l, mientras que la concentración de Sulfatos aumentó de 41 mg/l (año 2002) a 65,25 mg/l (actualidad). Los valores registrados de DQO en los puntos Pe-7 y Pe-10 son de 62 mg/l y 94 mg/l respectivamente y demuestran que las

actividades mineras artesanales que se desarrollan en la comuna La Independencia se han intensificado, inclusive el valor de DQO (en el punto Pe-10) es más alto en comparación con el resultado de DQO de la intersección de los ríos Guanache y Villa. El agua presenta facies bicarbonatada-sulfatada cálcico-magnésica, con un porcentaje de 22% tanto de  $\text{HCO}_3^{-1}$  como de  $\text{SO}_4^{-2}$ .



**Figura 4.4** Variación temporal de Conductividad Eléctrica, Sulfatos, Dureza y Alcalinidad en el río Fermín, (período 2002-2011).

**Fuente:** Ministerio de Energía y Minas, 2002.

### Río Nueve de Octubre

El río Nueve de Octubre drena las labores mineras de La López, donde se combinan las actividades de pequeña

minería y minería artesanal. Presenta un pH de 7,15 a 25,4 °C.

La Conductividad Eléctrica de 199  $\mu\text{s}/\text{cm}$  y los Sólidos Totales Disueltos con 127 mg/l son los valores más bajos del sector después del río Margarita, en cuanto a los Sulfatos presenta una concentración de 4,80 mg/l, determinando que la influencia de la minería sobre este río aún no es significativa. Los Bicarbonatos (108,58 mg/l) y la Alcalinidad (89 mg/l) son los valores más altos de todo el sector clasificando al agua como muy amortiguadora.

La gran capacidad amortiguadora hace que el pH del río Nueve de Octubre (7,15) se mantenga cercano a la neutralidad y se aproxime al valor de fondo de pH del sector de 7,8.

El valor de DQO de 46 mg/l denota que el río Nueve de Octubre contiene cantidades bajas de contaminantes inorgánicos.

El agua de este río es considerada como moderadamente dura (90 mg/l) debido a las concentraciones de Calcio y Magnesio de 21,2 mg/l y 8,99 mg/l. Dichas concentraciones y los resultados de Sulfatos indican que el río Nueve de

Octubre es un cuerpo de agua del cantón de Ponce Enríquez que aún no es impactado por la contaminación minera.

Las facies hidroquímicas del río son bicarbonatada cálcico-magnésica, presentando una composición hidroquímica no alterada. Los porcentajes de concentración en meq/l para la facie aniónica son 44% para  $\text{HCO}_3^{-1}$  y para los  $\text{SO}_4^{-2}$  el 2%, en la facie catiónica los porcentajes son, 26% para el  $\text{Ca}^{+2}$  y para el  $\text{Mg}^{+2}$  el 18%.

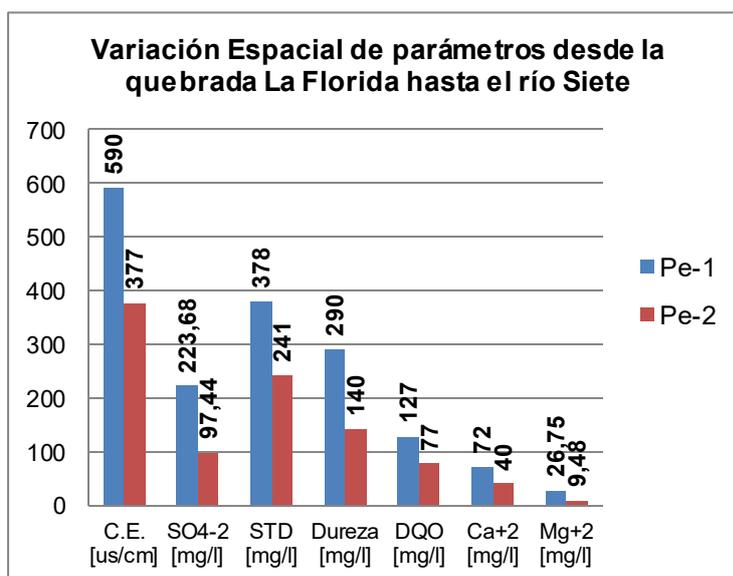
### **Río Siete**

El pH del río central de estudio fluctúa entre 6,92 (Pe-2) y 6,34 (Pe-8) se lo considera como un pH ligeramente ácido [14].

La capacidad para amortiguar ácidos del río Siete es moderada [18]; el agua del río Siete en su primera estación de muestreo (Pe-2) tiene concentraciones similares al agua de la quebrada La Florida en cuanto a Alcalinidad y Bicarbonatos.

Los efectos de dilución entre el punto Pe-1 y Pe-2 se deben a la incorporación de caudal desde el río Margarita (no

contaminado) y se ven reflejados en la disminución de las concentraciones de C.E, STD,  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$ , estos dos últimos parámetros también causan reducción de la Dureza del agua. La variación de concentraciones se muestra en la Figura 4.5.



**Figura 4.5** Variación espacial de parámetros entre el agua de la quebrada La Florida (Pe-1) y el inicio del río Siete (Pe-2).

**Fuente:** Galarza, B., Valverde, P., 2011.

Durante las salidas de campo se observó que a orillas del río Siete también se realizan labores mineras artesanales, el tramo del río Siete representado en la muestra Pe-3, se encuentra influenciado por las actividades mineras del sector de La López.

Se evidencia que existe consumo de sustancias alcalinas, al disminuir la concentración de alcalinidad y de bicarbonatos a lo largo del río Siete y al aumentar la concentración de Calcio (desde el punto Pe-2 hasta el punto Pe-3). Cabe destacar que la estación de muestreo Pe-3 sobre el río Siete es la de menor concentración de bicarbonatos con 50,02 mg/l y de alcalinidad con 41 mg/l, de todo el río.

El río Siete en el punto Pe-5 tiene una mayor concentración de Bicarbonatos (86,62 mg/l) y Alcalinidad (71 mg/l) con respecto al punto Pe-3.

En el punto Pe-5 la dureza del agua disminuye pero continúa siendo considerada como moderadamente dura, y la cantidad de sulfatos decrece de 106,75 mg/l a 61,44 mg/l debido posiblemente a la incorporación de agua desde el río Nueve de Octubre.

En el punto final de muestreo (Pe-8) los valores de alcalinidad, bicarbonatos y dureza son similares a los valores de la estación de muestreo del punto Pe-5, sin embargo el valor de la DQO aumentó de 67 mg/l a 94 mg/l, que puede deberse a la influencia combinada de los ríos Guanache, Villa y Fermín.

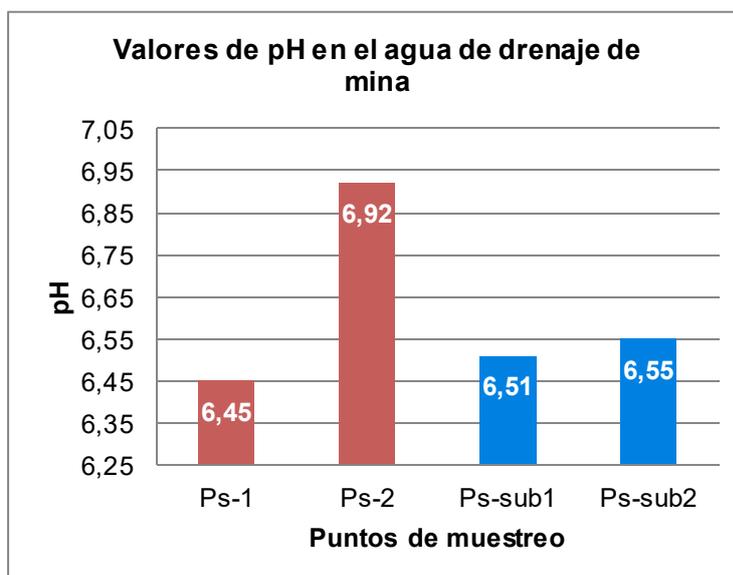
Las facies hidroquímicas del agua del río Siete (puntos Pe-2 y Pe-3) son sulfatada-bicarbonatada cálcico-magnésica mientras que en el resto de puntos (Pe-5 y Pe-8) el agua es bicarbonatada-sulfatada cálcico-magnésica, pero es importante mencionar que la facie bicarbonatada puede convertirse en sulfatada ya que los porcentajes de abundancia son muy próximos entre sí, de modo que para el punto Pe-5 el 25% corresponde a los bicarbonatos y el 22% a los sulfatos y para el punto Pe-8 el 22% corresponde tanto a bicarbonatos como sulfatos.

Con respecto a la concentración de Sólidos Suspendidos Totales (SST), se analizó la variación de este parámetro desde la estación inicial hasta el punto final de muestreo del río Siete, los SST disminuyen a menos de la mitad de 50 mg/l a 21 mg/l debido a procesos de sedimentación, este material fino puede bloquear las branquias de los peces y transportar contaminantes y patógenos [20].

### Agua de Drenaje de Mina

El drenaje de mina se origina por el agua que se infiltra a través de las paredes de la mina o de la influencia de agua subterránea.

Las muestras Ps-1 y Ps-2 corresponden al agua de desagüe que sale de la bocamina, mientras que las muestras Ps-sub1 y Ps-sub2 corresponden al agua de infiltración de las paredes de la mina. Los valores de pH de cada una de las muestras se observan en la Figura 4.6.

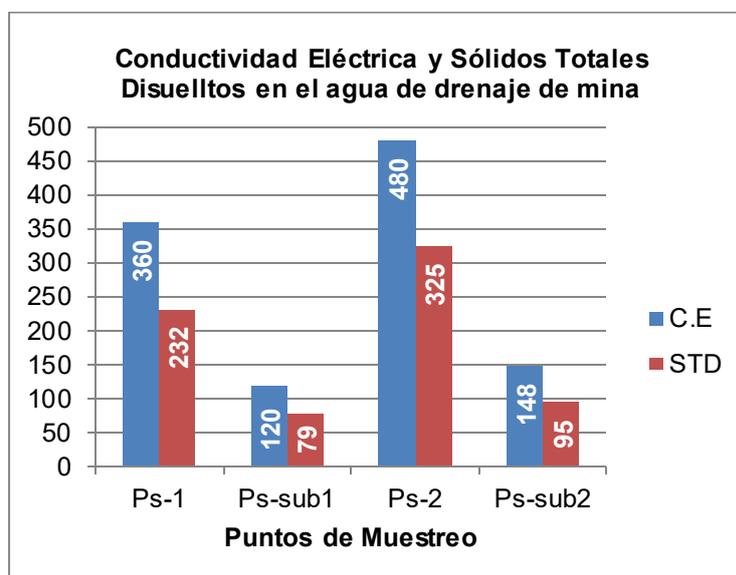


**Figura 4.6** Valores de pH en el agua de drenaje de mina.

**Fuente:** Galarza, B., Valverde, P., 2011.

Las conductividades eléctricas y los Sólidos Totales Disueltos de los puntos de agua Ps-1 y Ps-2 son mayores

con respecto a las muestras de agua de infiltración de las paredes de la mina, como se observa en la Figura 4.7.

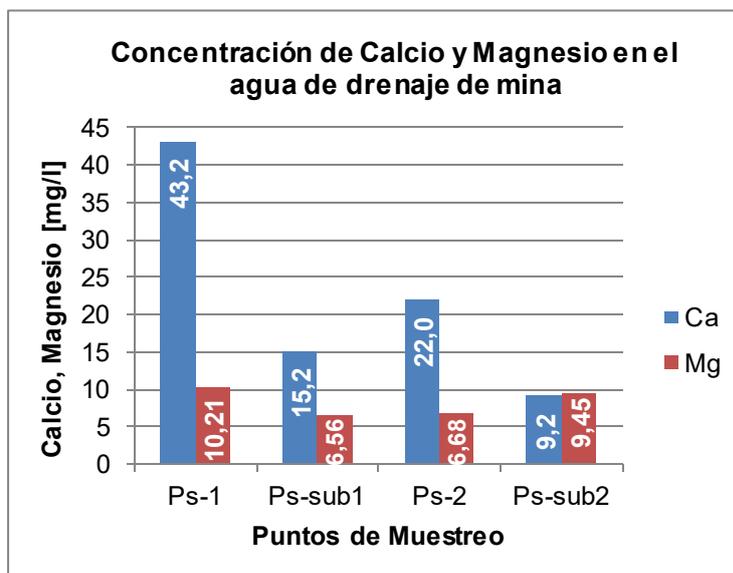


**Figura 4.7** Valores de Conductividad Eléctrica y Sólidos Totales Disueltos del agua de drenaje de mina.

**Fuente:** Galarza, B., Valverde, P., 2011.

Según la clasificación de dureza la muestra Ps-1 es considerada como dura mientras que el resto de muestras son consideradas como aguas blandas.

Se observa también en la Figura 4.8 que la concentración tanto de Calcio como de Magnesio es menor en las muestras de agua de infiltración (Ps-sub1 y Ps-sub2).



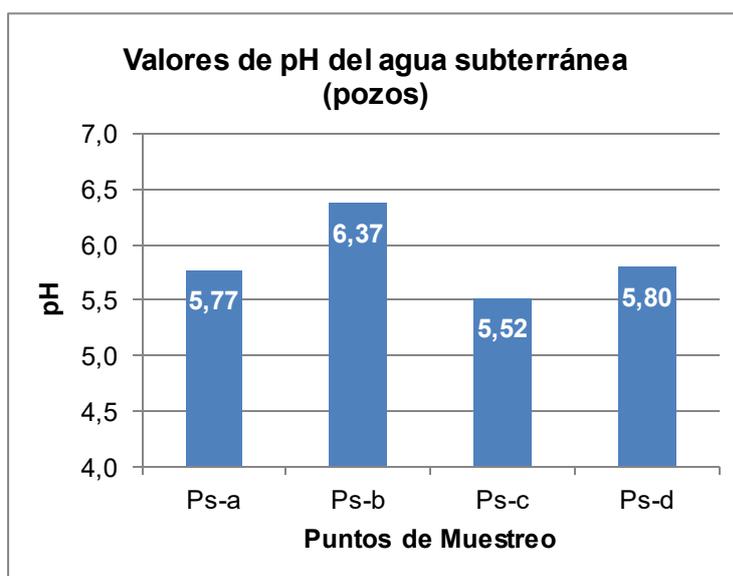
**Figura 4.8** Concentración de Calcio y Magnesio en el agua de drenaje de mina en el sector La López y San Francisco de Muyuyacu.  
**Fuente:** Galarza, B., Valverde, P., 2011.

La muestra Ps-1 presenta una elevada concentración de sulfatos de 62,53 mg/l a diferencia del resto de muestras de agua donde la concentración de sulfatos varía desde 2,88 mg/l a 10,1 mg/l.

En las muestras de agua de infiltración en las paredes de la mina, se detectaron niveles de hierro de 0,06 mg/l (Ps-sub1) y 0,016 mg/l (Ps-sub2) que puede deberse a la interacción agua-roca y a pesar de que el cobre es característico de la mineralización del sector, en ambas muestras de agua la concentración de Cobre se encuentra por debajo de 0,05 mg/l.

### Agua Subterránea (agua de pozo)

El agua subterránea dentro del área de estudio corresponde al sector de La Independencia. El pH del agua subterránea se caracteriza por ser ácido [14] y se observa en la Figura 4.9.



**Figura 4.9** Valores de pH en los pozos de agua subterránea muestreados en el sector de La Independencia.

**Fuente:** Galarza, B., Valverde, P., 2011.

La Conductividad Eléctrica en el agua subterránea varía desde 107,6  $\mu\text{s}/\text{cm}$  a 135  $\mu\text{s}/\text{cm}$ . Todas las muestras de agua son clasificadas como blandas debido a la baja concentración de dureza que presentan excepto la muestra de agua Ps-b que tiene una dureza de 86 mg/l y se clasifica como moderadamente dura. La facie hidroquímica del agua

subterránea en los cuatro puntos de muestreo es bicarbonatada magnésica cálcica.

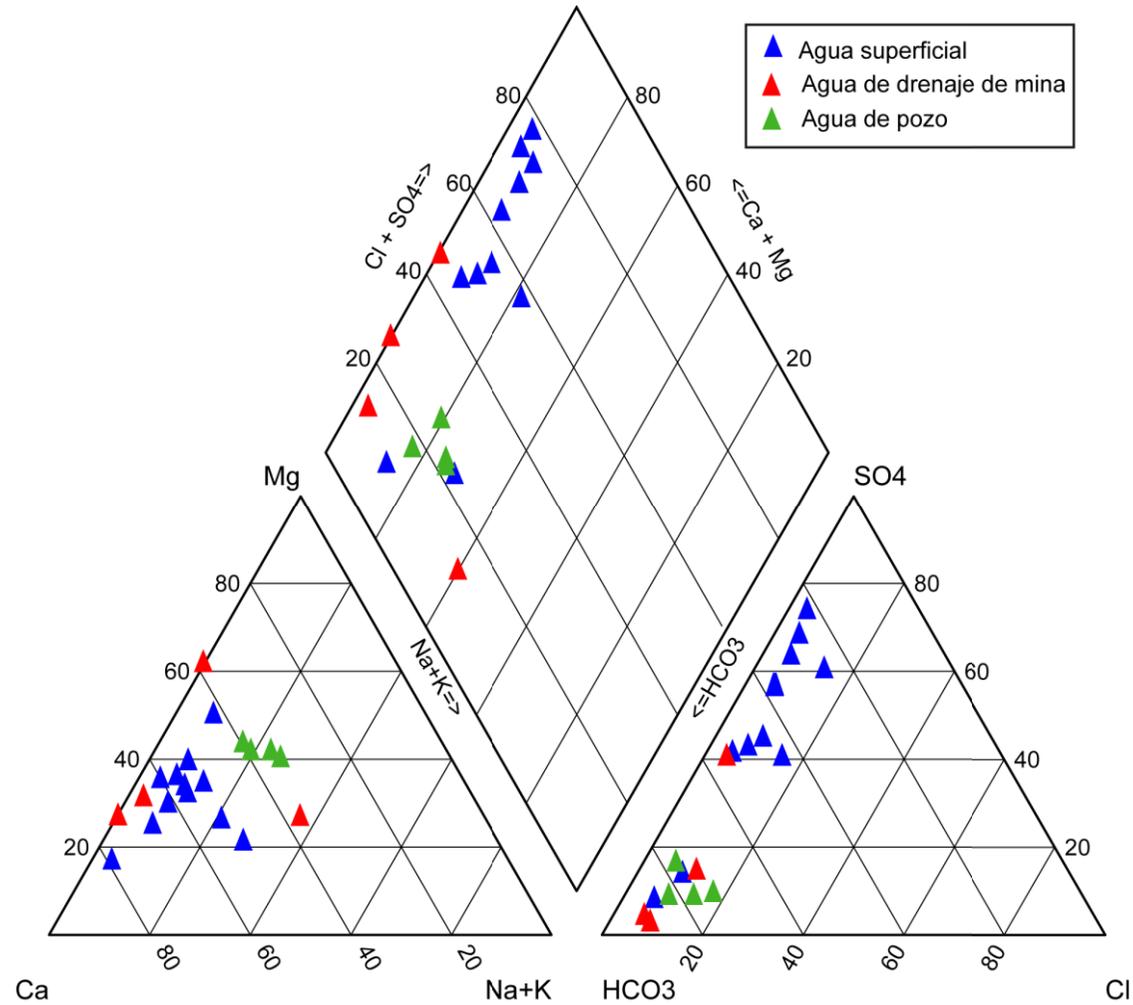
### **Diagrama de Piper**

En la Figura 4.10 se encuentra el diagrama de Piper donde se observan los tipos de agua características del sector de Ponce Enríquez.

En el triángulo aniónico se aprecia que todas las muestras de agua superficial excepto el agua del río Nueve de Octubre y Margarita tienen un porcentaje de concentración de  $\text{SO}_4^{-2}$  en meq/l entre 80% y 95%, mientras que el agua de drenaje de mina y la subterránea tienen porcentaje de concentración de  $\text{HCO}_3^{-1}$  en meq/l mayor al 70%.

En el triángulo que corresponde a los cationes, se observa que el agua superficial se ubica en la zona cálcica, y el agua subterránea en una zona intermedia donde existe influencia tanto del ión calcio como del ión magnesio.

En el rombo principal del diagrama de Piper se evidencia que el agua superficial se encuentra en la zona sulfatada cálcica-magnésica y el agua subterránea y de drenaje de mina en la bicarbonatada cálcica-magnésica.

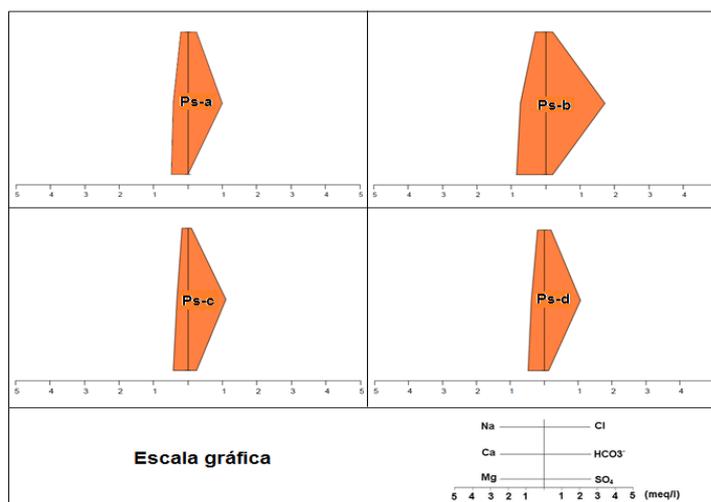


**Figura 4.10** Diagrama de Piper de agua superficial, de drenaje de mina y agua subterránea (pozos), en el sector de Ponce Enríquez.

**Fuente:** Galarza, B., Valverde, P., 2011.

## Diagramas de Stiff

Los Diagramas de Stiff del agua subterránea se presentan en la Figura 4.11.



**Figura 4.11** Diagrama de Stiff de los puntos de agua subterránea de pozo Ps-a, Ps-b, Ps-c, Ps-d  
**Fuente:** Galarza, B., Valverde, P., 2011.

Los diagramas de Stiff de los cuatro pozos de agua subterránea tienen similitud en su contenido catiónico como aniónico, presentando baja concentración de sulfatos, cloruros y sodio, y predominando los bicarbonatos y el magnesio, por lo cual se determina que la facie hidroquímica del agua subterránea del sector de la Independencia es bicarbonatada magnésica-cálcica.

En la Figura 4.12 se visualiza el mapa hidroquímico de la zona de estudio, en el cual se representan gráficamente las

facies hidroquímicas del río Siete y sus afluentes. La forma característica que tienen los Diagramas de Stiff facilita la identificación de mezclas de agua y la influencia que los afluentes ejercen en el río Siete.

El agua del río Siete es de carácter sulfatada bicarbonatada- cálcico magnésica en su inicio (Pe-2 y Pe-3) y bicarbonatada-sulfatada cálcico-magnésica en su tramo final (Pe-5 y Pe-8).

Todos los afluentes del río central de estudio son sulfatados-bicarbonatados cálcicos-magnésicos, excepto el río Nueve de Octubre y el río Margarita que son de carácter bicarbonatado cálcico-magnésico.

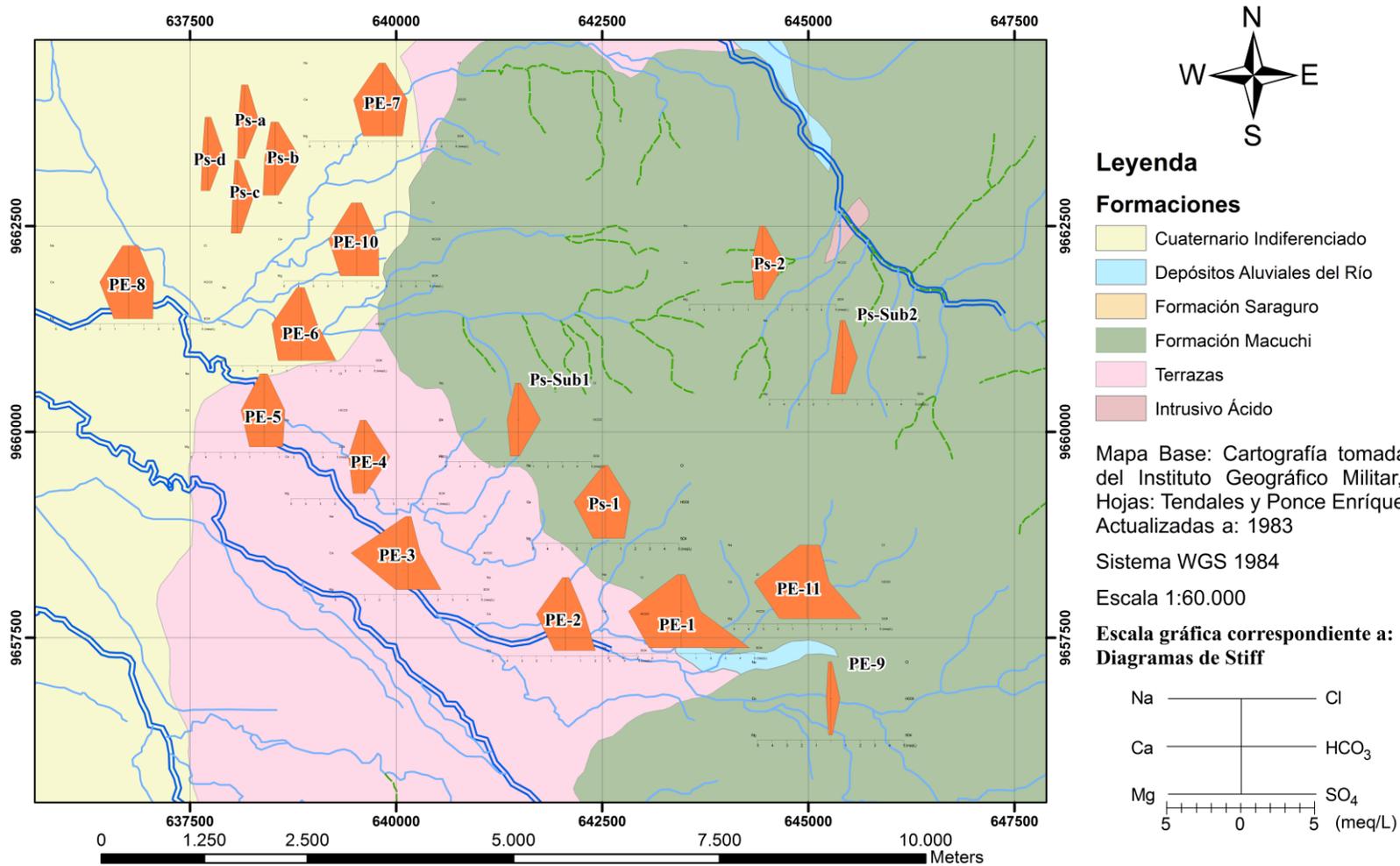
La forma que adoptan los Diagramas de Stiff en las estaciones de muestreo de la quebrada La Florida (Pe-1), río Siete (Pe-3) y unión de los ríos Guanache y Villa (Pe-6) son característicos en este estudio de las zonas más influenciadas por actividades mineras, en este caso la cooperativa Bella Rica (Pe-1 y Pe-6) y La López (Pe-3).

El río Siete en su punto de muestreo Pe-2 es una mezcla de agua que ha sido alterada en su composición natural por el drenaje de agua desde la quebrada La Florida

(predominando los  $\text{SO}_4^{-2}$ ), pero el mayor caudal que tiene el río Siete permite que se produzca dilución de las sustancias contaminantes, por lo que el diagrama de Stiff del punto Pe-2 se modifica y es diferente al diagrama del punto Pe-1.

El diagrama de Stiff del río Nueve de Octubre es similar al diagrama de las estaciones de muestreo Ps-sub1 y Ps-2, donde predominan los bicarbonatos y el calcio.

Las formas de los diagramas de Stiff del río Siete (Pe-5 y Pe-8) son similares a los diagramas del río Fermín (Pe-7 y Pe-10) donde la facie aniónica es bicarbonatada-sulfatada, sin embargo si el transporte de contaminantes desde los ríos Fermín, Guanache y Villa aumenta, existe la posibilidad de que los sulfatos predominen sobre los bicarbonatos a partir del punto Pe-8.



**Figura 4.12** Mapa hidroquímico del agua superficial, drenaje de mina y agua subterránea.

**Fuente:** Mapa base, cartografía tomada del Instituto Geográfico Militar.

**Modificado:** Galarza, B., Valverde, P., 2011.

## **Metales Pesados**

La toxicidad y biodisponibilidad de los metales/metaloides depende de su concentración en el agua y del entorno físico-químico del medio acuático. Los factores hidroquímicos más relevantes son, el pH que al ser ácido (por debajo de 6) [14] favorece la disolución de metales pesados, tiempo de exposición que en conjunto con la concentración de los metales/metaloides pueden causar en los organismos acuáticos efectos letales o sub-letales, materia orgánica ya que forma complejos metálicos orgánicos reduciendo la biodisponibilidad de los mismos para los organismos, y la dureza del agua ya que al ser considerada como dura requiere mayor concentración de contaminantes para causar afectación [21].

Los metales pesados pueden causar efectos negativos en los organismos acuáticos desde al plancton como hasta los organismos superiores de la cadena trófica, los efectos pueden ser tóxicos o letales y sub-letales que dependen de cada especie en específico pero que generalmente causan bioacumulación de elementos tóxicos en el hígado, músculos y tejidos, inhibición de la concentración de

proteínas necesarias para la vida e inhibición de las actividades enzimáticas en los organismos acuáticos [22].

El Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria, Libro VI, Anexo 1, Tabla 3 establece Límites Máximos Permisibles para metales como Arsénico, Cadmio, Cobre, Hierro, Mercurio y Zinc sin embargo no existe un LMP para el metal pesado Plomo, por lo cual se tomó como criterio de evaluación del Plomo el LMP establecido por la EPA de 0,0013 mg/l. Los resultados de los metales pesados analizados (Arsénico, Cadmio, Cobre, Mercurio, Plomo y Zinc) en el agua superficial y en el agua de drenaje de mina se muestran en la Tabla IX, dichas concentraciones se encuentran por debajo del límite de detección del método analítico utilizado.

**Tabla IX.** Concentración de metales pesados en el agua superficial y de drenaje de mina para los puntos analizados en el sector de estudio de Ponce Enríquez

<b>Metales pesados</b>	<b>Resultado de Concentración [mg/l]</b>
Arsénico	<0,01
Cadmio	<0,01
Cobre	<0,05
Mercurio	<0,0001
Plomo	<0,01
Zinc	<0,17

**Fuente:** Galarza, B., Valverde, P., 2011.

Un factor que modifica la concentración de contaminantes es el caudal de los cuerpos de agua, siendo importante conocer la estación de muestreo en que se realiza la toma de muestras; en los años 1996, 2002, 2008 y finalmente en el presente año se realizó la toma de muestras cuando el caudal es escaso, que comprende los meses de diciembre a mayo.

Los contaminantes que viajan en los sólidos en suspensión pueden depositarse e incorporarse en los sedimentos, acumulándose una mayor carga contaminante en ellos pero que puede ser nuevamente movilizada a la fase acuosa si las condiciones del medio lo propician como pH ácidos [23].

Los resultados de pH (de 6,18 a 7,40) de los cuerpos de agua superficial, así como su clasificación según la dureza (aguas duras) y temperatura ambiente (25,02 °C promedio mensual de diciembre desde 1999 al 2009), son favorables para que los metales en el agua sean menos tóxicos [24]; lo que es un resultado positivo para la fauna acuática que aún sobrevive en los afluentes y en el río de estudio principal; el agua del río Nueve de Octubre, río Margarita y el río Siete al ser considerada como moderadamente dura, los

microorganismos y organismos superiores acuáticos que habitan en ellos se encuentran más expuestos a los efectos tóxicos de los metales pesados.

En investigaciones realizadas en protozoarios propios de agua dulce se determinó el grado de toxicidad que tienen algunos metales pesados (Cadmio, Cobalto, Mercurio, Plomo y Zinc) en el agua, se encontró que el metal más tóxico para estos microorganismos es el Cadmio, seguido del Mercurio, Cobalto, Zinc y finalmente el Plomo. Para producir mortalidad en microorganismos acuáticos en aguas consideradas como duras se necesita siete veces más la concentración de Plomo que en aguas blandas, lo que se conoce como un efecto antagónico, pero el Mercurio exhibe otro tipo de comportamiento conocido como sinérgico, al presentar doble toxicidad [25].

Un estudio similar (agua dulce contaminada con plomo) fue realizado a través de la medición de la Demanda Química de Oxígeno, cuando la concentración de dureza en el agua alcanzó los 400 mg/l, el porcentaje de reducción de DQO fue de 28,56% [26].

La presencia de Calcio en el agua participa en la protección de la vida acuática ya que el Calcio y el Cadmio compiten por los lugares de captación en el cuerpo de los organismos ayudando a reducir la adsorción de este metal en las branquias de los organismos de agua dulce [21]. Interacciones similares han sido observadas en metales como el Zinc y el Cobre [27].

Mediante índices estadísticos se ha determinado que los metales acumulados en mayor grado en los tejidos de los peces son Zinc, Cadmio y Cobre. En las branquias y en los músculos se acumula el Zinc y el Cadmio, mientras que en el hígado de los organismos se acumula el Cobre [28]. Un alto coeficiente de correlación encontrado define que el Cobre se encuentra principalmente en los sólidos en suspensión más que en solución [29].

La máxima eficiencia de absorción de contaminantes se presenta en las branquias de los peces por su fisiología y anatomía, pero en el hígado también se acumulan grandes concentraciones de metales, finalmente los músculos son los que tienen la menor acumulación. Los metales como el

Cobre, el Mercurio y el Zinc pueden asociarse para producir un efecto tóxico aditivo en el agua [20].

Las algas experimentan efectos sub-letales ocasionados por la presencia de Cobre y Plomo, al alcanzar concentraciones de 12,74 mg/l y 45,70 mg/l respectivamente [22].

En el TULAS, Libro VI, Anexo 1, Tabla 3 no se estipula una concentración de Sulfatos indicada como tóxica, pero en trabajos previos de investigación se ha determinado la concentración de toxicidad crónica de acuerdo a la dureza del agua, al ser un agua blanda los Sulfatos son tóxicos a bajas concentraciones mientras que en aguas duras sucede el efecto contrario [30], lo que se ve resumido en la Tabla X.

**Tabla X.** Concentración de toxicidad crónica de Sulfatos de acuerdo a la Dureza del agua.

<b>Tipo de Agua</b>	<b>Sulfatos [mg/l]</b>
Blanda	129
Moderadamente dura	644
Dura	675

**Fuente:** Elphick, J., Davies, M., *et al.* 2010.

De acuerdo a ésta consideración, los Sulfatos en el río Siete y en sus afluentes no alcanzan valores de 644 mg/l, y los cuerpos de agua considerados como blandos de acuerdo al

contenido de Dureza no tienen una concentración de Sulfatos igual o superior de 129 mg/l, de modo que no se producen niveles de toxicidad crónicos en el agua.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos ha determinado Límites Máximos Permisibles para las concentraciones de metales pesados. Por encima de estos valores los metales pueden causar graves trastornos en los organismos acuáticos, y finalmente ocasionar la muerte a la vida acuática. En la tabla XI se presentan dichos límites para proteger la vida acuática en sistemas de agua dulce (ríos y lagos), los límites máximos establecidos varían de acuerdo a la dureza del agua.

La presencia de plomo en el agua es afectada por el calcio, carbonatos, alcalinidad, pH, carbono orgánico disuelto. Los carbonatos y el carbono orgánico disuelto son los responsables principales de que el Plomo se aleje de su especie iónica tóxica (Plomo +2) ya que forma complejos con ellos. El Calcio representa el principal competidor en los sitios activos de los organismos acuáticos por lo cual disminuye la biodisponibilidad de Plomo en el agua. También los iones hidrógeno parecen competir con él

(Plomo +2) cuando el pH es bajo hasta 5,5. La alcalinidad también provee protección contra el Plomo; lo cual es algo referencial ya que existen diferentes mecanismos de toxicidad entre las especies [27].

**Tabla XI.** Límites Máximos de la EPA de metales pesados para la protección de la vida acuática en agua dulce de acuerdo a la dureza del agua.

<b>Metal</b>	<b>Dureza del agua [mg/l]</b>	<b>Límite Máximo [µg/l]</b>
Arsénico	---	50
	50	0,66 (*)
Cadmio	150	1,10(*)
	200	2,00(*)
Cobre	50	6,50 (*)
	150	12,0 (*)
	200	21,0 (*)
Mercurio	---	0,012 (*)
	50	1,30 (*)
Plomo	150	3,20 (*)
	200	7,70 (*)
	50	180(#)
Zinc	150	320(#)
	200	570(#)

\*: Concentración promedio en 4 días, #: Niveles que no pueden excederse en ningún lapso de tiempo.

**Fuente:** Higuera, P. y Oyarzun, R. 2005.

En estudios anteriores se ha determinado que el cobre puede ser perjudicial para los organismos acuáticos cuando alcanza concentraciones de 0,5 mg/l a 0,75 mg/l [31].

### **Arsénico**

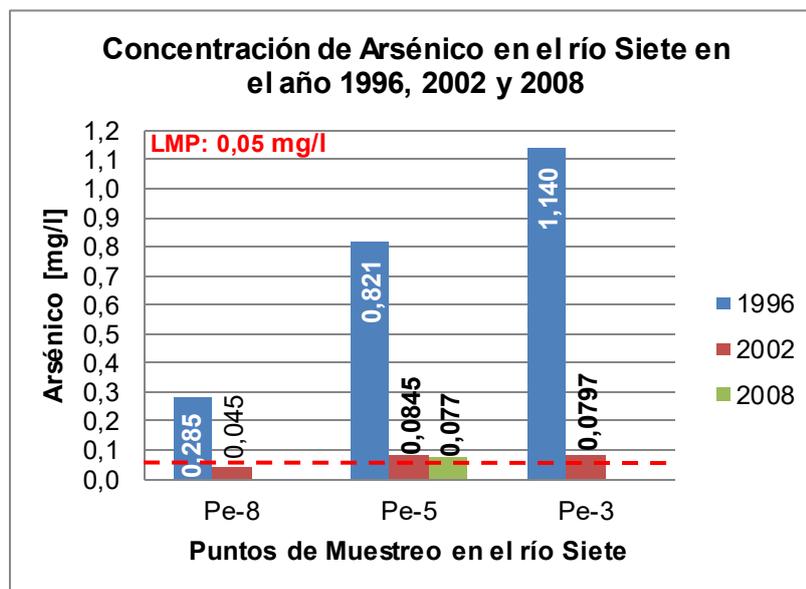
En el estudio realizado por PRODEMINCA se tomaron como criterios de evaluación lo establecido por la Agencia

Sueca de Protección Ambiental, la cual considera que cuando una concentración de algún elemento en el agua supera tres veces el valor de fondo existe una perturbación evidente en el medio acuático, mayor a diez veces el valor de fondo se considera una perturbación severa y concentraciones mayores a diez veces el valor de fondo es considerado como una perturbación muy severa [1].

El estudio de PRODEMINCA realizado en el período 1996 a 1998 estableció que la contaminación por Arsénico en el río Siete era muy elevada y los afluentes más afectados por el Arsénico fueron las quebradas El Paraíso y La Florida.

La variación temporal de este elemento durante los años 1996, 2002 y 2008 en el río Siete se observan en la Figura 4.13.

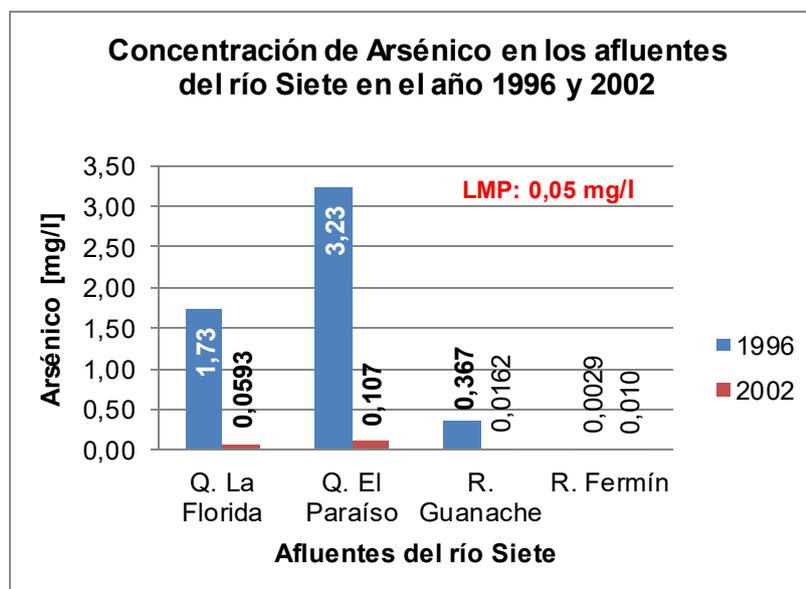
La concentración de Arsénico exhibe una tendencia a disminuir a través del tiempo, no obstante dichos contenidos de este metaloide en algunos puntos del río Siete superaron el LMP de 0,05 mg/l, establecido en TULAS, Libro VI, Anexo 1, Tabla 3.



**Figura 4.13** Concentración de Arsénico en el río Siete (período 1996-2008).

**Fuente:** Ministerio de Energía y Minas, 1998 y 2002, M.I. Municipalidad de Guayaquil, 2009.

En la Figura 4.14 se observa la variación de este metaloide en el agua de los afluentes del río Siete.



**Figura 4.14** Concentración de Arsénico en los afluentes del río Siete (período 1996-2002).

**Fuente:** Ministerio de Energía y Minas, 1998 y 2002.

El Examen especial al control de explotación minera realizado en el año 2002 en las cuencas de los ríos Santa Rosa, Caluguru, Gala, Tenguel y Siete a cargo de la Dirección Regional de Minería de El Oro, Ministerio del Ambiente y Ministerio de Energía y Minas del Ecuador, indica que el Arsénico se ha reducido considerablemente en el río Siete y sus cuerpos de agua tributarios, pero es importante recalcar que el río Fermín ha experimentado un aumento en la concentración de Arsénico de 0,0026 mg/l a 0,01 mg/l en el período de 1996 al 2002.

La concentración de Arsénico se monitoreó en la mitad del río Siete a la altura de San Miguel de Brazil como parte del Plan de Monitoreo de la calidad de los ríos Gala, Chico, Tenguel y Siete, en aguas de pozo, suelo, sedimentos y algunos productos agrícolas, en la parroquia Tenguel, desarrollado por la M.I. Municipalidad de Guayaquil en el año 2009, sin embargo en este estudio los afluentes del río Siete no fueron monitoreados, encontrando una concentración de 0,0765 mg/l en el mes de diciembre del 2008 y rebasó el Límite Máximo Permisible de 0,05 mg/l establecido en el Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria [16].

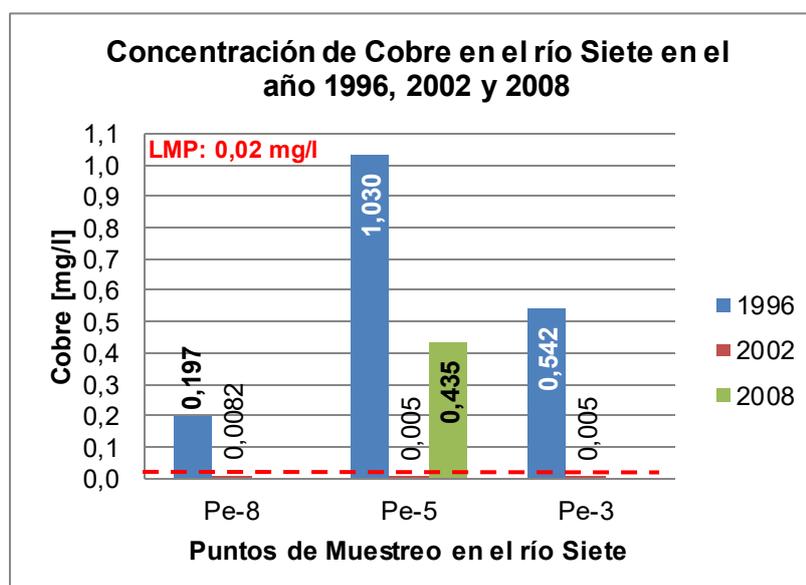
Actualmente la concentración de Arsénico en el río Siete y en los ríos Fermín, Guanache, Villa, Nueve de Octubre y en sus principales quebradas como La Florida y El Paraíso se encuentra por debajo de 0,01 mg/l, lo que asegura que sus concentraciones no son mayores a 0,05 mg/l, valor establecido como criterio ambiental para la preservación de la flora y fauna de agua dulce en el TULAS, Libro VI, Anexo 1, Tabla 3; adicionalmente la concentración encontrada en el estudio cumple con lo estipulado por la EPA como criterio para la protección de la flora y fauna acuática (ríos y lagos) cuyo valor es también de 0,05 mg/l de Arsénico.

### **Cobre**

El Cobre se encuentra presente en las colas de relaves y forma complejos metálicos con el cianuro de alta solubilidad [1].

La contaminación por Cobre en el río Siete fue considerada como muy elevada en el estudio de PRODEMİNCA en los años 1996 y 1998.

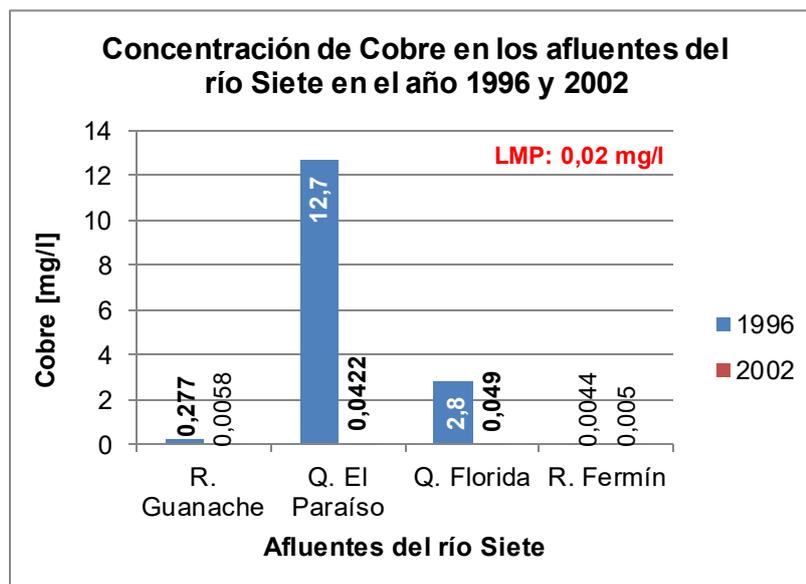
En la Figura 4.15 se observa la variación temporal del Cobre en el río Siete desde el año 1996 hasta el 2008, se evidencia que existe una disminución en la concentración del Cobre, pero ya en el año 2008 en el punto Pe-5 se encontró una concentración de 0,435 mg/l.



**Figura 4.15** Concentración de Cobre en el río Siete (período 1996-2008).

**Fuente:** Ministerio de Energía y Minas, 1998 y 2002. M.I. Municipalidad de Guayaquil, 2009.

En la Figura 4.16 se observa la variación de concentración de Cobre en los afluentes del río Siete que también presentan contenidos altos de Cobre, siendo los cuerpos de agua más afectados la quebrada La Florida con 2,8 mg/l y El Paraíso con 12,7 mg/l.



**Figura 4.16** Concentración de Cobre en los afluentes del río Siete (período 1996- 2002).

**Fuente:** Ministerio de Energía y Minas, 1998 y 2002.

En la actualidad el agua del río Siete y sus afluentes que han sido monitoreados tienen una concentración de Cobre menor a 0,05 mg/l, y de acuerdo a lo que establece la EPA no causa mayor afectación en el medio acuático ya que el Límite Máximo Permisible para Cobre es de 0,065 mg/l para aguas que tengan dureza igual o mayor a 50 mg/l (tabla X), a pesar de que los valores de Cobre en el agua cumplen lo que establece la EPA, no se puede conocer si la concentración de Cobre cumple con el TULAS, Libro VI, Anexo, Tabla 3, ya que se establece un Límite Máximo Permisible de 0,02 mg/l [16], que es menor al límite de detección del instrumento de análisis.

## Zinc

La concentración de Zinc en el río Siete y sus tributarios está por debajo de 0,17 mg/l; en el TULAS, Libro VI, Anexo 1, Tabla 3 se establece que para preservar la flora y fauna acuática, el nivel de Zinc no debe superar una concentración de 0,18 mg/l [16], además la EPA ha establecido el Límite Máximo Permisible para Zinc de acuerdo al contenido de dureza, cuando la dureza del agua es de 50 mg/l la concentración de Zinc no puede exceder los 0,18 mg/l y para una dureza de 150 mg/l el Límite Máximo Permisible es 0,320 mg/l (ver Tabla X).

La dureza del agua del río Siete y sus afluentes supera el valor de 50 mg/l, por lo cual éste metal actualmente no estaría causando efectos tóxicos adversos en los organismos acuáticos.

No existen registros de Zinc en los años 2008 y 2009, pero en el año 2002 las concentraciones de Zinc se mantienen por debajo del Límite Máximo Permisible establecido por el TULAS, Libro VI, Anexo 1, Tabla 3 y la EPA, sin embargo los organismos vertebrados son más sensibles que los organismos bentónicos, es así que los vertebrados

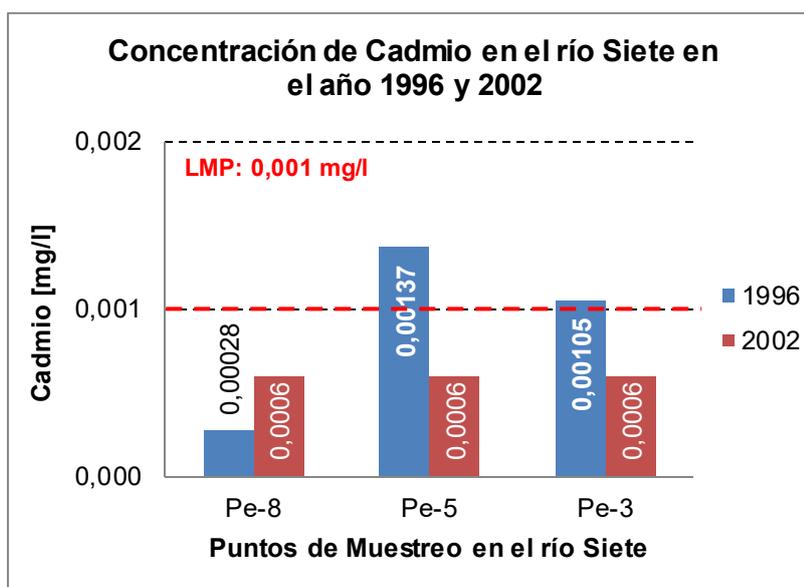
acuáticos experimentan efectos letales cuando el Zinc alcanza una concentración de 166 µg/l y los organismos bentónicos al superar una concentración de 167000 µg/l [32].

El Zinc fue monitoreado en el río Siete desde el año 1996 hasta el 2002 el cual ha disminuido de concentración, alcanzando un nivel máximo de 0,014 mg/l que no rebasa el Límite Máximo Permisible establecido en el TULAS, Libro VI, Anexo, Tabla 3 para preservar la vida acuática [16].

### **Plomo y Cadmio**

Con respecto al Cadmio y Plomo que son metales no elementales es decir que no participan en las funciones biológicas de los organismos, actualmente no se puede conocer la afectación en el medio acuático, ya que los límites de detección son mayores a los límites máximos permisibles establecidos tanto por la EPA como en el TULAS, Libro VI, Anexo 1, Tabla 3. En el estudio de PRODEMINCA del año 1998 la contaminación por Plomo estuvo considerada como muy elevada mientras que la contaminación por Cadmio se consideró elevada [1].

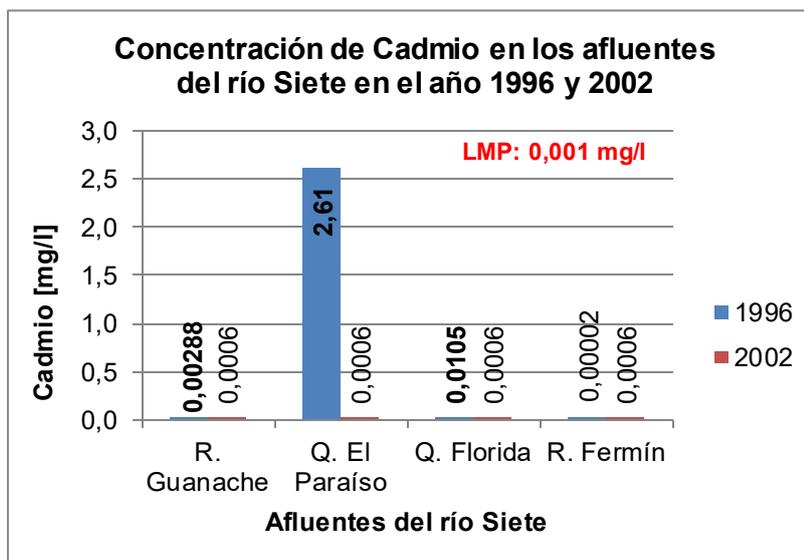
Existe una tendencia de disminución de Cadmio en el río Siete desde el año 1996 hasta el año 2002 (Figura 4.17) y en el 2009 el contenido de este metal en la mitad del río Siete (Pe-5) se mantiene por debajo de 0,00001 mg/l.



**Figura 4.17** Concentración de Cadmio en el río Siete (período 1996-2002).

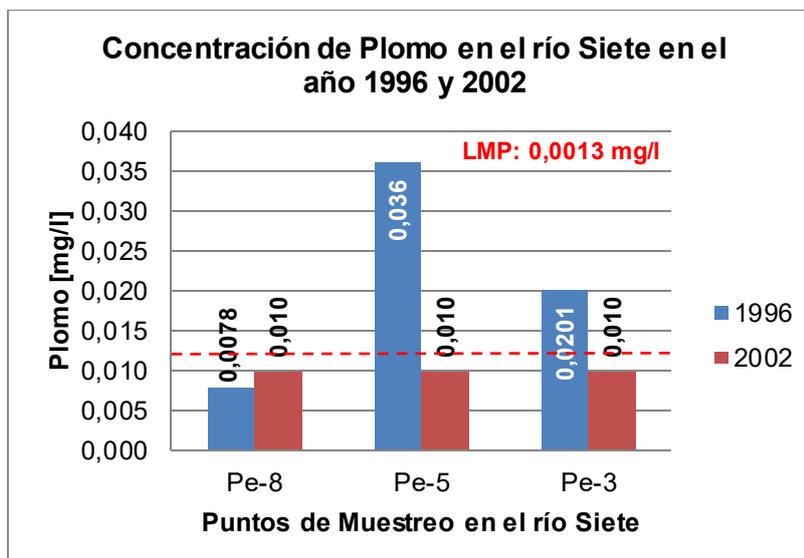
**Fuente:** Ministerio de Energía y Minas, 1998 y 2002.

Los afluentes del río Siete que tuvieron las concentraciones más altas de Cadmio fueron la quebrada El Paraíso, río Guanache y la quebrada La Florida y en el año 2002 los contenidos de Cadmio disminuyeron como puede observarse en la Figura 4.18.

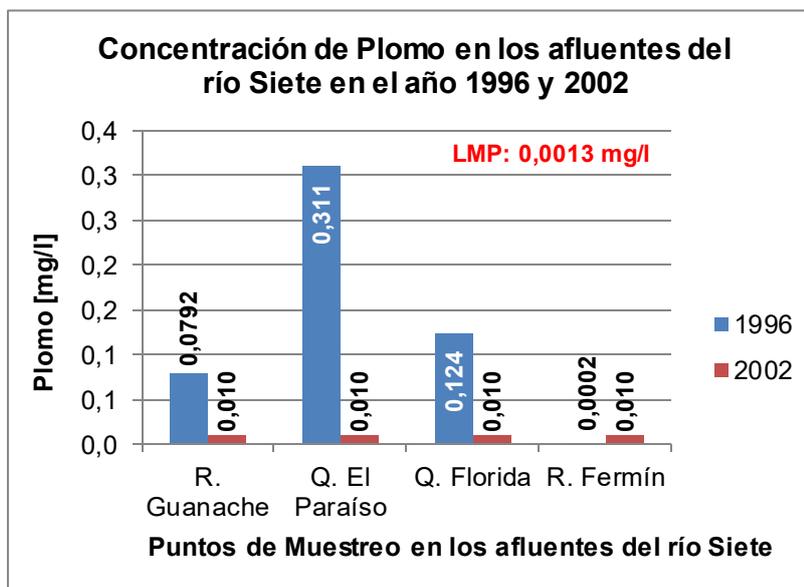


**Figura 4.18** Concentración de Cadmio en los afluentes del río Siete (período 1996- 2002).  
**Fuente:** Ministerio de Energía y Minas, 1998 y 2002.

En la Figura 4.19 se observa que las concentraciones de Plomo en el río Siete en los puntos Pe-3 y Pe-5 son altas y rebasaron el LMP de la EPA.



**Figura 4.19** Concentración de Plomo en el río (período 1996- 2002).  
**Fuente:** Ministerio de Energía y Minas, 1998 y 2002.



**Figura 4.20** Concentración de Plomo en los afluentes del río Siete (período 1996-2002).

**Fuente:** Ministerio de Energía y Minas, 1998 y 2002.

A pesar de que en el año 2002 (Figura 4.20) el Plomo disminuye a 0,010 mg/l en todos los puntos de muestreo, dicha concentración rebasa casi 10 veces el LMP establecido por la EPA de 0,0013 mg/l.

El estudio del año 2008 tiene límites de detección más sensibles que pueden analizar valores por debajo de 0,00001 mg/l, el Plomo se mantiene por debajo de este límite, sin embargo en época lluviosa se llegó a detectar un valor de 0,00343 mg/l que causó afectación al medio acuático.

En la presente fecha no es posible conocer si las concentraciones de Plomo en el agua superan lo establecido por la EPA (0,0013 mg/l de plomo en agua) [40] ya que el límite de detección de análisis fue de 0,01 mg/l.

Lo mismo ocurre con el Cadmio ya que se registraron valores menores a 0,01 mg/l en el río Siete y sus cuerpos de agua tributarios, el LMP que establece el TULAS, Libro VI, Anexo 1, Tabla 3 es de 0,001 mg/l.

### **Mercurio**

De acuerdo a los resultados del estudio de PRODEMINCA la contaminación por Mercurio estuvo considerada como muy elevada. En el año 1996 el Mercurio fue analizado en la mitad del río Siete (Pe-5) con una concentración de 0,019 mg/l, lo cual rebasa 95 veces el LMP de 0,0002 mg/l establecido en el TULAS, Libro VI, Anexo 1, Tabla 3 [16].

El estero Guanache y Fermín presentan una concentración alta de Mercurio de 0,001 mg/l, que rebasó el LMP de 0,0002 mg/l.

En el año 2008 el Mercurio durante la época seca se mantiene en valores por debajo de 0,0002 mg/l que

cumpliría con el Límite Máximo Permisible establecido en TULAS, Libro VI, Anexo 1, Tabla 3, pero se observa un incremento en el mes de marzo del 2009 alcanzando una concentración de 0,0037 mg/l, que sobrepasa el Límite Máximo Permisible.

En la actualidad el Mercurio se encuentra en todos los puntos muestreados por debajo de 0,0001 mg/l y cumple con el LMP de 0,0002 mg/l estipulado en el TULAS, Libro VI, Anexo 1, Tabla 3 [16].

En la tabla XII se observan las concentraciones de metales pesados en el agua encontrados en el año 2008, en la mitad del río Siete (Pe-5).

**Tabla XII.** Concentración de metales pesados en el período 2008-2009 en el río Siete (Pe-5) a la altura de San Miguel de Brazil, sector de Ponce Enríquez.

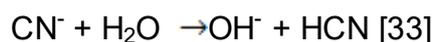
<b>San Miguel de Brazil (período 2008-2009)</b>		
<b>Metales Pesados</b>	<b>Seca [mg/l]</b>	<b>Lluviosa [mg/l]</b>
Arsénico	<b>0,077</b>	<0,005
Cadmio	<0,0001	<0,0001
Cobre	<b>0,435</b>	<b>0,200</b>
Mercurio	<0,0002	<b>0,0037</b>
Plomo	<0,00001	<b>0,00343</b>

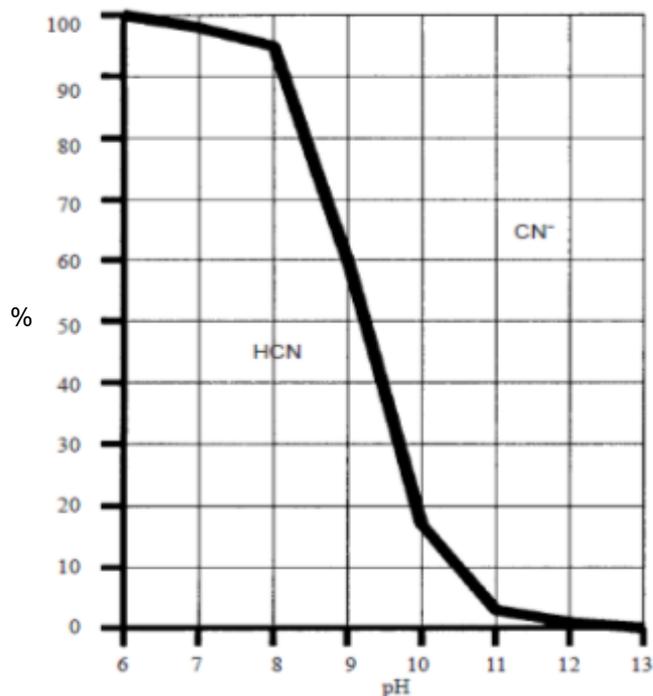
**Fuente:** M.I. Municipalidad de Guayaquil, 2009

### Cianuro Total

Se conoce como cianuro libre a la suma del ión cianuro ( $\text{CN}^{-1}$ ) y al ácido cianhídrico ( $\text{HCN}_{\text{ac}}$ ) y como cianuro total a la suma de las diferentes formas de cianuro de un sistema [33].

El ión cianuro ( $\text{CN}^{-1}$ ) puede combinarse con el hidrógeno para formar ácido cianhídrico ( $\text{HCN}_{\text{ac}}$ ) y también puede combinarse con metales iónicos para formar sales durante el proceso de lixiviación, cuando las colas mineras son descargadas a un cuerpo de agua que tiene condiciones de neutralidad se producen reacciones de hidrólisis que pueden generar ácido cianhídrico (99%) como se observa en la Figura 4.21 y, en la ecuación se muestra la reacción.





**Figura 4.21** Relación entre el HCN con el CN<sup>-</sup> y con el pH.

**Fuente:** Revista Geológica de América Central, 1996.

Los complejos de cianuro en el ambiente son menos tóxicos que el cianuro libre, pero los complejos de cobre y zinc son los más inestables en la naturaleza y pueden liberar nuevamente al ambiente lo que se conoce como cianuro libre. Los cianuros de hierro son los más abundantes en la naturaleza pero son susceptibles a degradación fotoquímica y también pueden liberar iones cianuro cuando están expuestos a luz ultravioleta. Los cianuros pueden formar

precipitados con el hierro, cobre, magnesio, cadmio y zinc en un rango de pH desde 2 a 11 [33].

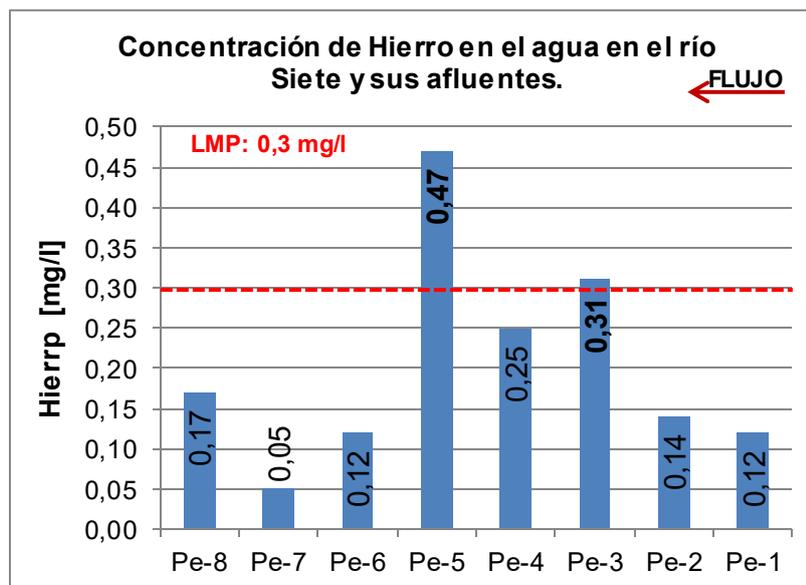
Los complejos de cianuro son absorbidos fuertemente en materia orgánica y cuando el cianuro reacciona con especies de sulfuros pueden formarse especies menos tóxicas como los tiocianatos. En los sistemas ambientales en este caso un río, el cianuro libre está en un 99% en forma de ácido cianhídrico, convirtiéndose lentamente en cianuro de hidrógeno gaseoso [33].

En el caso del Cianuro Total, los niveles detectados en el río Siete (puntos Pe-2, Pe-3 y Pe-8) superan el LMP establecido por la EPA que es de 5,2 µg/l [1], evidenciando que el cianuro presente en las colas de cianuración son transportados al río formando complejos metálicos. De los afluentes del río Siete, sólo la quebrada La Florida supera también el LMP de la EPA, mientras que la concentración de cianuro total en el resto de afluentes se encuentra por debajo del LMP estipulado.

La degradación natural del cianuro origina compuestos como bicarbonatos y amoníaco [23], este último de interés toxicológico que debería ser incluido en un futuro estudio.

## Hierro

En la Figura 4.22, se observan las concentraciones de hierro en el área de estudio del agua superficial.

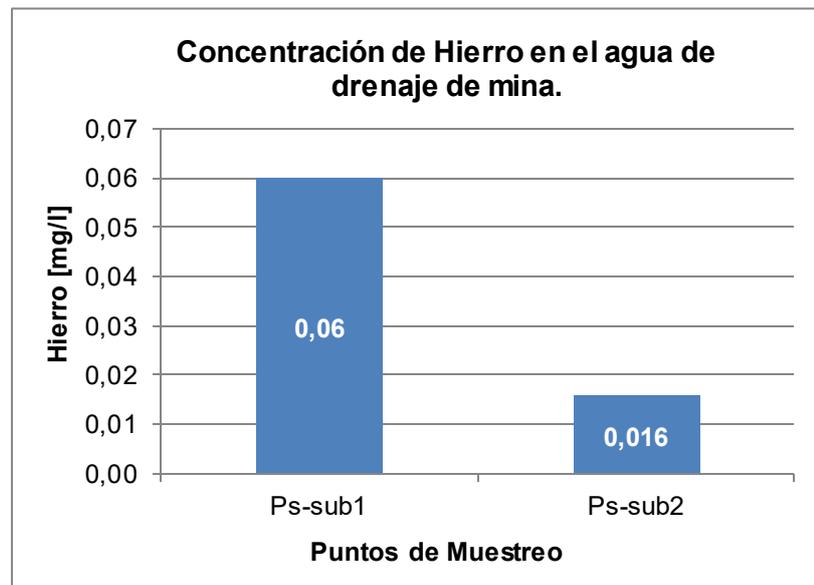


**Figura 4.22** Concentración de Hierro en el agua superficial del río Siete y sus afluentes.

**Fuente:** Galarza, B., Valverde, P., 2011.

En la gráfica se puede observar que en el punto Pe-5 existe una cantidad mayor de hierro con respecto a los demás puntos de muestreo, y la concentración de cobre sobrepasa el límite máximo permisible de 0,3 mg/l del TULAS, Libro VI, Anexo 1, Tabla 3 [16].

En la Figura 4.23 se muestran los resultados de las concentraciones de hierro del agua de drenaje de mina.



**Figura 4.23** Concentración de Hierro en el agua de drenaje de mina de infiltración en el sector de Ponce Enríquez.

**Fuente:** Galarza, B., Valverde, P., 2011.

Las concentraciones de hierro en el agua de drenaje de mina son bajas, menores a 0,06 mg/l de hierro.

No se detectó presencia de pesticidas organoclorados y fosforados en el sector agrícola que se encuentra a orillas del río Siete, pero éste resultado es puntual, lo cual significa que en otros sitios del área de Ponce Enríquez podría existir este tipo de contaminación.

#### 4.1.2 Evaluación microbiológica

El análisis microbiológico de aguas permite determinar la presencia de organismos patógenos como bacterias bacilares, aeróbicas, facultativas anaeróbicas y Gram-negativas.

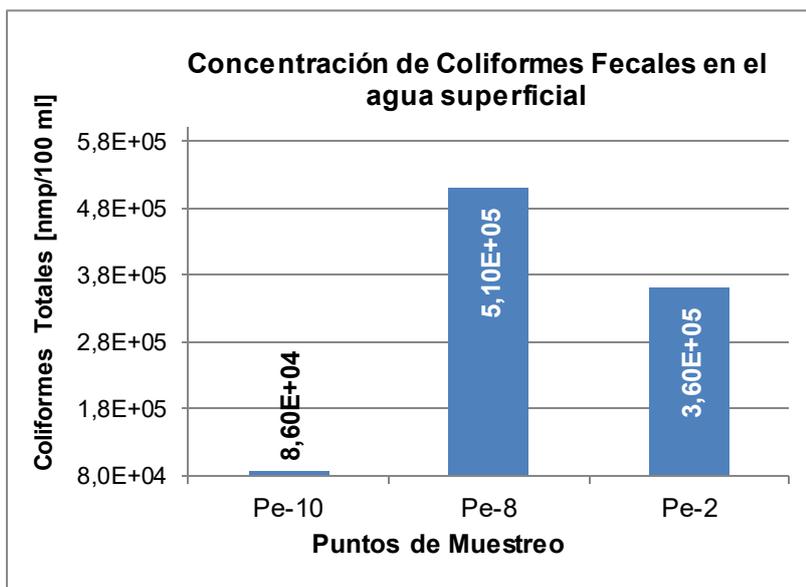
Como parte del análisis microbiológico se realizó la determinación del grupo Coliformes Totales y Coliformes Fecales; éste último es un subgrupo de Coliformes Totales y ambos son bacterias capaces de fermentar la lactosa con producción de ácidos y gases, el grupo de Coliformes fecales está formado por un 95% de *Escherichia Coli* y algunas especies de *Klebsiella*, mientras que las bacterias pertenecientes al grupo de Coliformes Totales son en total la *Enterobacter*, *Citrobacter*, *Escherichia Coli* y *Klebsiella* [34].

La concentración promedio de organismos coliformes que cada ser humano produce varía entre  $125 \times 10^9$  nmp/100 ml y  $400 \times 10^9$  nmp/100ml al día, la presencia de coliformes se considera un indicador de la existencia de polución fecal.

La existencia de coliformes en agua superficial no solo es debida a excrementos humanos sino también a excrementos de animales de sangre caliente, sangre fría y coliformes en el suelo [34].

A continuación se presentan los resultados del análisis microbiológico correspondiente a la cantidad de Coliformes Fecales y Coliformes Totales en los puntos de muestreo seleccionados para dichos análisis.

Los resultados de los análisis bacteriológicos indican que el agua del río Siete se encuentra contaminada por Coliformes Fecales, en la Figura 4.24 se observan dichos resultados, el inicio del río (Pe-2) posee una concentración de  $3,6 \times 10^5$  nmp/100 ml y el punto final de muestreo (Pe-8) presenta una concentración de  $8,3 \times 10^7$  nmp/100 ml lo que denota un aumento de este tipo de contaminación, debido a los asentamientos poblacionales que se encuentran a largo del río Siete. Además desde el río Fermín incorpora una concentración alta de Coliformes Fecales siendo de  $8,6 \times 10^4$  nmp/100 ml.



**Figura 4.24** Concentración de Coliformes Fecales del agua superficial del río Siete (Pe-2, Pe-8) y del río Fermín (Pe-10).

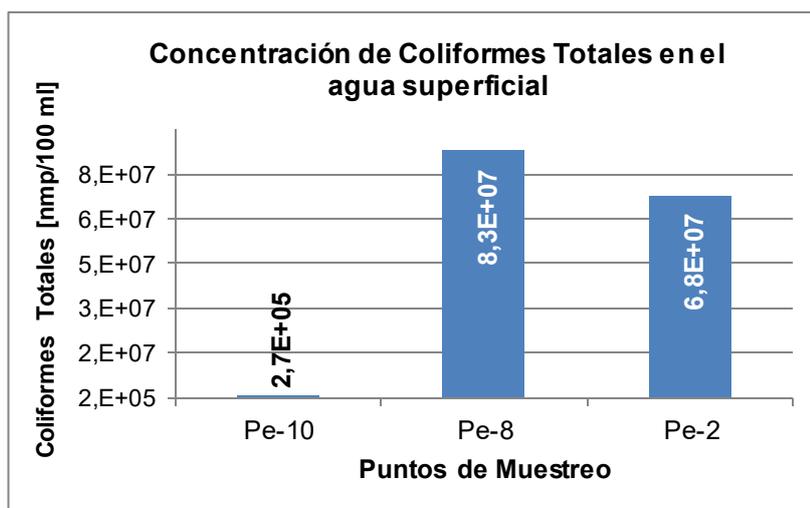
**Fuente:** Galarza, B., Valverde, P., 2011.

El límite máximo permisible establecido en el TULAS, Libro VI, Anexo 1, Tabla 3 es de 200 nmp/100 ml, de acuerdo a esto la concentración de Coliformes Fecales del punto Pe-2 excede 1800 veces este criterio y el punto de agua Pe-8 2550 veces.

El agua del río Fermín excede 430 veces el LMP establecido en el TULAS, Libro VI, Anexo 1, Tabla 3.

En las estaciones Pe-2 y Pe-8 (río Siete) se obtuvo una concentración de  $6,8 \times 10^7$  nmp/100 ml y  $8,3 \times 10^7$  nmp/100 ml de Coliformes Totales, respectivamente, como se aprecia en

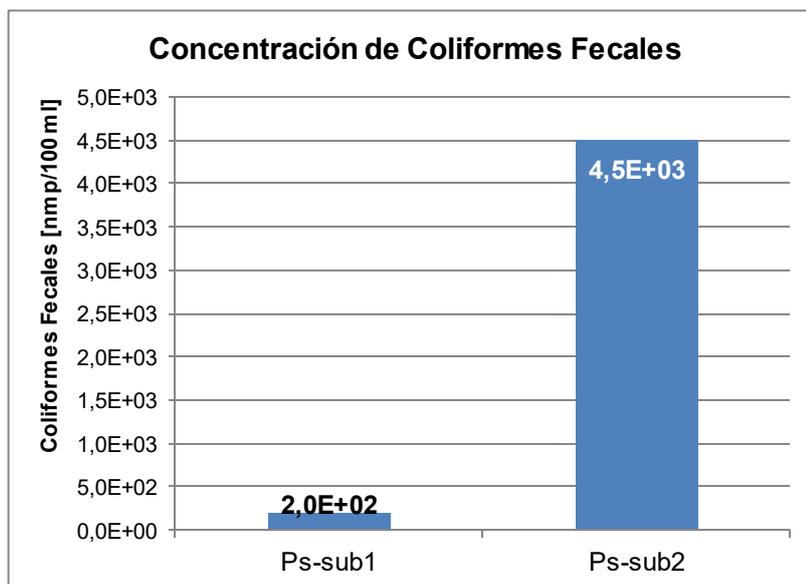
la Figura 4.25, de modo que aguas abajo del río Siete existe una tendencia a aumentar la contaminación fecal. Las aguas del río Fermín tienen una concentración de  $2,7 \times 10^5$  nmp/100 ml de coliformes totales.



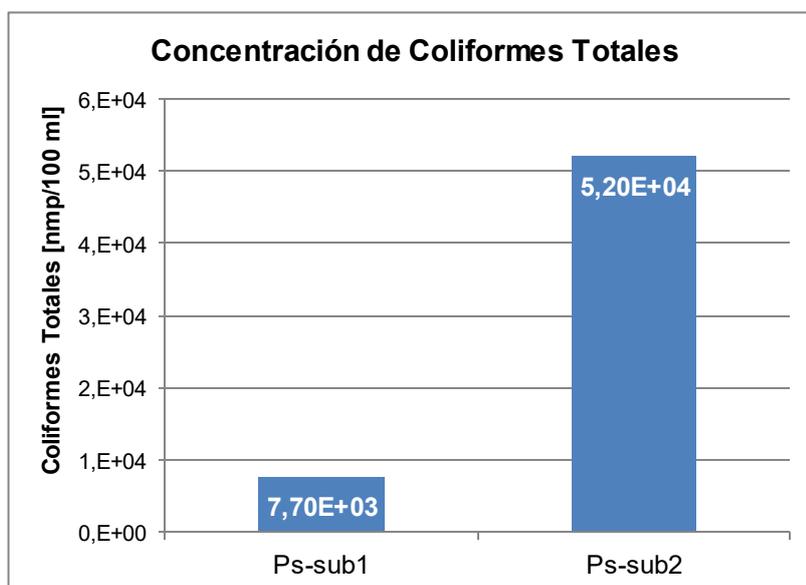
**Figura 4.25** Concentración de Coliformes Totales del agua superficial del río Siete (Pe-2, Pe-8) y en el río Fermín (Pe-10).

**Fuente:** Galarza, B., Valverde, P., 2011.

El agua de drenaje de mina de infiltración en las paredes se ha visto afectada también por contaminación fecal, así lo demuestran los resultados de la Figura 4.26 y 4.27, lo que puede deberse a que sólo el 36% de familias del sector tienen un servicio de red pública de alcantarillado, el resto de familias utilizan letrinas o pozos sépticos [5].



**Figura 4.26** Concentración de Coliformes Fecales en el agua de drenaje de mina de infiltración.  
**Fuente:** Galarza, B., Valverde, P., 2011.



**Figura 4.27** Concentración de Coliformes Totales en el agua de drenaje de mina de infiltración.  
**Fuente:** Galarza, B., Valverde, P., 2011.

El agua subterránea también fue analizada, y se encontraron valores altos de contaminación por coliformes, es así que la

concentración de coliformes totales en el agua subterránea varía desde  $5,4 \times 10^5$  nmp/100 ml hasta  $5,87 \times 10^5$  nmp/100 ml; debido a que las personas que poseen dichos pozos manifestaron que utilizan el agua para consumo humano y uso doméstico, se utilizó lo establecido en el TULAS, Libro VI, Anexo 1, Tabla 2 - Límites Máximos Permisibles para aguas de consumo humano y uso doméstico que únicamente requieran desinfección. El LMP es de 50 nmp/100 ml, observando que el agua de todos los pozos se encuentra ampliamente contaminada por coliformes totales.

En el sector urbano de Ponce Enríquez se analizó el contenido de coliformes totales de una muestra de agua que distribuye la Municipalidad de Ponce Enríquez, en la cual el resultado fue ausencia de coliformes totales, evidenciando que el tratamiento que recibe el agua para eliminar este tipo de bacterias es eficiente.

#### **4.1.3 Evaluación isotópica**

Los isótopos ambientales son de gran utilidad en la realización de estudios hidrogeológicos ya que se comportan como trazadores naturales y ayudan a determinar su movimiento natural a través del ciclo hidrológico [35].

En el presente trabajo se estudiaron los isótopos ambientales estables que son el Oxígeno-18 y el Deuterio, en el equipo láser ubicado en el Laboratorio del Medio Ambiente 2 del Instituto de Ciencias Químicas y Ambientales (ICQA); el equipo calcula el valor numérico de la abundancia de isótopos en tanto por mil ya que los valores en términos isotópicos son pequeños y la presentación de resultados de esa forma facilita el procesamiento de datos e interpretación.

El equipo láser de isótopos calcula un valor conocido como Delta de Oxígeno-18 ( $\delta^{18}\text{O}$ ) y Delta de Deuterio ( $\delta^2\text{H}$ ) valores que son obtenidos a partir de la comparación entre el contenido de isótopos en una muestra de agua y el estándar nacional utilizado; los valores isotópicos de los estándares nacionales han sido previamente comparados con los estándares internacionales proporcionados por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). Los estándares nacionales fueron tomados de tres provincias del país que son provincia del Azuay-El Cajas, provincia de Santa Elena-Playas y provincia del Guayas-Tres Postes.

El contenido isotópico de un determinado lugar depende de dos aspectos situación regional y situación local, dentro del primer aspecto se contempla la latitud, longitud y continentalidad del país

donde se realizará el estudio mientras que en la situación local se debe poner énfasis en la época del año, altitud, temperatura y evaporación desde los cuerpos de agua dulce de un sector específico.

El Ecuador se encuentra ubicado en la latitud 0° y longitud 0 metros de manera que la situación regional no afectará de forma significativa el análisis de isótopos pero con respecto a la situación local se registraron promedios mensuales como precipitación de 200 mm, 86% de humedad relativa, evaporación potencial de 90 mm y temperatura de 25,02°C. La altitud es también un factor importante con respecto al agua de lluvia ya que una disminución en la presión requiere un descenso mayor en la temperatura para poder alcanzar una presión de vapor de agua saturada lo que facilita nuevamente el proceso de evaporación en las gotas de lluvia, haciendo que el agua sea de carácter empobrecida.

En el Anexo C se observa la desviación estándar de los estándares nacionales; los cuales se encuentran dentro del margen máximo de error que permite el programa de cálculo de isótopos proporcionado por el Organismo Internacional de Energía Atómica, con lo que se asegura confiabilidad en los resultados analíticos del equipo. Ecuador no cuenta con datos para establecer su Línea Meteorica

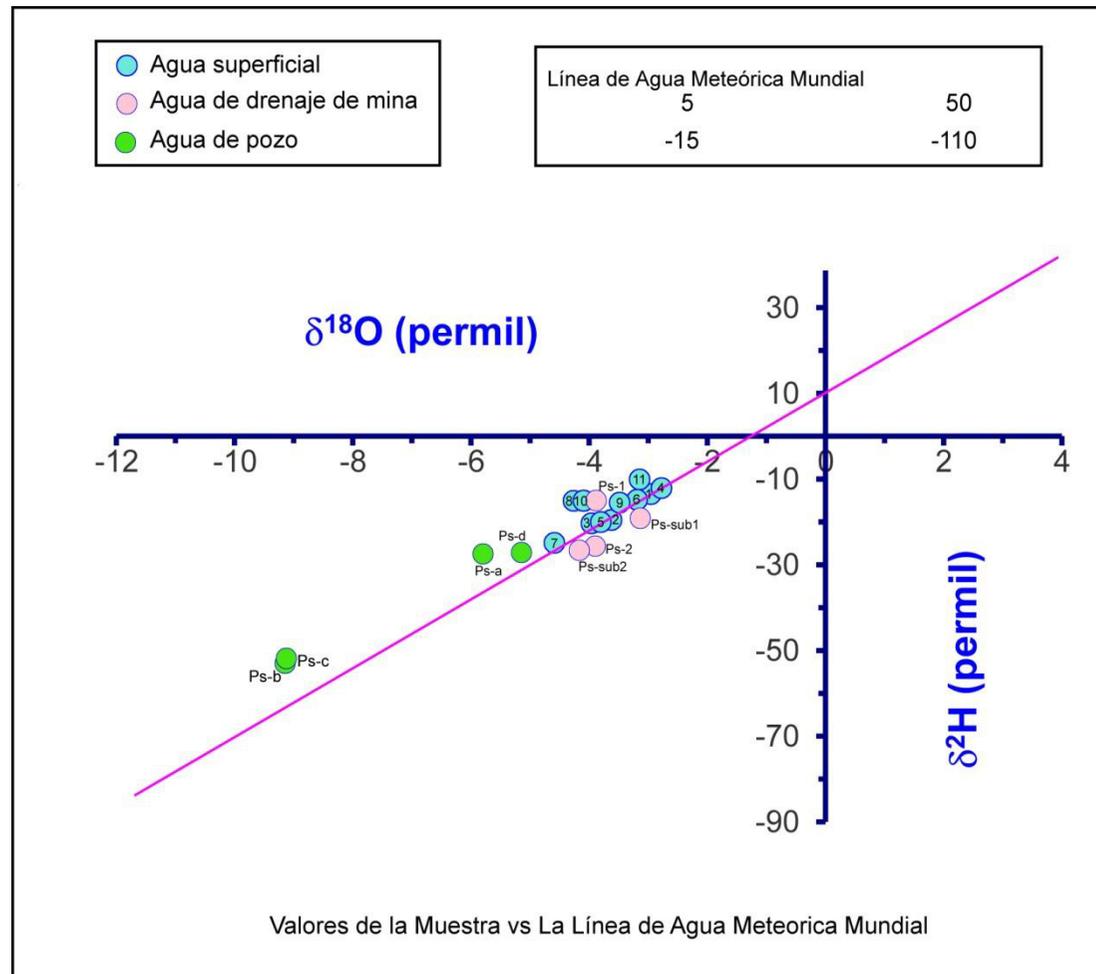
Local por lo que se trabajará con la Línea Meteorica Mundial como se muestra en el Figura 4.28. En el Anexo E se ilustra de manera más puntual la gráfica de los análisis isotópicos. Los resultados isotópicos se adjuntan en la tabla XIII analizados en el equipo láser de isótopos.

**Tabla XIII.** Resultados de análisis isotópicos Oxígeno-18 y Deuterio.

Resultados		Organismo Internacional de Energía Atómica			
Número de Muestra	Nombre de Muestra	$\delta^2\text{H}$ Valor reportado (por mil)	$\delta^2\text{H}$ Desviación Estándar (por mil)	$\delta^{18}\text{O}$ Valor Reportado (por mil)	$\delta^{18}\text{O}$ Desviación Estándar (por mil)
1	Pe-1	-14,15	0,24	-2,96	0,02
2	Pe-2	-19,55	0,13	-3,76	0,04
3	Pe-3	-19,68	0,13	-3,96	0,02
4	Pe-4	-12,08	0,13	-2,82	0,07
5	Pe-5	-19,36	0,07	-3,85	0,04
6	Pe-6	-14,80	0,36	-3,19	0,05
7	Pe-7	-24,88	0,16	-4,59	0,13
8	Pe-8	-15,71	0,58	-4,21	0,08
9	Pe-9	-18,77	0,90	-3,41	0,11
10	Pe-10	-15,52	0,29	-4,04	0,06
11	Pe-11	-16,04	0,84	-3,06	0,04
12	Ps-1	-15,81	0,17	-3,90	0,14
13	Ps-sub1	-19,13	0,59	-3,13	0,12
14	Ps-2	-25,64	0,34	-3,90	0,15
15	Ps-sub2	-26,59	0,94	-4,17	0,27
16	Ps-a	-27,60	0,00	-5,86	0,00
17	Ps-b	-53,00	2,40	-9,15	0,52
18	Ps-c	-51,84	1,90	-9,12	0,24
19	Ps-d	-27,14	2,29	-5,14	0,23

**Fuente:** Modificado de la hoja electrónica del OIEA, 2011.

Los resultados isotópicos se visualizan en la Figura 4.28 analizados en el equipo láser de isótopos.



**Figura 4.28** Resultados de Oxígeno 18 vs. Deuterio, Línea Meteorica Mundial.

**Fuente:** Modificado de la hoja electrónica de OIEA.

#### 4.1.3.1 Interpretación Isotópica

El agua del sector de Ponce Enríquez es considerada como ligeramente enriquecida, ya que los resultados del análisis isotópico mostraron valores poco alejados del contenido altamente enriquecido en isótopos en estudio (0‰ de Deuterio y 0‰ de Oxígeno-18). Las composiciones isotópicas del área de estudio consideradas como ligeramente enriquecidas varían desde -26,59‰ a -12,08‰ para el Deuterio y -2,82‰ a -4,17‰ para el Oxígeno-18.

La composición isotópica que tienen los afluentes del río Siete puede deberse a efectos meteorológicos como el bajo nivel de precipitación y caudal escaso de los cuerpos de agua; características propias del mes en que se realizó el muestreo.

Se conoce principalmente que el agua procedente de un río debe tener relaciones de abundancia isotópica igual a la de la Línea Meteórica Mundial, lo cual se cumple en todos los puntos de agua superficial del estudio, excepto en el último punto de muestreo del río Siete que corresponde al punto Pe-8 (ver Figura 3.5), esto puede deberse a la mezcla de agua que existe entre el río Siete, río Guanache y Fermín.

Los puntos de muestreo en el río Siete presentan composiciones isotópicas similares, el agua de las quebrada Florida, el Paraíso y el río Guanache que son afluentes del río Siete tienen una composición isotópica semejante, lo que denotaría una procedencia de la misma fuente, que en este caso corresponde al área de drenaje de Bella Rica.

El punto inicial de muestreo del río Siete (Pe-2) con una composición isotópica de  $-19,55\text{‰}$  de Deuterio y  $-2,96\text{‰}$  de Oxígeno-18, difiere del contenido de isótopos que tiene la quebrada La Florida ( $-14,15\text{‰}$  de Deuterio y  $-2,96\text{‰}$  de Oxígeno-18), y al parecer el río Siete se ve más influenciado por el río Margarita que tiene una composición de isótopos similar a la del punto Pe-2.

De la misma forma, el agua del río Nueve de Octubre con una composición isotópica de  $-12,08\text{‰}$  de Deuterio y  $-2,82\text{‰}$  de Oxígeno-18 tiene poca incidencia sobre el río Siete ya que este último tiene una concentración de isótopos de  $-19,36\text{‰}$  de Deuterio y de  $-3,85\text{‰}$  de Oxígeno-18.

La composición isotópica del agua de drenaje de mina tomada en la comunidad San Francisco de Muyuyacu presenta similitud a los valores isotópicos del río Fermín, a diferencia del agua de drenaje de mina del sector de La López que tiene semejanza con la concentración de isótopos que presenta el río Siete (Pe-2, Pe-3, Pe-5).

La composición isotópica similar entre el río Guanache (-14,80‰ de Deuterio y -3,19 de Oxígeno-18) y el río Siete en su punto Pe-8 (-15,71‰ de Deuterio y -4,71‰ de Oxígeno-18) indica que este río tiene influencia sobre el río Siete, sin embargo la influencia del río Fermín (Pe-10) es mayor de acuerdo a lo observado en los diagramas de Stiff.

Dos pozos de agua subterránea se caracterizan por tener similitud en su composición isotópica, presentando valores de -53,00‰ para Deuterio y -9,15‰ para Oxígeno-18 en el pozo Ps-b, de la misma forma -51,84‰ para Deuterio y -9,12‰ para Oxígeno-18 para el pozo Ps-c. La composición isotópica del agua de estos pozos es empobrecida en comparación con las demás muestras de agua analizadas, lo que puede deberse a que la muestra de agua fue tomada en época de lluvia.

Los pozos de agua subterránea Ps-a y Ps-d, presentan una composición isotópica similar al agua de drenaje de mina del sector San Francisco de Muyuyacu (Ps-sub2), lo que representaría una posible conexión hídrica entre estos sectores.

#### **4.2 Identificación de fuentes contaminantes**

La principal fuente de contaminación en el río Siete es la actividad minera que se realiza en el campamento minero de Bella Rica donde las quebradas que reciben los afluentes provenientes de los procesos de beneficio tienen altos niveles de contaminación; el sector minero de La López y de La Independencia también son fuentes de contaminación en menor proporción para este río.

La quebrada La Florida es el cuerpo de agua más contaminado por la actividad minera que proviene de la zona de Bella Rica, porque tiene la concentración más alta de sulfatos de 223,68 mg/l que indica la incorporación de grandes cantidades de colas de relaves mineros, elevada C.E. debido a la gran cantidad de sales disueltas, concentraciones altas de Calcio (72 mg/l) y Magnesio (26,74 mg/l) que indican disolución de minerales alcalinos durante las reacciones de neutralización.

El agua de la quebrada La Florida tiene el mayor valor de Demanda Química de Oxígeno (127 mg/l) lo que corrobora que el agua se encuentra mayormente contaminada por materia inorgánica no biodegradable, siendo además el valor de DQO más alto de toda el área de estudio.

En cuanto a la contaminación por la presencia de Arsénico, Mercurio y Zinc en el agua de la quebrada La Florida de acuerdo a lo que establece el TULAS, Libro VI, Anexo 1, Tabla 3, estos parámetros se encuentran por debajo del Límite Máximo Permisible, a diferencia de los resultados obtenidos en el año 1996 donde se catalogó al agua de esta quebrada como densamente contaminada [1].

La quebrada La Florida ha sido uno de los cuerpos de agua más contaminados por Cobre con 2,8 mg/l en el año 1996 y 0,049 mg/l en el año 2002. En la actualidad la concentración de Cobre al ser menor a 0,05 mg/l cumple con el Límite Máximo Permisible de 0,065 mg/l establecido por la Agencia de Protección Ambiental para preservar la Flora y Fauna acuática de agua dulce (ríos y lagos).

La quebrada El Paraíso es el segundo cuerpo de agua más contaminado del sector, así lo indica el aumento de sulfatos desde el año 2002 con 41 mg/l hasta la presente fecha con 177,60 mg/l, la conductividad eléctrica es de 629  $\mu\text{s}/\text{cm}$  que se aleja del valor de fondo de 81  $\mu\text{s}/\text{cm}$  y la

concentración de los Sólidos Totales Disueltos son de 442 mg/ alejada de 65 mg/l que es el valor de fondo de STD. Este cuerpo de agua tiene la segunda concentración más alta de Calcio (72 mg/l) y Magnesio (22,8 mg/l), por lo tanto también presenta una elevada dureza (275 mg/l). El pH del agua no se encuentra afectado por los efectos de la contaminación ya que estos se atenúan debido a la elevada alcalinidad que presenta el agua de 75 mg/l.

Otra fuente de contaminación importante es la confluencia de los ríos Guanache y Villa ya que la concentración de Sulfatos (tercera más alta) es de 114,24 mg/l y está alejada del valor de fondo que corresponde a 1mg/l. Los elevados valores de Conductividad Eléctrica, Sólidos Totales Disueltos y Sulfatos indican el incremento de la contaminación originada por la adición de compuestos inorgánicos, especialmente sales, que provienen de las colas de relaves que se disponen de las actividades mineras. Así la facie hidroquímica del agua es sulfatada-bicarbonatada cálcico-magnésico, demostrando una alteración en su composición natural por las actividades de pequeña minería y minería artesanal del sector.

La contaminación por Arsénico, Mercurio y Zinc en la confluencia del río Guanache y Villa desde el año 1996 hasta la actualidad exhiben la misma tendencia de la quebrada La Florida en disminuir dichas

concentraciones. El Cobre en el año 2002 tuvo una concentración de 0,0058 mg/l y actualmente es menor a 0,05 mg/l cumpliendo con el Límite Máximo Permisible establecido por la Agencia de Protección Ambiental de 0,065 mg/l.

Las aguas del río Fermín son otra fuente de contaminación por actividades mineras artesanales que se llevan a cabo en la comunidad de La Independencia, a pesar de que en el año 1996 se consideró que el río Fermín tenía una contaminación muy baja o ausente [1], actualmente la contaminación por minería se ha incrementado, así lo indica el aumento de la cantidad de sulfatos de 25 mg/l (1996) a 65,28 mg/l, además la Demanda Química de Oxígeno con 95 mg/l es más alta que la Demanda Química de Oxígeno de la intersección del río Guanache y Villa.

Los análisis bacteriológicos realizados al inicio y final del río Siete demuestran que la red de saneamiento de aguas servidas del cantón de Ponce Enríquez es deficiente, ya que solo el 36% de la población se encuentra conectada a la red pública de suministro de agua y alcantarillado, el 46% tiene pozo séptico, el 7% tiene pozo ciego, el 3% descarga sus desechos directo al río, lago o quebrada, el 1% de la población posee letrina y el 7% no tiene ningún tipo de servicio [5],

convirtiendo a la contaminación bacteriológica en otra importante fuente de contaminación para el agua del sector.

Los niveles de coliformes fecales y coliformes totales son altos, y sobrepasan los Límites Máximos Permisibles establecidos en el TULAS, Libro VI, Anexo 1, Tabla 3. Esta situación se incrementa al final del cauce del río Siete, específicamente en el punto Pe-8, donde la concentración de coliformes fecales supera 2550 veces el límite máximo permisible establecido en el TULAS, Libro VI, Anexo 1, Tabla 3 para la preservación de la flora y fauna acuática [16].

El agua de infiltración de las labores mineras del sector de estudio también se encuentra afectada por la presencia de coliformes, es así que el punto Ps-sub1 tiene una concentración de 200 nmp/100 ml de coliformes fecales y 4500 nmp/100 ml de coliformes totales. La concentración de coliformes en el punto Ps-sub2 es aún mayor, con 7700 nmp/100 ml de coliformes fecales y  $5,2 \times 10^4$  nmp/100 ml de coliformes totales.

El agua subterránea del sector La Independencia a la que se le realizó el análisis bacteriológico presenta contaminación de origen fecal encontrándose altas concentraciones de coliformes totales, que van desde  $5,49 \times 10^5$  hasta  $5,87 \times 10^5$  nmp/100ml. y supera el Límite Máximo Permisible establecido en el TULAS, Libro VI, Anexo 1, Tabla 2.

### 4.3 Análisis de los resultados

Los valores de fondo del sector de Ponce Enríquez de diferentes parámetros químicos dependen de la geología del lugar de estudio (formación Macuchi). En cuanto a la concentración de metales, las concentraciones son muy bajas en el orden de  $\mu\text{g/l}$  por lo cual la composición química y mineralógica de las rocas no aportan concentraciones altas de metales/metaloides al agua.

Los elevados valores de alcalinidad de los cuerpos de agua del sector que van desde 41 mg/ a 89 mg/l (en el río Siete) le confieren al agua propiedades amortiguadoras que mitigan los impactos más serios producidos por la inmisión de efluentes ácidos mediante reacciones de neutralización.

Los ríos Guanache, Villa quebrada La Florida y El Paraíso que son los cuerpos de agua que reciben descargas directas de efluentes mineros de la Cooperativa Bella Rica no reflejan un pH ácido porque los impactos más serios pueden ser eliminados por efectos de dilución y neutralización, debido a la presencia de carbonatos y otras sustancias alcalinas propias de la roca encajante. De esta forma el pH del río Siete no se ve afectado, variando desde 6,34 hasta 6,92.

El río Nueve de Octubre y Fermín son los que tienen la mayor capacidad amortiguadora debido al elevado contenido de alcalinidad (89 mg/l y 84,5

mg/l) y también de bicarbonatos (108,58 mg/l y 103,09 mg/l); mientras que el río Siete y el resto de los afluentes poseen una capacidad amortiguadora moderada.

El río Fermín tiene una capacidad alta para neutralizar ácidos, sin embargo la continua descarga indiscriminada de efluentes mineros sin tratamiento podría provocar que el medio natural pierda dicha propiedad, así lo demuestra el registro de pH de 6,18 del río Fermín que es el resultado más alejado del valor de fondo del sector de 7,8.

El agua del río Siete y de sus afluentes es catalogada como un agua dura o medianamente dura, producto de la disolución de minerales alcalinos que contienen Calcio y Magnesio. Este proceso se origina en los cuerpos de agua cercanos a las actividades mineras de la cooperativa Bella Rica que son la quebrada La Florida y El Paraíso, confluencia de los ríos Guanache y Villa y el río Fermín cercano a las actividades mineras de la parroquia La Independencia.

La firma isotópica a lo largo del río Siete es la misma a pesar de la incorporación de agua de la quebrada La Florida, El Paraíso y el río Nueve de Octubre, sin embargo varía en el último punto de muestreo del río, indicando que dicho punto de agua (Pe-8) se ve influenciado por el río Fermín debido a su composición isotópica similar y la similitud que

existe en la forma que adoptan los diagramas de Stiff de ambos puntos de agua.

La existencia de sulfatos en el río Siete como en sus afluentes es un claro indicador de contaminación por minería originada por la oxidación de sulfuros presentes típicamente en efluentes mineros.

La contaminación de la cooperativa Bella Rica reflejada en las concentraciones de sulfatos de la quebrada La Florida y El Paraíso ha aumentado 4 veces desde el año 2002, y en los ríos Guanache-Villa 1,5 veces. El río Fermín se ve afectado de la misma forma por la cantidad de sulfatos.

La baja concentración de sulfatos y de dureza en el agua de drenaje de mina y agua subterránea indican que no existe una alteración en la composición natural del agua. Además el pH del agua subterránea al presentar valores por debajo de 6, indicaría presencia de agua de reciente infiltración tanto en las labores mineras como en los pozos de abastecimiento. Las facies hidroquímicas del agua de drenaje de mina son bicarbonatada cálcica magnésica y del agua subterránea son bicarbonatada magnésica cálcica.

De acuerdo al Censo Poblacional realizado por Instituto Nacional de Estadística y Censos en la parroquia Camilo Ponce Enríquez solo el 36% de familias se encuentran conectadas a la red pública de alcantarillado

[5], lo que justifica el elevado valor de coliformes fecales y totales encontrada en el río Siete ya que los pozos sépticos, pozos ciegos y letrinas causan afectación al agua subterránea por la lixiviación/migración de materia contaminada hacia el manto acuífero, así lo corrobora las altas concentraciones de coliformes totales encontradas en el agua de pozo. A pesar de que el porcentaje de la población de Ponce Enríquez que dispone sus residuos sólidos en un río, quebrada, acequia o canal es de 2,9% también contribuye a la contaminación del río [5].

El 34,5% de familias (1445) reciben agua de un río, acequia o canal, y el 8,5% (359) utilizan agua de pozo para fines de uso doméstico y consumo humano [9]. Los resultados de los análisis bacteriológicos realizados a tres pozos de agua subterránea usados para consumo humano tienen concentraciones que van desde  $5,49 \times 10^5$  nmp/100ml. hasta  $5,87 \times 10^5$  nmp/100ml. de coliformes totales, que superan el Límite Máximo Permisible establecido en el TULAS, Libro VI, Anexo 1, Tabla 2, para aguas de consumo humano y uso doméstico que únicamente requieran desinfección.

Los metales pesados pueden causar efectos negativos a los organismos acuáticos desde plancton hasta organismos superiores de la cadena trófica, entre estos: efectos letales o mortalidad y efectos sub-letales como bioacumulación de elementos tóxicos en el hígado, músculos y

tejidos, inhibición de la concentración de proteínas necesarias para la vida e inhibición de las actividades enzimáticas [22].

Los resultados de pH de los cuerpos de agua estudiada, así como la dureza total (aguas duras y moderadamente duras) y condiciones de temperatura mensual promedio de 25,02 °C, son favorables para que los metales pesados no aumenten su toxicidad en el agua [25]. En estudios anteriores se ha determinado que se necesita siete veces más una concentración de Plomo para producir mortalidad en organismos acuáticos cuando el agua es clasificada como dura [26].

En el caso del Cianuro total, los niveles detectados en el río Siete superan el Límite Máximo Permisible (5,2 µg/l) establecido por la Agencia de Protección Ambiental [1], y la quebrada La Florida también supera el LMP de la EPA.

Es importante destacar que en periodos secos la carga contaminante puede disminuir debido a bajos caudales, así mismo los contaminantes transportados en suspensión pueden depositarse e incorporarse al sedimento correspondiente, donde se encontraría la mayor carga contaminante que puede ser nuevamente movilizada a la fase acuosa si las condiciones del medio lo propician, como pH ácidos y valores bajos de Potencial Redox [23].

# **CAPÍTULO 5**

## **DIAGNÓSTICO DE EFLUENTES MINEROS**

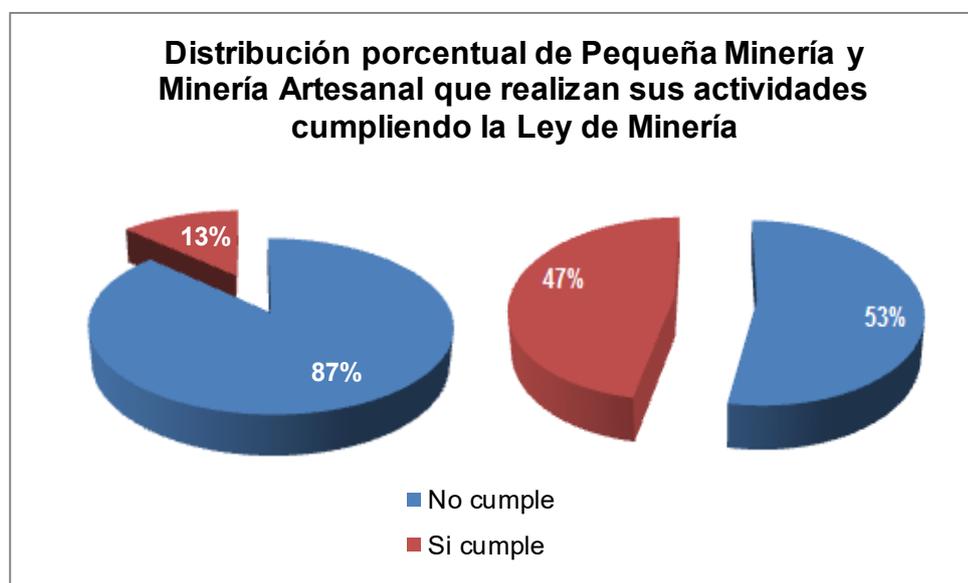
El presente capítulo trata sobre la gestión ambiental de los recursos hídricos que se realiza en el sector de estudio de Ponce Enríquez, a través de los resultados obtenidos del Diagnóstico de la pequeña minería y minería artesanal (51 empresas mineras) en la provincia del Azuay realizado por la Universidad de Cuenca mediante convenio con el Ministerio de Recursos Naturales no Renovables y el Instituto Nacional de Investigación Geológico, Minero, Metalúrgico (INIGEMM) en el año 2011.

Se incluyen dos casos de estudio de empresas de pequeña minería ubicadas en el distrito minero Ponce Enríquez en la comunidad La López, en los cuales se especifica el tratamiento químico y biológico que recibe el agua antes de ser descargada además del tratamiento aplicado al agua para recuperar cianuro y reutilizarlo. Además se recomiendan algunas medidas de prevención, control y mitigación básicas para atenuar la contaminación de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos.

### **5.1 Diagnóstico de la gestión de los recursos hídricos**

El tipo de minería que se realiza en el sector de Ponce Enríquez es en mayor porcentaje minería artesanal (86%) y en menor porcentaje pequeña minería (14%), ver Figura 2.5.

Se debe mencionar que el 100% de la pequeña minería y el 56,25% de la minería artesanal tienen el estudio de impacto ambiental aprobado por el Ministerio del Ambiente, que es la entidad encargada de la revisión y aceptación de estos estudios y la posterior emisión de la respectiva licencia ambiental. El 87% de la pequeña minería y el 53% de la minería artesanal realizan sus actividades de explotación y beneficio cumpliendo con la Ley de Minería (Título II, Capítulo III, Artículo 41 y Capítulo IV, Artículo 45) [39], para que los concesionarios mineros puedan llevar a cabo actividades de explotación y beneficio deben tener la licencia ambiental y cumplir con la normativa ambiental (TULAS, Reglamento Ambiental para las actividades mineras en la república del Ecuador, Capítulo VIII) (Ver Figura 5.1).

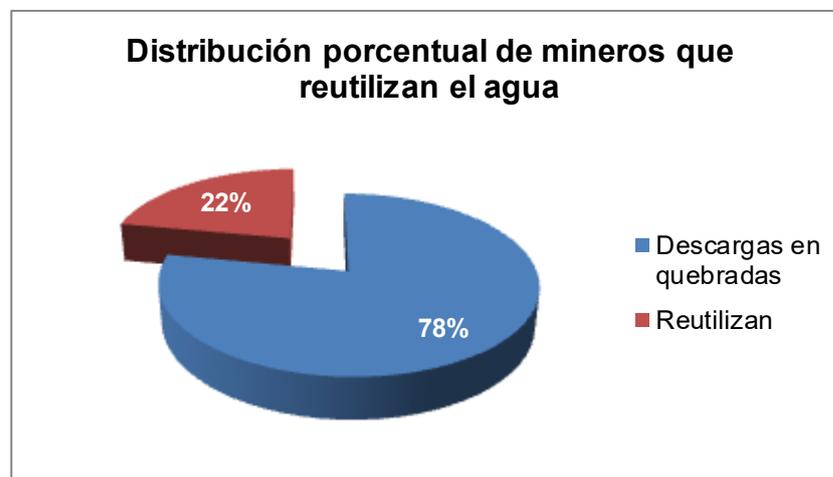


**Figura 5.1** Distribución porcentual de pequeña minería y minería artesanal que realizan sus actividades cumpliendo con la Ley de Minería.

**Fuente:** INIGEMM, 2011.

Del plan de manejo ambiental del agua que las empresas mineras deben desarrollar se conoce que el 88% de la pequeña minería y el 67% de la minería artesanal tienen programas de manejo de aguas negras, la forma en que disponen el agua es mediante pozos sépticos.

Sólo el 21,5% de los mineros de Ponce Enríquez reutilizan el agua que proviene del desagüe de la mina para crianza de tilapias, barrenación, lavado de minerales, molino y riego de huertos, mientras que el 78,5% la descarga en quebradas, ver Figura 5.2. El 62,5% de los pequeños mineros monitorea el agua de sus efluentes y el 75% les realiza análisis químico, mientras que sólo el 30% de los mineros artesanales monitorea el agua y realiza análisis químico.



**Figura 5.2** Distribución porcentual de mineros que reutilizan el agua en Ponce Enríquez.

**Fuente:** INIGEMM, 2011.

La Ley de Minería Título IV, Capítulo II (De la preservación del medio ambiente), Artículo 79 [39], obliga a los titulares de derechos mineros y

mineros artesanales a tratar el agua y devolverla a su cauce natural libre de contaminación o cumpliendo con los límites permisibles establecidos en la normativa ambiental, pese a lo que establece la ley sólo el 62% de la pequeña minería y el 67% de la minería artesanal tratan el agua que utilizan en sus labores mineras, como se muestra en las Figuras 5.3 y 5.4

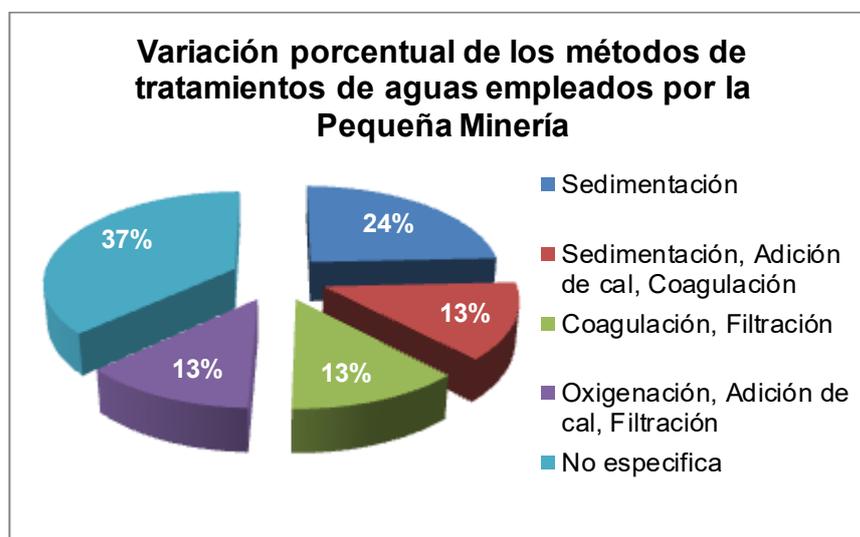


**Figura 5.3** Distribución porcentual de pequeña minería que realiza tratamiento al agua en Ponce Enríquez.  
**Fuente:** INIGEMM, 2011.

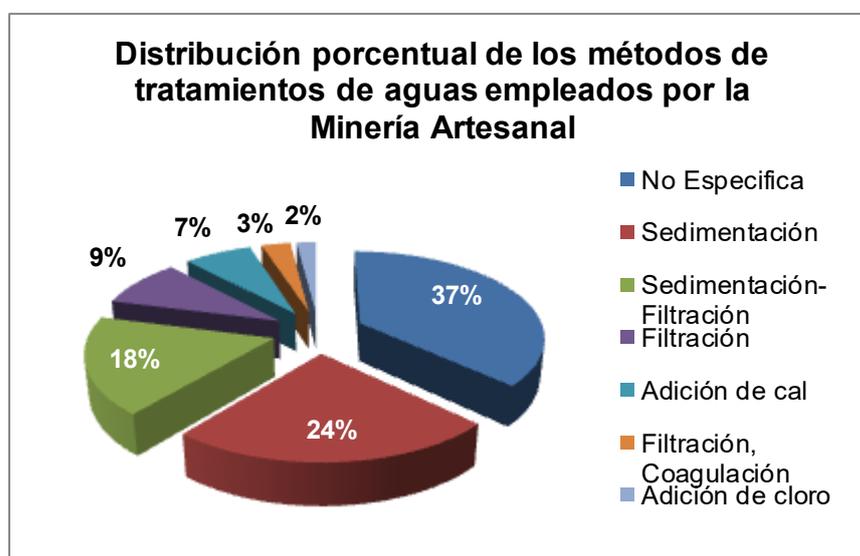


**Figura 5.4** Distribución porcentual de minería artesanal que realiza tratamiento al agua en Ponce Enríquez.  
**Fuente:** INIGEMM, 2011.

En las Figuras 5.5 y 5.6 se muestran los métodos de tratamiento de agua que el sector minero de Ponce Enríquez utiliza en la presente fecha.



**Figura 5.5** Distribución porcentual de los métodos de tratamiento de agua empleados por la Pequeña Minería, en el Sector de Ponce Enríquez.  
Fuente: INIGEMM, 2011.



**Figura 5.6** Distribución porcentual de los métodos de tratamiento de agua empleados por la Minería Artesanal, en el Sector de Ponce Enríquez.  
Fuente: INIGEMM, 2011.

La gestión de los efluentes mineros en el sector de Ponce Enríquez que realiza la pequeña minería, consiste en utilizar el proceso de sedimentación en un 25% (Figura 5.5), en el cual los sólidos suspendidos y agentes contaminantes que se encuentran en ellos se separan del agua al asentarse por gravedad. Toda instalación minera debe tener una piscina de sedimentación que esté diseñada de forma técnica apropiada para evitar el transporte de contaminantes hacia los cuerpos de agua superficial y subterráneos, además en la sedimentación por acción de la luz solar ciertos elementos como el Arsénico se pueden oxidar, favoreciendo su posterior remoción.

Debido a que el 25% de las empresas de pequeña minería se limita al proceso físico de sedimentación sin complementarlo con otro método de tratamiento, los metales presentes en el agua no son removidos de forma efectiva [36].

El proceso de adicionar cal o Hidróxido de Calcio al agua, es una de las técnicas más utilizadas para precipitar metales iónicos ya que estos forman hidróxidos metálicos de baja solubilidad [36], para realizar este proceso se debe mantener el pH en un rango de 8 a 11, sin embargo cuando el pH es de 10,5 la concentración del ión Calcio es mínima favoreciendo la formación de hidróxidos metálicos en el agua [37]. Además la adición de coagulantes como alumbre y sales de hierro

incrementan la remoción de los metales pesados, y el pH debe mantenerse mayor a 9,5. Finalmente los hidróxidos metálicos resultantes pueden separarse del agua mediante sedimentación [36].

En la Figura 5.5 se observa que el 14% de los pequeños mineros utilizan de forma secuencial la sedimentación, adición de cal y coagulación sin embargo, se desconoce si cumplen con las condiciones de operación necesarias para obtener alta eficiencia de remoción de contaminantes.

Se observa que el 13% de la pequeña minería oxigena, filtra y adiciona cal al agua, logrando que el Arsénico pase de su valencia más tóxica (+3) a Arsénico (+5) y pueda precipitarse por medio de la adición de cal, y luego ser retirados por medio de filtración [36].

El 12% de la pequeña minería emplean los métodos de coagulación y filtración, sin embargo la coagulación no puede remover los metales pesados del agua completamente, por lo cual es necesario que se complemente con otras técnicas de tratamiento [36].

De acuerdo a la Figura 5.6 se evidencia que un bajo porcentaje de mineros artesanales, 7% realiza la adición de cal, así mismo sólo el 3% añade coagulantes y filtra el agua; al realizar estos procesos de forma aislada no se alcanza una eficiencia adecuada.

El 24% de mineros artesanales tratan el agua por medio de piscinas de sedimentación, el 9% utiliza el proceso de filtración y el 18% combina ambos procesos físicos de separación (Figura 5.6).

El 38% de la pequeña minería y el 37% de la minería artesanal, no especifica el tipo de tratamiento de agua que utiliza para atenuar las concentraciones de metales pesados en el agua (Figuras 5.5 y 5.6).

En el sector de Ponce Enríquez, los pasivos ambientales constituyen una fuente importante de generación de contaminación para los cuerpos de agua superficial y subterráneos, pese a esto el 75% de la pequeña minería y el 65% de la minería artesanal poseen escombreras, de las cuales la mitad han sido construidas de acuerdo a un diseño técnico (pequeña minería) y el 81% de los depósitos edificados por la minería artesanal carecen de condiciones adecuadas para almacenar el material estéril. En la Figura 5.7 se aprecia una relavera construida sobre material arcilloso del sector de La López.



**Figura 5.7** Relavera situada en el sector de La López, la cual tiene protección arcillosa para almacenar colas mineras.  
**Fuente:** Galarza, B., Valverde, P., 2011.

## 5.2 Medidas de Prevención y Control

Las principales medidas de prevención para ubicar y construir relaveras y escombreras son [41]:

- Construir sobre materiales geotécnicamente estables y de reducida permeabilidad.
- Impermeabilizar relaveras cuando el material arcilloso carece de conductividad hidráulica baja, combinar barreras de arcilla con membranas sintéticas, la capa de arcilla debe ser perfilada y compactada cuidadosamente en toda la superficie del vertedero.

- Situar el vertedero o depósito en áreas con baja precipitación y alta insolación.
- El lugar de construcción del vertedero o depósito debe encontrarse distante de aguas superficiales y subterráneas (bajo nivel piezométrico).
- Calcular el balance hídrico para conocer la cantidad de efluentes, recogidos a través de los drenajes, en la balsa de lixiviados.
- El sistema de recogida de lixiviados debe ser construido antes de almacenar cualquier material.

Para controlar la contaminación producida por los procesos mineros se recomienda [41]:

- Caracterizar efluentes sistemáticos o accidentales generadores de contaminación.
- Registrar puntos de inmisión (coordenadas geográficas, tipo de descarga, caudal promedio, tipo de tratamiento aplicado antes de descargarlos).
- Tomar muestras de agua en los puntos de inmisión para análisis (parámetros físico-químicos in situ, caudal promedio, condiciones meteorológicas, Demanda Bioquímica de Oxígeno, Sólidos Totales Disueltos y metales pesados).

### 5.3 Casos de Estudio

Se realizó una visita de campo a la Empresa Minera Sociedad Minera Liga de Oro (SOMILOR) ubicada en el cantón Camilo Ponce Enríquez que es parte de la comunidad La López, SOMILOR se encuentra certificada bajo la Norma ISO 9001:2008 de calidad y se encuentra en proceso de certificación bajo la Norma Ambiental ISO 14001 y la Norma de Salud Ocupacional OHSAS 18001.

A nivel de pequeña minería, SOMILOR es un ejemplo de explotación sostenible de recursos no renovables ya que utilizan métodos de tratamiento químico y biológico para reducir la concentración de contaminantes en el agua.

Producto de las actividades de la planta de beneficio, las principales sustancias que deben removerse del agua son el cianuro libre y el Cobre, ya que SOMILOR utiliza el proceso de cianuración para la extracción de oro.

Los efluentes con cianuro son tratados con cloro para evitar la formación de sustancias tóxicas y el Cobre es precipitado mediante la adición de sulfhidrato de sodio (se añaden seis gramos de sulfhidrato de sodio por cada gramo de Cobre), el precipitado es un sulfuro en forma coloidal y para poder retirarlo del agua se le añade cloruro férrico como coagulante.

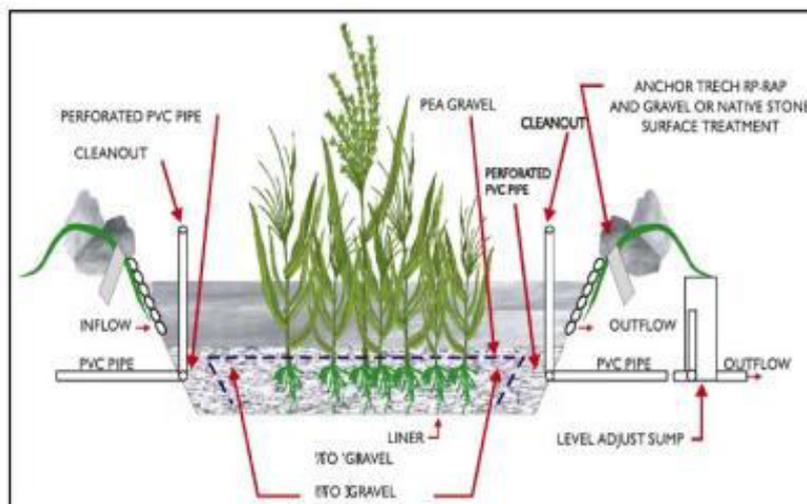
El agua se transporta al decantador donde las partículas se depositan en el fondo del equipo (lodos) y el agua es dirigida a la piscina de sedimentación, donde mantienen el pH básico. El tiempo de residencia del agua en la piscina de sedimentación es de dos a tres días para luego ser transportada a los pantanos artificiales.

El lodo que se forma en el decantador se deshidrata para recibir una dosis de cal y ser reingresado a la mina subterránea donde existe poca presencia de oxígeno evitando la oxidación de sulfuros contenidos en el lodo.

El flujo de agua que alimenta a los pantanos artificiales (250 l/min) procede de las piscinas de sedimentación y también de las aguas negras y grises que se generan en la empresa.

El flujo de agua que sale del humedal se almacena en un estanque donde se crían tilapias que en el futuro servirán como indicadores de la calidad de agua.

En la Figura 5.8 se ilustra el funcionamiento básico de un humedal; el humedal de SOMILOR consiste en capas de grava fina, grava gruesa y arena, con una profundidad de 120 metros y vegetación conocida como pasto alemán [38].



**Figura 5.8** Humedal artificial que utiliza un sistema de flujo bajo la superficie para la remoción de trazas de contaminantes.

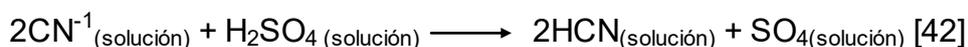
**Fuente:** Ordóñez, J., 1999.

Otra empresa visitada fue ORENAS S.A. que se encuentra en el sector La López. El agua utilizada en el proceso de extracción de oro tiene una concentración de cianuro libre entre 300 mg/l y 500 mg/l a un pH entre 10 y 11. El primer tratamiento que recibe el agua, consiste en almacenarla en una piscina de sedimentación, donde el agua que se encuentra en la superficie, pasa por rebose a una segunda piscina de sedimentación, en tanto que los lodos de la primera piscina son transportados directamente a la relavera, donde por rebose el agua de la superficie de la relavera pasa a una laguna para ser evaporada.

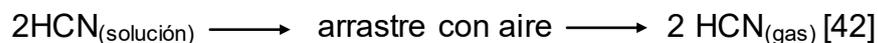
El agua de la tercera piscina de sedimentación pasa a un tanque de cemento, donde la concentración del cianuro varía desde 30 mg/l hasta 50 mg/l, esta agua contiene además bajas concentraciones de oro, por lo

cual el agua es transportada hacia cuatro torres de carbón activado para recuperar el oro.

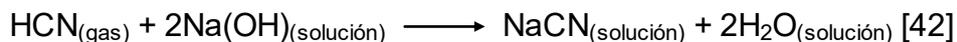
El agua almacenada en la segunda piscina de sedimentación recibe un tratamiento llamado acidificación-volatilización-regeneración (AVR). El agua se traslada a un tanque de acidificación donde se le añade ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) para producir ácido cianhídrico, tal como se observa en la reacción química:



El ácido cianhídrico resultante tiene un pH de 5 y pasa través de dos columnas, en la primera columna se le inyecta aire, separando la fase gaseosa de la fase líquida.



El gas cianhídrico se dirige a la segunda columna donde se agrega solución de hidróxido de sodio desde un tanque de alimentación. La reacción resultante que ocurre en la segunda columna es:

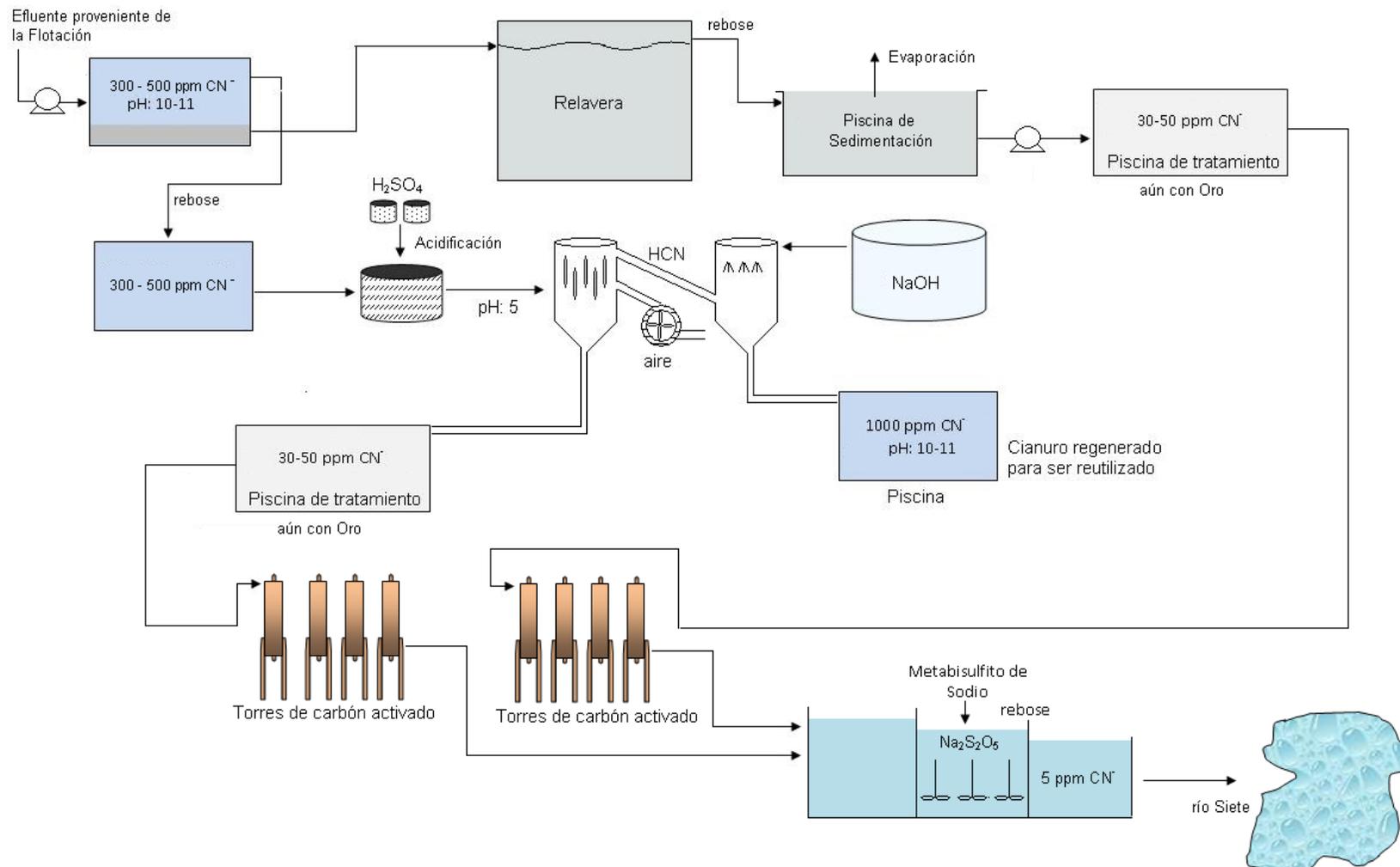


La solución va a una piscina donde la concentración de cianuro es de 1000 mg/l, y su pH se eleva nuevamente a 10-11 que será reutilizado nuevamente en el proceso de flotación.

El agua que sale de los ocho tanques de carbón activado es transportada a un nuevo proceso de tratamiento (tres piscinas de tratamiento). Este

sistema funciona por rebose y en la segunda piscina tratamiento se añade metabisulfito de sodio con agitadores, para separar el cianuro libre de los metales pesados.

Finalmente el agua es descargada al río Siete con una concentración de 5 mg/l de cianuro. En la Figura 5.9 se ilustra el proceso de tratamiento de agua residual que se utiliza para reducir la concentración de cianuro en el agua.



**Figura 5.9** Diagrama del proceso de tratamiento del agua residual utilizado por la empresa ORENAS S.A.  
**Fuente:** Galarza, B., Valverde, P., 2011.

# **CAPÍTULO 6**

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## CONCLUSIONES

La caracterización hidrogeoquímica del agua permite establecer que el **agua superficial de los afluentes del río Siete es sulfatada bicarbonatada-cálcico magnésica** debido a las actividades mineras del sector que incorporan cantidades importantes de sulfatos al agua, sin embargo dos de los afluentes del río central de estudio, el **río Nueve de Octubre y el río Margarita son bicarbonatados-cálcicos magnésicos** reflejando que el impacto por contaminación minera en ellos es menor.

El **agua superficial del río Siete es sulfatada bicarbonatada cálcico magnésica** hasta el punto de agua Pe-3, mientras que en los puntos de agua Pe-5 y Pe-8 **la facie hidroquímica cambia a bicarbonatada sulfatada-cálcico magnésica**, lo que es originado por dilución debido a la incorporación de agua del río Nueve de Octubre, sin embargo el aumento de bicarbonatos en porcentajes de concentración de un punto a otro es sólo de 2%, por lo cual este río a pesar de presentar baja contaminación por minería tiene poca incidencia en el agua del río Siete, lo que se corrobora con las firmas isotópicas distintas de ambos ríos.

El punto **Pe-8 en el río Siete está mayormente influenciado por la composición química e isotópica** de las aguas del río Fermín (punto

Pe-10), así se denota con los resultados isotópicos y con el contenido de sulfatos, pH y DQO, mientras que la confluencia entre el río Guanache y Villa tiene una menor influencia en este punto del río Siete.

**El río Nueve de Octubre (Pe-4) presenta la menor afectación por contaminación minera** en el área de estudio, así lo demuestran los resultados de los análisis físico químico, destacando el valor más bajo registrado de los sulfatos de 4,80 mg/l (valor de fondo 1 mg/l), y DQO de 46 mg/l. Además se registró un valor alto del pH de 7,15 que está más cercano al valor de fondo.

**De acuerdo a los resultados analíticos se evidencia que el río Fermín (Pe-7), considerado con una contaminación poco significativa** en el estudio de PRODEMINCA, **actualmente evidencia un aumento de la contaminación**, debido al incremento de sulfatos y la Demanda Química de Oxígeno.

**Las quebradas La Florida (Pe-1) El Paraíso (Pe-11) y el Estero Guanache (Pe-6) son los que tienen una mayor carga contaminante por la actividad minera**, y ambos provienen de la misma fuente, es decir del campamento minero de Bella Rica, lo cual se constata por las abundancias isotópicas similares de -14,15‰, -14,80‰ y -16,04‰ para Deuterio y de -2,96‰, -3,19‰ y -3,06‰ para Oxígeno-18.

Desde el año 2002 hasta el 2011 se observa que los valores de **pH decayeron** a lo largo del **río Siete y afluentes** (por debajo del valor de fondo 7,8) entre valores de 6,18 hasta 7,04, lo que evidencia que la actividad neutralizante que tenía la geología en el pH ha decaído en los últimos años. Además que el contenido de **sulfatos ha aumentado significativamente a lo largo del río Siete**, desde un rango de 5 a 73 mg/l en 1996 hasta un rango de 2,8 a 223,68 mg/l en el 2011, lo cual es un claro **indicador de que la contaminación por actividad minera se ha incrementado**.

El **agua de drenaje de mina presenta la facie hidroquímica bicarbonatada cálcica magnésica**, esto denota que es un agua de reciente infiltración en las labores mineras, **y el agua subterránea es bicarbonatada magnésica-cálcica** y no presenta alteración natural de la facie hidroquímica bicarbonatada.

**El agua superficial, subterránea y de drenaje de mina del sector de Ponce Enríquez se encuentra afectada por contaminación bacteriológica**, esta situación se origina debido a que sólo el 36% de la población (zona urbana) se encuentra conectada a la red pública de saneamiento, además la población de Ponce Enríquez presenta problemas de salud como la parasitosis, enfermedades de la piel y diarreas producto de este sistema deficiente.

Las concentraciones de metales como **Arsénico, Mercurio y Zinc no superan los límites máximos permisibles establecidos en el Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria**, Tomo V, Anexo 1, Tabla 3 para la conservación de la flora y fauna acuática en cuerpos de agua dulce.

**No se puede conocer la afectación que tienen los metales pesados Cadmio y Plomo debido a que los límites de detección del análisis son mayores a los Límites Máximos Permisibles** establecidos tanto por la EPA como en el TULAS. Sin embargo el estudio realizado en el 2008-2009 determinó que el contenido de Cadmio en la mitad del río Siete (Pe-5) se mantiene por debajo de 0,00001 mg/l en época seca y lluviosa; y que el Plomo alcanzó una concentración de 0,00343 mg/l en la estación de caudal abundante y superó el LMP de 0,0013 mg/l establecido por la Agencia de Protección Ambiental.

Actualmente el **Cobre en el agua se encuentra por debajo de 0,05 mg/l** y no supera el LMP establecido por la EPA de 0,065 mg/l, no obstante el estudio ambiental realizado en el año 2008 detectó que el Cobre alcanzó niveles altos de concentración (0,435 mg/l y 0,200 mg/l), demostrando la incorporación de este contaminante en el agua del río Siete desde las colas provenientes de las plantas de cianuración.

El **Hierro** presenta una concentración de 0,31 mg/l en el punto Pe-3 y de 0,47 mg/l en el punto Pe-5 los cuales **rebasan el límite máximo permisible** establecido en el TULAS; no obstante es uno de los metales menos tóxicos para la biota acuática y es fácilmente removible del agua.

El **Cianuro total** analizado en el agua del río Siete supera (en todos sus puntos de muestreo) el LMP de 5,2 µg/l establecido por la EPA para la protección de la vida acuática en los cuerpos de agua dulce, estos resultados revelan la presencia de complejos metal-cianuro estables que no son fácilmente biodisponibles, los cuales han sido incorporados por colas mineras.

El **87% de la pequeña minería y el 53% de la minería artesanal** realizan sus actividades de explotación y beneficio cumpliendo con la Ley de Minería (Título II, Capítulo III, Artículo 41 y Capítulo IV, Artículo 45); el **62% del sector de pequeña minería** realiza algún tipo de tratamiento al agua, que consiste en el proceso de sedimentación (25%) y en un proceso secuencial de sedimentación-adición de cal-coagulación (14%).

El **porcentaje de mineros artesanales que usa la sedimentación** como proceso básico de tratamiento de aguas es similar al de los pequeños mineros (24%) pero también utilizan otros métodos de tratamiento como la adición de cal (7%) y adición de coagulantes (3%),

sin embargo al realizar estos procesos de forma aislada no se alcanza una eficiencia de remoción adecuada.

Debido a que **los pasivos ambientales son una fuente importante de contaminación** para los cuerpos de agua superficial y subterráneos en el sector de Ponce Enríquez, el 75% de los pequeños mineros poseen escombreras de las cuales la mitad han sido construidas bajo un diseño técnico, mientras que el 65% de la minería artesanal tiene escombreras de las cuales el 81% carecen de condiciones adecuadas para almacenar el material estéril.

**Monitorear el agua de efluentes mineros y realizar análisis químico** de pH, metales pesados y DQO **constituye una medida de control empleada por el sector de Ponce Enríquez**, el 62,5% de los pequeños mineros monitorea el agua de sus efluentes y el 75% les realiza análisis químico, mientras que sólo el 30% de los mineros artesanales monitorea y realiza análisis química al agua.

El **método AVR** (acidificación, volatilización, regeneración) que utiliza la empresa mencionada en el caso de estudio **es eficiente para reducir una concentración inicial de cianuro libre** desde 300 mg/l hasta 5 mg/l, además constituye un esfuerzo de la pequeña minería para reducir la concentración de este compuesto altamente tóxico.

La caracterización del recurso hídrico pone de manifiesto que existen **dos fuentes de contaminación principal**: 1) incremento de la carga contaminante por **actividades mineras de la zona de Bella Rica, La López y La Independencia**, que se evidencia por la disminución de pH, incremento de sulfatos, conductividad eléctrica, DQO y Hierro, 2) **redes de saneamiento, descarga de aguas servidas** a los cuerpos de agua sin tratamiento previo.

## RECOMENDACIONES

Las técnicas isotópicas son herramientas útiles y complementarias para realizar estudios en el campo hidrológico, por lo cual se recomienda usarlas para futuros trabajos de investigación al permitir conocer las interrelaciones que tienen los cuerpos de agua dentro de una cuenca hidrográfica. Monitoreando de forma mensual durante un año el agua de la precipitación, agua superficial (a lo largo del río Siete y en los ríos tributarios principales como son: Nueve de Octubre, Fermín, Quebrada la Florida, Estero Guanache) y agua subterránea principalmente en las labores mineras de La López y Bella Rica.

Se deben realizar monitoreos periódicos para conocer la variación de la calidad del agua proveniente de los efluentes mineros, además de registrar el caudal de descarga y su frecuencia.

Las autoridades pertinentes de Camilo Ponce Enríquez deben encargarse de establecer un sistema apropiado para el manejo de aguas servidas, y construcción de plantas de tratamiento con capacidad para procesar las descargas de agua de los hogares de todo el sector, ya que

de acuerdo al presente estudio, el río Siete también se encuentra contaminado por acción bacteriana.

Establecer que la minería tenga un programa para el manejo de aguas servidas y para los efluentes mineros dentro del lugar donde se realizan las actividades productivas, priorizando el cálculo del balance hídrico en todos los procesos de la actividad minera.

Se recomienda a la población de Ponce Enríquez que se abastece de agua de pozo, adicionar cloro al agua para su desinfección, la dosis consiste en agregar por cada litro de agua 4 gotas de cloro comercial y se debe dejar reposar el agua por 30 minutos [43].

Las técnicas utilizadas por las empresas en los casos de estudio para remover cianuro y cobre deberían ser implementadas en el área de estudio debido a que se logra una disminución de cianuro desde 300-500 mg/l hasta 5 mg/l de cianuro libre del agua.

Se realizará una tesis de grado por los estudiantes de la carrera de Ingeniería de Minas sobre el tratamiento de los efluentes mineros en la empresa del caso de estudio que remueve cianuro libre por el método AVR, para mejorar los métodos de tratamientos químicos utilizados en dicha empresa.

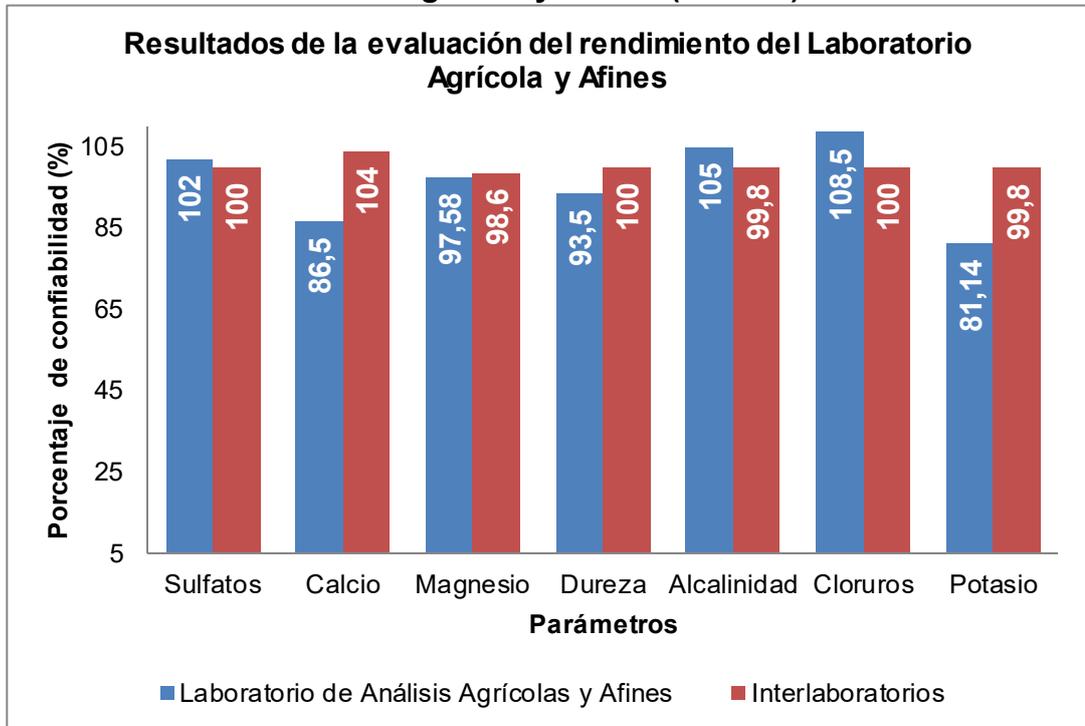
Después de realizar el tratamiento químico convencional para los efluentes mineros se recomienda complementar este proceso a través del empleo de humedales con el fin de reducir concentraciones traza de metales en el agua.

La variable ambiental del recurso hídrico es la más importante para el desarrollo de otros sectores. Por tal motivo, un Ordenamiento Territorial metodológicamente planteado y jurídicamente válido se convierte en una herramienta de planificación esencial en la búsqueda del equilibrio entre la preservación, conservación y explotación de los recursos naturales disponibles en el área de estudio.

# **ANEXOS**

## ANEXO A

### Resultados de la evaluación de Interlaboratorios del Laboratorio de Análisis Agrícola y Afines (L.A.A.A)



## ANEXO B

### Límites Máximos Permisibles establecidos en el Texto Unificado de Legislación Ambiental Secundaria, Libro VI, Anexo 1, Tablas 2, 3 y 13.

Límites Máximos Permisibles				
Parámetro	Preservación de Flora y Fauna en agua dulce	Descarga a cuerpos de Agua dulce	Agua de drenaje subterránea	Consumo humano
Dureza [mg/l]	-----	-----	-----	500
SST [mg/l]	-----	100	-----	-----
STD [mg/l]	-----	1600	-----	1000
DBO <sub>5</sub> [mg O <sub>2</sub> /l]	-----	100	-----	2,0
DQO [mg O <sub>2</sub> /l]	-----	250	-----	-----
Nitritos [mg/l]	-----	-----	-----	1,0
Nitratos [mg/l]	-----	10,0	-----	10,0
Sodio [mg/l]	-----	-----	-----	100
Coliformes fecales [nmp/100 ml]	200	3000	-----	-----
Coliformes totales [nmp/100 ml]	-----	-----	-----	50
Organoclorados [mg/l]	0,010	0,05	0,0005	0,01
Organofosforados [mg/l]	0,010	0,1	-----	0,1
Cianuro [mg/l]	0,01	0,1	0,753	0,1
Arsénico [mg/l]	0,05	0,1	0,035	0,05
Cobre [mg/l]	0,02	1,0	0,045	1,0
Plomo [mg/l]	-----	0,2	0,045	0,05
Mercurio [mg/l]	0,0002	0,005	0,00018	0,001
Cadmio [mg/l]	0,001	0,02	0,0032	0,01
Zinc [mg/l]	0,18	5,0	0,433	0,1
Hierro [mg/l]	0,3	10,0	-----	1,0

## ANEXO C

### Hoja electrónica proporcionada por el Organismo Internacional de Energía Atómica, desviaciones estándar de los patrones nacionales de isótopos Deuterio y Oxígeno-18.

Número de Inyección	Nombre de la Muestra	$\delta^2\text{H}$ Valor reportado (por mil)	$\delta^2\text{H}$ Valor Conocido	$\delta^2\text{H}$ Mayor variación	$\delta^{18}\text{H}$ Valor reportado (por mil)	$\delta^{18}\text{H}$ Valor Conocido	$\delta^{18}\text{H}$ Mayor Variación
12	STD1	-11,92	-10,26	0,76	-1,88	-1,75	0,13
60	STD 1	-9,67	-10,26	0,59	-1,64	-1,75	0,11
108	STD 1	-10,89	-10,26	0,63	-1,88	-1,75	0,13
	<b>Promedio</b>	-10,24		<b>Promedio</b>	-1,80		
	Desviación est.	0,73	<b>OK</b>	Desviación est.	0,14	<b>OK</b>	
18	STD2	-24,69	-24,00	0,69	-4,70	-4,66	0,04
66	STD 2	-23,14	-24,00	0,86	-4,61	-4,66	0,05
114	STD 2	-24,75	-24,00	0,75	-4,55	-4,66	0,11
	Promedio	-23,79		Promedio	-4,48		
	Desviación est.	1,29	<b>OK</b>	Desviación est.	0,29	<b>OK</b>	
24	STD3	-69,30	-72,72	3,42	-10,65	-10,39	0,26
72	STD 3	-67,43	-72,72	5,29	-10,47	-10,39	0,08
120	STD 3	-68,07	-72,72	4,65	-10,47	-10,39	0,08
	Promedio	-68,45		Promedio	-10,48		
	Desviación est.	0,85	<b>OK</b>	Desviación est.	0,13	<b>OK</b>	

## ANEXO D

### Fichas de campo de los puntos de muestreo

Quebrada La Florida		
<b>Código:</b> Pe-1	<b>Fecha:</b> 14/12/2012	
<b>Envase:</b> 2 envases de polietileno	<b>Hora:</b> 08:30 am	
<b>Observaciones:</b> El agua presentaba turbidez, se realizó en los predios de la minera SOMILOR.	<b>Cantidad:</b> 2 L	
	<b>Coordenadas</b>	
	<b>X:</b> 643101	<b>Y:</b> 9657374
<b>No se permitió la toma de fotos</b>		
<b>Parámetros medidos in situ</b>		
pH	7,04	
C.E [ $\mu\text{s}/\text{cm}$ ]	590	
STD [mg/l]	378	
T [°C]	22,2	

Plantas de Beneficio La López	
<b>Código:</b> Pe-2	<b>Fecha:</b> 14/12/2012
<b>Envase:</b> 2 envases (polietileno y vidrio)	<b>Hora:</b> 09:00 am
<b>Observaciones:</b> Se realizó el muestreo aguas abajo de las plantas de beneficio ubicado por el sector de La López.	<b>Cantidad:</b> 2 L y 150 ml.
	<b>Coordenadas</b>
	<b>X:</b> 642109 <b>Y:</b> 9657539
	
<b>Parámetros medidos in situ</b>	
pH	6,92
C.E [ $\mu\text{s/cm}$ ]	377
STD [mg/l]	241
T [°C]	23,0

Zona Minera y Agrícola La López	
<b>Código:</b> Pe-3	<b>Fecha:</b> 1 4/12/2012
<b>Envase:</b> 2 envases de polietileno	<b>Hora:</b> 10:00 am
<b>Observaciones:</b> Tomada en el río Siete en zona de cultivo de cacao, el río presenta turbidez.	<b>Cantidad:</b> 2 L
	<b>Coordenadas</b>
	<b>X:</b> 640014 <b>Y:</b> 9658404
	
<b>Parámetros medidos in situ</b>	
pH	6,76
C.E [ $\mu\text{s/cm}$ ]	358
STD [mg/l]	229
T [°C]	25,3

Río 9 de Octubre	
<b>Código:</b> Pe-4	<b>Fecha:</b> 14/12/2012
<b>Envase:</b> 2 envases de polietileno	<b>Hora:</b> 11:30 am
<b>Observaciones:</b> Tomada en el río Nueve de Octubre, el agua es clara, se observa vida acuática.	<b>Cantidad:</b> 2 L
	<b>Coordenadas</b>
	<b>X:</b> 639595 <b>Y:</b> 9659574
	
<b>Parámetros medidos in situ</b>	
pH	7,15
C.E [ $\mu\text{s}/\text{cm}$ ]	199
STD [mg/l]	127
T [°C]	25,4

río Siete	
<b>Código:</b> Pe-5	<b>Fecha:</b> 14/12/2012
<b>Envase:</b> 2 envases (polietileno y vidrio)	<b>Hora:</b> 12:10 pm
<b>Observaciones:</b> Tomada del río Siete, el agua presenta turbidez.	<b>Cantidad:</b> 2 L
	<b>Coordenadas</b>
	<b>X:</b> 638304 <b>Y:</b> 9660372
	
<b>Parámetros medidos in situ</b>	
pH	6,83
C.E [ $\mu\text{s/cm}$ ]	348
STD [mg/l]	223
T [°C]	26,3

Confluencia del río Guanache y río Villa	
<b>Código:</b> Pe-6	<b>Fecha:</b> 14/12/2012
<b>Envase:</b> 2 envases de polietileno	<b>Hora:</b> 12:40 pm
<b>Observaciones:</b> Tomada en el río Guanache, se observa turbidez.	<b>Cantidad:</b> 2 L
	<b>Coordenadas</b>
	<b>X:</b> 638727 <b>Y:</b> 9661184
	
<b>Parámetros medidos in situ</b>	
pH	6,40
C.E [ $\mu\text{s}/\text{cm}$ ]	425
STD [mg/l]	272
T [°C]	26,3

Río Fermín	
<b>Código:</b> Pe-7	<b>Fecha:</b> 14/12/2012
<b>Envase:</b> 2 envases de polietileno	<b>Hora:</b> 13:25 pm
<b>Observaciones:</b> Tomada en el río Fermín, el agua presenta claridad.	<b>Cantidad:</b> 2 L
	<b>Coordenadas</b>
	<b>X:</b> 639827 <b>Y:</b> 9663818
	
<b>Parámetros medidos in situ</b>	
pH	7,05
C.E [ $\mu\text{s/cm}$ ]	367
STD [mg/l]	235
T [°C]	26,7

Río Siete	
<b>Código:</b> Pe-8	<b>Fecha:</b> 14/12/2012
<b>Envase:</b> 2 envases (polietileno y vidrio)	<b>Hora:</b> 14:40 pm
<b>Observaciones:</b> Tomada en el río Siete, con las descargas del río Fermín y río Guanache, el agua presenta turbidez.	<b>Cantidad:</b> 2 L y 150 ml.
	<b>Coordenadas</b>
	<b>X:</b> 637012 <b>Y:</b> 9661936
	
<b>Parámetros medidos in situ</b>	
pH	6,34
C.E [ $\mu\text{s}/\text{cm}$ ]	402
STD [mg/l]	247
T [°C]	27,1

Río Fermín	
<b>Código:</b> Pe-10	<b>Fecha:</b> 14/12/2012
<b>Envase:</b> 2 envases de polietileno	<b>Hora:</b> 14:00 pm
<b>Observaciones:</b> Tomada en el río Fermín, el agua presenta turbidez.	<b>Cantidad:</b> 2 L
	<b>Coordenadas</b>
	<b>X:</b> 639394 <b>Y:</b> 9661936



Parámetros medidos in situ	
pH	6,18
C.E [ $\mu\text{s/cm}$ ]	419
STD [mg/l]	268
T [°C]	26,8

Mina Reina del Cisne	
<b>Código:</b> Ps-1	<b>Fecha:</b> 30/01/2012
<b>Envase:</b> 2 envases de polietileno	<b>Hora:</b> 13:30 pm
<b>Observaciones:</b> Tomada del drenaje de la bocamina.	<b>Cantidad:</b> 2 L
	<b>Coordenadas</b>
	<b>X:</b> 642504 <b>Y:</b> 9659376
<b>No se permitió la toma de fotos.</b>	
<b>Parámetros medidos in situ</b>	
pH	6,45
C.E [ $\mu$ s/cm]	360
STD [mg/l]	232
T [°C]	24,1 °C

Mina Reina del Cisne	
<b>Código:</b> Ps-sub1	<b>Fecha:</b> 30/01/2012
<b>Envase:</b> 2 envases de polietileno	<b>Hora:</b> 13:50 pm
<b>Observaciones:</b> Tomada de las grietas por donde se infiltra el agua de drenaje subterráneo.	<b>Cantidad:</b> 2 L
	<b>Coordenadas</b>
	<b>X:</b> 642466 <b>Y:</b> 9659402
<b>No se permitió la toma de fotos.</b>	
<b>Parámetros medidos in situ</b>	
pH	6,51
C.E [ $\mu$ s/cm]	120
STD [mg/l]	79
T [°C]	23,8

<b>Mina artesanal</b>	
<b>Código:</b> Ps-2	<b>Fecha:</b> 30/01/2012
<b>Envase:</b> 2 envases de polietileno	<b>Hora:</b> 16:50 pm
<b>Observaciones:</b> Tomada del drenaje de la bocamina, presenta turbidez.	<b>Cantidad:</b> 2 L
	<b>Coordenadas</b>
	<b>X:</b> 645270 <b>Y:</b> 9662138
	
<b>Parámetros medidos in situ</b>	
pH	6,92
C.E [ $\mu\text{s}/\text{cm}$ ]	480
STD [mg/l]	325
T [°C]	24,4

Mina artesanal	
<b>Código:</b> Ps-sub2	<b>Fecha:</b> 30/01/2012
<b>Envase:</b> 2 envases de polietileno	<b>Hora:</b> 17:10 pm
<b>Observaciones:</b> Tomada de las grietas por donde se infiltra el agua de drenaje subterránea.	<b>Cantidad:</b> 2 L
	<b>Coordenadas</b>
	<b>X:</b> 645270 <b>Y:</b> 9662138
	
Parámetros medidos in situ	
pH	6,55
C.E [ $\mu\text{s}/\text{cm}$ ]	148
STD [mg/l]	95
T [°C]	24,1

### La Independencia

<b>Código:</b> Ps-a	<b>Fecha:</b> 02/05/2012	
<b>Envase:</b> 2 envases de polietileno y 1 envase estéril	<b>Hora:</b> 14:40 pm	
<b>Observaciones:</b> El pozo se utiliza para fines domésticos y de consumo humano, la dueña de casa afirma usar lejía para descontaminar el agua del pozo.	<b>Cantidad:</b> 2 L y 150 ml	
	<b>Coordenadas</b>	
	<b>X:</b> 640550	<b>Y:</b> 9664467



#### Parámetros medidos in situ

pH	5,77
C.E [ $\mu\text{s}/\text{cm}$ ]	135
STD [mg/l]	91
T [°C]	26,4

Sector las Brisas	
<b>Código:</b> Ps-b	<b>Fecha:</b> 02/05/2012
<b>Envase:</b> 2 envases de polietileno y 1 envase estéril	<b>Hora:</b> 15:35 pm
<b>Observaciones:</b> El pozo se utiliza para abastecimiento doméstico y de consumo humano.	<b>Cantidad:</b> 2 L y 150 ml
	<b>Coordenadas</b>
	<b>X:</b> 640355 <b>X:</b> 9664956
	
<b>Parámetros medidos in situ</b>	
pH	6,37
C.E [ $\mu\text{s}/\text{cm}$ ]	200
STD [mg/l]	130
T [°C]	27,2

El Pantanal	
<b>Código:</b> Ps-c	<b>Fecha:</b> 02/05/2012
<b>Envase:</b> 2 envases de polietileno y 1 envase estéril	<b>Hora:</b> 16:33 pm
<b>Observaciones:</b> Pozo de agua utilizado para abastecimiento doméstico y de consumo humano.	<b>Cantidad:</b> 2 L y 150 ml
	<b>Coordenadas</b>
	<b>X:</b> 640518 <b>X:</b> 9665594
	
<b>Parámetros medidos in situ</b>	
pH	5,52
C.E [ $\mu\text{s}/\text{cm}$ ]	107,6
STD [mg/l]	71
T [°C]	25,1

San Alfonso	
<b>Código:</b> Ps-d	<b>Fecha:</b> 02/05/2012
<b>Envase:</b> 2 envases de polietileno y 1 envase estéril	<b>Hora:</b> 18:41 pm
<b>Observaciones:</b> Pozo de agua utilizado para abastecimiento doméstico y de consumo humano.	<b>Cantidad:</b> 2 L y 150 ml
	<b>Coordenadas</b>
	<b>X:</b> 640594 <b>X:</b> 9664744
	
<b>Parámetros medidos in situ</b>	
pH	5,80
C.E [ $\mu\text{s}/\text{cm}$ ]	108
STD [mg/l]	75
T [°C]	25,6

# **BIBLIOGRAFÍA**

[1] Swedish Enviromental Systems (SES).1996-1998. *Monitoreo Ambiental de las áreas mineras en el sur del Ecuador*. Informe Inédito, Ministerio de Energía y Minas. Pg 17, 35, 65.

[2] Ministerio de Energía y Minas. 2002. *Examen especial al control de explotación minera en las cuencas de los ríos Santa Rosa, Caluguro, Tenguel y Siete, a cargo de la Dirección Regional Minera de El Oro, Ministerio del Ambiente y Ministerio Energía y Minas*. Anexo 1.

[3] Promas-Universidad de Cuenca. 2009. *Evaluación social y Técnica de los Recursos hídricos de las Subcuencas de los ríos Jagua, Balao, Gala, Tenguel y Siete, en la Provincia de Azuay*. SENPLADES. Pg 16, 18, 19, 29.

[4] Centro de Investigación y Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra. 2011. *Manual de Usuario de Muestreo*. Escuela Superior Politécnica del Litoral.

[5] Instituto Nacional de Estadística y Censos. 2010. VII Censo de Población y VI de Vivienda.

[6] Sandoval, F. 2001. *La pequeña Minería en el Ecuador*. Mining, Minerals and Sustainable Development. Pg 3.

[7] Ministerio de Recursos Naturales No Renovables, Instituto Nacional de Investigación Geológico Minero Metalúrgico. 2011. *Diagnóstico de Pequeña*

Minería y Minería Artesanal en la provincia de Azuay. Universidad de Cuenca.

[8] Sandoval, F. 2007. El ABC de la Minería en el Ecuador. Ministerio de Energía y Minas. Pg 53.

[9] Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. 1975-2010. Anuario del INAMHI correspondiente a las estaciones hidrológicas H503 y H507, y estación meteorológica M185.

[10] Núñez del Arco, E. 2003. *Geología del Ecuador*. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Pg 52, 203.

[11] Duque, P. 2000. Breve Léxico Estratigráfico del Ecuador. UCP PRODEMINCA Proyecto MEM BIRF 3655EC. 1era Edición. Quito – Ecuador. Pg 44.

[12] Custodio, E. y Llamas, M. 1983. Hidrología subterránea. Editorial Omega. Universidad Politécnica Barcelona. Tomo I. Pg 1026.

[13] Instituto Tecnológico Geominero de España. 1998. Guía operativa para la recogida, almacenamiento y transporte de muestras de aguas de drenaje subterráneo destinadas al análisis químico. Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. Pg 4, 5, 7

- [14] Instituto Tecnológico Geominero de España. 1996. *Manual de Restauración de Terrenos y Evaluación de Impactos Ambientales en Minería*. Madrid, España. Pg 103.
- [15] Copatti, C., de Oliveira, L., *et al.* 2011. Low water hardness and pH affect growth and survival of silver catfish juveniles. *Revista Ciencia Rural*. Vol 41 No 8. Pg 1482-1487.
- [16] Corporación de Estudios y Publicaciones. 2011. Legislación Ambiental, Tomo V Control de contaminación. Pg 7, 8, 12, 13, 18, 30.
- [17] Al-Kathib, M. and Al-Najar, H. 2011. Hydro-Geochemical Characteristics of Groundwater beneath the Gaza Strip. *Journal of Water Resource and Protection*. Pg 341-348.
- [18] Goyenola, G. 2007. Alcalinidad. Red de Monitoreo Ambiental Participativo de Sistemas Acuáticos. RED MAPSA.
- [19] Brinkman, S. and Johnston, W. 2011. Acute Toxicity of Zinc to Several Aquatic Species Native to the Rocky Mountains. *Archives Environmental Contamination and Toxicology*. Vol 62 No 2. Pg 272-281.
- [20] Osman, A. and Kloas, W. 2010. Water Quality and Heavy Metal Monitoring in Water, Sediments, and Tissues of the African Catfish *Clarias gariepinus* (Burchell, 1822) from the River Nile, Egypt. *Journal of Environmental Protection*. Vol 1 No 4. Pg 389-400.

[21] Castañe, P., y Topalián, M., *et al.* 2002. Influencia de la especiación de los metales pesados en medio acuático como determinante de su toxicidad. *Revista de Toxicología de la Asociación española de Toxicología*. Vol 20 No 1. Pg 13-18.

[22] Ebenezer, V. and Ki, J. 2012. Evaluation of the sub-lethal toxicity of Cu, Pb, bisphenol A and polychlorinated biphenyl to the marine dinoflagellate *Cochlodinium polykrikoides*. *Algae Research Article*. Vol 27 No 1. Pg 63-69.

[23] Nasehi, F., Hassani, A., *et al.* 2012. Heavy Metal Distributors in Water of the Aras River, Ardabil, Iran. *Journal of Water Resource and Protection*. Vol 4 No 2. Pg 73-78.

[24] Khan. 2011. Effect of calcium and magnesium induced hardness on the toxicity of lead to microorganism in aquatic environment as measured by biochemical oxygen demand. *International Journal of Chemical Sciences*. Vol. 9, No. 3. Pg.1194-1202.

[25] Carter, J. and Cameron, I. 1972. Toxicity bioassay of heavy metals in water using *Tetrahymena pyriformis*. *Science Direct Journals*. Vol 7 No 7. Pg 95-961.

[26] Khan, M. and Ho, Y. 2011. Arsenic in Drinking Water: A Review on Toxicological Effects, Mechanism of Accumulation and Remediation. *Asian Journal of Chemistry*. Vol 23 No 5. Pg 1889-1901.

[27] Esbaugh, A., Brix, K., *et al.* 2011. Multi-linear regression models predict the effects of water chemistry on acute lead toxicity to *Ceriodaphniadubia* and *Pimephalespromelas*. *Comparative Biochemistry and Physiology*. Part C 154. Pg 137-145.

[28] Universidad de Cádiz. 2009. Transfer Of Heavy Metals From Water To Fish Detailed In Huelva Estuary, Spain. *Science Daily*.

[29] Wang, Z., Yan, C., *et al.* 2010. Concentrations of some heavy metals in water, suspended solids, and biota species from Maluan Bay, China and their environmental significance. *Environmental monitoring and assessment*. Pg 239-249.

[30] Elphick, J., Davies, M., *et al.* 2010. An aquatic toxicological evaluation of sulfate: The case for considering hardness as a modifying factor in setting water quality guidelines. *Environmental Toxicology and Chemistry*. Vol 30 No 1. Pg 247-253.

[31] Saddiqui, A. and Arifa, N. 2011. Toxicity of heavy metal copper and its effect on the behaviour of fresh water Indian cat fish, *Clarias Batrachus* (Linn.). *Quarterly e-journal Current Biotica (ISSN)*. Vol 4 No 4. Pg 405-411.

[32] Brinkman, S. and Johnston, W. 2011. Acute Toxicity of Zinc to Several Aquatic Species Native to the Rocky Mountains. *Archives Environmental Contamination and Toxicology*. Vol 62 No 2. Pg 272-281.

[33] Laguna, J. 1996. Aspectos geoquímicos-ambientales del cianuro en los depósitos de colas abandonados. *Revista Geológica de América Central*. Vol 19/20. Pg 167-173.

[34] Romero, J. 2005. *Calidad del Agua*. Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá, Colombia. Pg 130, 217.

[35] Mook, W. G. 2002. Isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico. Principios y Aplicaciones. Custodio, Emilio (sup.); Ramajo, Hipólita (trad.); Custodio, Javier (comp.). Serie N° 1. Madrid: IGME, 2001. ISBN: 84-7840-465-1. Pg 28, 29.

[36] Fu, F. and Wang, Q. 2011. Removal of heavy metals ions from wastewaters: A review. *Journal of Environmental Management*. Vol 92 No 3. Pg 407-418.

[37] Qu, R., Shi, J., *et al.* 2012. Heavy Metal and Phosphorus Removal from Waters by Optimizing Use of Calcium Hydroxide and Risk Assessment. *Environment and Pollution*. Vol 1 No 1. Pg 38-54.

[38] Ordoñez, J. 1999. Sistemas de tratamiento pasivo para aguas ácidas de mina. Experiencias de laboratorio, diseño y ejecución. Universidad de Oviedo. 1999. Pg 14, 28, 40, 56

[39] Tribunal Constitucional del Ecuador. 2009. Reglamento General de la Ley de Minería 2009.

[40] Higuera, P. y Oyarzun, R. 2005. Minerales, metales gases y la salud humana y ambiental. Departamento de Ingeniería Geológica y Minera, Escuela Universitaria Politécnica de Almadén, Universidad de Castilla-La Mancha, Departamento de Cristalografía y Mineralogía, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense, 28040 Madrid, España.

[41] Baquero, J. y Fernández, R. 2007. *Hidrología minera y ambiental síntesis de conceptos fundamentales*. Red DESIR. Universidad Politécnica de Madrid. Pg. 214-223.

[42] González, M. 2008. Recuperación de cianuro en la mina Álamo Dorado "Proceso AVR". *Primer Congreso "Tendencias de la actividad minera en México"*. Pg. 10-12.

[43] Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social de la República de Guatemala. 2006. Tratamiento y desinfección de agua para consumo humano por medio de cloro. Organización Panamericana de la Salud y Organización Mundial de la Salud (OPS/OMS). Guatemala. Pg. 4-6.

## **BILIOGRAFÍA DE CONSULTA**

Akankpo, A. and Igboekwe, M. 2011. Monitoring Groundwater Contamination Using Surface Electrical Resistivity and Geochemical Methods. *Journal of Water Resource and Protection*. Vol 3 No 5. Pg 318-324.

Agtas, S., Gey, H., *et al.* 2007. Concentration of heavy metals in water and chub, *Leuciscuscephalus* (Linn.) from the river Yildiz, Turkey. *Journal of Environmental Biology*. Vol 28 No 4. Pg 845-849.

Armah, F., Obiri, S., *et al.* 2010. Anthropogenic sources and environmentally relevant concentrations of heavy metals in surface water of a mining district in Ghana: a multivariate statistical approach. *Journal of Environmental Science and Health*. Vol 45 No 13. Pg 1804-1813.

Bascuñan, M. 2009. Especies mineralógicas presentes en el relave la africana y procesos o etapas proyecto Congo. Nueva Pudahuel. Pg 2.

Benavente, M., Moreno, L., *et al.* 2011. Sorption of heavy metals from gold mining wastewater using chitosan. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. Vol 42 No 6. Pg 976-988.

Bros, M. 2006. Utilización de métodos pasivos para mejorar la calidad de las aguas en los lagos mineros. Departamento de Explotación y Prospección de Minas. Universidad de Oviedo. Oviedo, España.

Brown, T. Química. La ciencia central. Novena edición. Pearson Prentice Hall. Pg 485, 486.

Brozenick, P. 2011. Water Chemistry: An introduction to the Chemistry of Natural Engineered Aquatic Systems. Pg 301.

Carroll, S., Dawes, L., *et al.* 2007. Identification of sources of faecal source isolates in ningi creek, Australia. Proceedings On-site '07 Conference: Innovation and Technology for On-site Systems. Pg 83-90.

Caruso, B., Mirtskhulava, M., *et al.* 2011. Effects of Manganese Mining on Water Quality in the Caucasus Mountains, Republic of Georgia. Mine Water and the Environment. *Mine Water Environmental*. Vol 31 No 1. Pg 13-16.

Cavero, A. 2001. Precipitación y remoción de Mercurio de soluciones cianuradas usando sulfuro de sodio. Universidad Cardenal Herrera. Valencia, España.

Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua. 2006. Guía sobre tratamiento de aguas residuales urbanas para pequeños núcleos de población. Instituto Tecnológico de Canarias. Pg 78.

CIMA. 2011. Protocolo cianuro de cobre en polvo. Argentina. Pg 1, 2.

Constitución del Ecuador. 2004. Codificación de la Ley de Aguas.

Curi, A., Granda, W., *et al.* 2006. Las Zeolitas y su Aplicación en la Descontaminación de Efluentes Mineros. Escuela de Minas, Departamento de Ingeniería de Minas, Universidad Federal de Ouro Preto, Brasil. *Revista Información Tecnológica*. Vol 17 No 6. Pg 111-116.

De Beer, M. 2006. Treatment of acid mine drainage and acidic effluents. North West University, Potchefstroom Campus, South Africa.

Dittmar, T. 2004. Hydrochemical processes controlling arsenic and heavy metal contamination in the Elqui river system (Chile). *Science of the Total Environment*. Vol 325 No 1. Pg 193-207.

Eger, P. 2007. Solving mine drainage problems at Soudan state park. Proceedings, 24th Annual Meeting of the American Society of Mining and Reclamation, Gillette, Wyo. Pg 216-227.

Espósito, M., Paoloni, J., *et al.* 2011. Natural Contaminants in Drinking Waters (Arsenic, Boron, Fluorine and Vanadium) in the Southern Pampean Plain, Argentina. *Journal of Environmental Protection*. Vol 2 No 1. Pg 97-108.

Ezeonyejaku, C. and Obiakor, M. 2011. Toxicological study of single action of zinc on tilapia species (*Oreochromis Niloticus*). *Online Journal of Animal and Feed Research*. Vol 1 No 4. Pg 139-143.

Galindo, M. 2009. Transfer of heavy metals from water to fish detailed in Huelva estuary, Spain. *Science Daily*.

Gaviria, A., y Meza, L. 2005. Análisis de alternativas para la degradación del cianuro en efluentes líquidos y sólidos del Municipio de Segovia, Antioquia y en la planta de beneficio de la empresa Mineros Nacionales, Municipio de

Marmato, Caldas. Universidad Nacional de Colombia. *Revista de Ingeniería Dyna*. Vol 79 No 172. Pg 31-44.

Goonitikelle, A. and Thomas, E. 2003. Water quality of urbanization: Evaluation of current research. Centre for Built Environment and Engineering Research. Queensland University of Technology.

Goonetilleke, A., Dawes, L., *et al.* 2002. Performance evaluation of septic tanks in the Gold Coast region. Centre for Built Environment and Engineering Research.

Gowd, S. 2008. Distribution of heavy metals in surface water of Ranipet industrial area in Tamil Nadu, India. Environmental Monitoring and Assessment. Pg 197-207.

Guedenon, P., Edoth, A., *et al.* 2012. Arsenic, Cadmium, Copper and Lead Accumulation in Water, Sediments and Fish Species of Oueme River in Bonou. *British Journal of Pharmacology and Toxicology*. Vol 3 No 1. Pg 13-20.

Haixiang, H. 2011. Neutralizing-sedimentation with flocculation process for acid mine drainage treatment. Department Resources and the Environmental, Wuhan University of Technology, China. Pg 4234-4236.

Harris, M. 2000. Some organic amendments for heavy metal toxicity, acidity and soil structure in acid-sulphate mine tailings. *Adelaide Research & Scholarship*. Pg 148-172.

Henneberry, Y., Kraus, T., *et al.* 2011. Removal of inorganic mercury and methylmercury from surface waters following coagulation of dissolved organic matter with metal-based salts. *Science of the Total Environment*. Vol 409 No 3. Pg 631-637.

Hong, K., Myoung, H., *et al.* 2011. Removal of Heavy Metal Ions by using Calcium Carbonate Extracted from Starfish Treated by Protease and Amylase. *Journal of Analytical Science & Technology*. Vol 2 No 2. Pg 75-82.

Igboekwe, M., Akankpo, A., *et al.* Hydrochemical Evaluation of Groundwater Quality in Michael Okpara University of Agriculture, Umudike and Its Environs, Southeastern Nigeria. *Journal of Water Resource and Protection*. Vol 3 No 1. Pg 925-929.

Instituto Tecnológico Geominero de España. 1996. *Manual de Restauración de Terrenos y Evaluación de Impactos Ambientales en Minería*. Madrid, España. Pg 103.

Iriondo, M. 2009. *Introducción a la Geología*. Editorial Brujas. Argentina. Pg 74-76.

Kar, P., Pani, K., *et al.* 2010. Seasonal variation in physico-chemical and microbiological parameters of mahanadiriver water in and around Hirakud, Orissa (India). *International Quarterly Journal of Environmental Sciences*. Vol 4 No 4. Pg 263-271.

Khalifa, L., and Bagane, M. 2011. Cadmium Removal from Aqueous Solution by a Tunisian Smectitic Natural and Activated Clay: Thermodynamic Study. *Journal of Encapsulation and Adsorption Sciences*. Vol 1 No 4. Pg 65-71.

Kleinmann, B. 2011. Book Review-Mine Pit Lakes: Closure and Management. *Mine Water and the Environment*. Volume 1 / 1982 - Volume 30 / 2011.

Lepane, V., Varvas, M., *et al.* 2007. Sedimentary record of heavy metals in Lake RõugeLiinjärv, southern Estonia. *Estonian Journal of Earth Sciences*. Vol 56 No 4. Pg 221-232.

Li, Q. 2011. Activated Carbon Adsorption Technology for the Advanced Treatment of Municipal Secondary Effluent. *Bioinformatics and Biomedical Engineering, (iCBBE) 2011 5<sup>th</sup> Conference International Conference on*. Pg 1-4.

Mas, M., Aguirre, A., *et al.* 2012. Procesos de destrucción de complejos cianurados. Universidad Nacional de San Luis. Congreso Latinoamericano de Ingeniería y Ciencias Aplicadas – Clicap, 2009.

McCarthy, L., Henry, J., *et al.* 2011. Toxicity of Cadmium to Goldfish, *Carassius auratus*, in Hard and Soft Water. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*. Vol 35 No 1. Pg 35-42.

McKenna, A. 2007. Characterizing groundwater-surface water interactions in great smoky mountains national park using hydrologic, geochemical & isotopic data. The University of Tennessee, Knoxville. EE.UU.

Mikkelsen, R. 2010. Soil and Fertilizer Magnesium. International Plant Nutrition Institute. Pg 26-28.

Murshed, M., Rockstraw, D., *et al.* Rapid oxidation of sulfide mine tailings by reaction with potassium ferrate. *Environmental Pollution*. Vol 125 No 2. Pg 245- 253. 56.

Niel, L., Bexfield, L., *et al.* 2004. Geochemical characterization of groundwater flow in the Santa Fe Group aquifer system, Middle Rio Grande Basin, New Mexico. *Water-Resources Investigations Report*.

Nordberg, G., Fowler, B., *et al.* 2007. Metales: Propiedades químicas y toxicidad. Enciclopedia de la salud y seguridad en el trabajo.

Oyarzun, R., Lillo, J., *et al.* 2004. Sedimentos ricos en arsénico en la cuenca hidrográfica del río Elqui (norte de Chile): ¿Contaminación industrial o natural?. Departamento de Ingeniería Geológica y Minera, Escuela Universitaria Politécnica de Almadén, Almadén, España. Pg 2-13.

Özverdi, A., and Erdem, M. 2006.  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$  and  $\text{Pb}^{2+}$  adsorption from aqueous solutions by pyrite and synthetic iron sulphide. Vol 137 No 1. Pg 626-632.

Pacheco, L. y Durán, M. 2007. Uso del agua en la industria minera. Parte 2: estudio de opciones para reciclar el agua del proceso. Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos. Pg 20.

Parello, F., Aiuppa, A., *et al.* 2007. Geochemical characterization of surface waters and groundwater resources in the Managua area (Nicaragua, Central America). *Science Direct Journals*. Vol 23 No 4. Pg 914-931.

Pittagua, M. and Suvires, G. 2006. Chemical composition and water quality of the Castañoriver, Calingasta, San Juan, Argentina. *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas*. Vol 1 No 15. Pg 17-26.

Prapaipong, P., Shock, E., *et al.* 1999. Metal-organic complexes in geochemical processes: temperature dependence of the standard thermodynamic properties of aqueous complexes between metal cations and dicarboxylate ligands. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol 63 No 17. Pg 2547-2577.

Restrepo, O., Montoya, C., *et al.* 2006. Degradación microbiana de cianuro procedente de plantas de beneficio de oro mediante una cepa nativa

*P.fluorescens*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.  
*Revista de Ingeniería DNYA*. Vol 73 No 149. Pg 45-51.

Romero, A., Flores, S., *et al.* 2010. Tratamiento de efluentes de la industria minera con dolomita. *Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial*. UNMSM, Lima, Perú. Vol 13 No 1. Pg 85-90.

Ruíz, V., González, M., *et al.* 2010. Remoción de Cd y Zn de una corriente acuosa de una empresa minera usando humedales artificiales. Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México, México. *Revista Tecnológica Ciencia y Educación*. Vol 25 No 1. Pg 27-34.

Seglins, V., Luksevics, E., *et al.* Bitinas Albertas. 2011. *2nd Student's International Geological Conference*. University of Latvia. Rātnieki, Latvia.

Sezan, M., Masrur, A., *et al.* 2011. Remote Sensing & GIS Based Spatio-Temporal Change Analysis of Wetland in Dhaka City, Bangladesh. *Journal of Water Resource and Protection*. Vol 3 No 11. Pg 781-787.

Shao, E., Wei, J., *et al.* 2009. Application of Ultrafiltration and Reverse Osmosis for Mine Waste Water Reuse. Water in Mining Conference. Perth, Australia. Proceedings Water in Mining 2009. Pg 43-50.

Sheykhi, V. and Moore, F. 2012. Geochemical Characterization of Kor River Water Quality, Fars Province, Southwest Iran. *Water Quality, Exposure and Health*. Vol 4 No 1. Pg 25-38

Shreadah, M., Abdel, S., *et al.* 2012. Mercury and Methyl Mercury in Sediments of Northern Lakes-Egypt. *Journal of Environmental Protection*. Vol 3 No 3. Pg 254-261.

Sultan, K. and Dowling, K. 2006. Arsenic and major cation hydrogeochemistry of the Central Victoria (Australia) surface waters. *Journal Environmental Science (China)*. Vol 18 No 1. Pg 184-192.

Sun, H., Li, J., *et al.* 2012. Heavy Metals' Spatial Distribution Characteristics in a Copper Mining Area of Zhejiang Province. *Journal of Geographic Information System*. Vol 4 No 1. Pg 46-54.

Tabari, S., Saravi, S., *et al.* 2010. Heavy metals (Zn, Pb, Cd and Cr) in fish, water and sediments sampled from Southern Caspian Sea, Iran. *Toxicology and Industrial Health*. Vol 26 No 10. Pg 649-656.

Tijani, M., Onodera, S. 2009. Hydrogeochemical Assessment of Metals Contamination in an Urban Drainage System: A Case Study of Osogbo Township, SW-Nigeria. *Journal of Water Resource and Protection*. Vol 1 No 3. Pg 164-173.

Wang, H., Waldon, M., *et al.* 2009. Surface water sulfate dynamics in the northern Floridas Everglades. *Journal of Environmental Quality*. Vol 38 No 2. Pg 734-741.

Wang, J., Wu, Y., *et al.* 2011. Water Quality Analysis and Acute Toxicity to *Daphnia Carinata* of Various Water Samples from Typical Coal Mining Areas in Guizhou Province. *Journal Environmental Science & Technology*. Vol 34 No 4. Pg 68-73.

Wang, T., Weisman, J., *et al.* 1996. Parameters for Removal of Toxic Heavy Metals by Water Milfoil (*Myriophyllum spicatum*). *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. Vol 57 No 5. Pg 779-786.

Yang, D., Guo, J., *et al.* 2011. Pb Distributions and Sources in Jiaozhou Bay, East China. *Journal of Water Resource and Protection*. Vol 3 No 1. Pg 41-49.

Yuan, X., Li, J., *et al.* 2011. Geochemistry of Water and Suspended Particulate in the Lower Yangtze River: Implications for Geographic and Anthropogenic Effects. *International Journal of Geosciences*. Vol 3 No 1. Pg 81-92.

Zhang, G., Liu, C., *et al.* 2004. Distribution of heavy metals in downstream river waters in the surroundings of several typical metal mines in Guizhou province. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, China.

Zhang, C., Liu, J., *et al.* 2011. Experiments for Standard-attainment Discharge of Mine Wastewater from Dexing Copper Mine Wastewater Treatment Station. *Engineering Science Paper*. Pg 146-149.

Zhang, W., Singh, p., *et al.* 2011. Arsenic (III) Remediation from Contaminated Water by Oxidation and Fe/Al Co-Precipitation. *Journal of Water Resource and Protection*. Vol 3 No 9. Pg 655-660.

Zhu, Y., Merkel, B., *et al.* 2003. The Hydrogeochemistry of Arsenic in the Clara Mine, Germany. *Mine Water and Environment*. Vol 22 No 3. Pg 110-117.