

**Diagnóstico de calidad de agua en dos  
quebradas influenciadas por actividad minera  
en el municipio de El Corpus, Choluteca**

**Sergio Alejandro Urioste Daza**

**Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano**

**Honduras**

Noviembre, 2014

ZAMORANO  
CARRERA DE INGENIERÍA EN AMBIENTE Y DESARROLLO

# **Diagnóstico de calidad de agua en dos quebradas influenciadas por actividad minera en el municipio de El Corpus, Choluteca**

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar  
al título de Ingeniero en Ambiente y Desarrollo en el  
Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

**Sergio Alejandro Urioste Daza**

**Zamorano, Honduras**

Noviembre, 2014

# **Diagnóstico de calidad de agua en dos quebradas influenciadas por actividad minera en el municipio de El Corpus, Choluteca**

Presentado por:

Sergio Alejandro Urioste Daza

Aprobado:

---

Erika Tenorio, M.Sc.  
Asesora Principal

---

Laura Suazo, Ph.D.  
Directora  
Departamento Ambiente y  
Desarrollo

---

Victoria Cortez, M.Sc.  
Asesora

---

Raúl H. Zelaya, Ph.D.  
Decano Académico

# **Diagnóstico de calidad de agua en dos quebradas influenciadas por actividad minera en el municipio de El Corpus, Choluteca**

**Sergio Alejandro Urioste Daza**

**Resumen:** En el municipio de El Corpus, Choluteca, Honduras; se extrae oro a escala industrial a través de cianuración y a escala artesanal a través de amalgamación con mercurio (Hg). Ambos procesos resultan en impactos ambientales y en la salud de las poblaciones. El objetivo del estudio fue cuantificar y comparar el impacto que ambas actividades mineras tienen en la calidad de agua de la red hidrográfica del municipio. Se recolectaron muestras en época seca y lluviosa en 10 puntos de muestreo ubicados en los ríos El Sabroso y San Juan, ambos tributarios del Río Sampile. Se analizaron parámetros físico químicos a partir de los cuales se compararon las diferencias entre época lluviosa y seca en ambos afluentes y se calculó un índice de calidad de agua. El agua del afluente afectado por minería artesanal está muy contaminada y la del afluente afectado por minería industrial está ligeramente contaminada según las categorías establecidas por el índice. La minería artesanal contamina el afluente debido al vertido de sedimentos y Hg. El Hg detectado se encuentra en el rango de  $<0.05$  a  $9103 \text{ ng L}^{-1}$ . Los valores máximos superan los de otros estudios similares en la región y se encuentran muy por encima del valor máximo permitido para aguas destinadas a consumo humano. La minería artesanal tiene mayor impacto en la calidad de agua en comparación con la industrial en El Corpus con base en los parámetros estudiados. Es necesario implementar técnicas sostenibles para la mitigación de impactos provocados por la minería artesanal y la realización de estudios complementarios para determinar el impacto en la salud de los mineros.

**Palabras clave:** Contaminación, índice de calidad de agua, mercurio, metil mercurio, minería artesanal.

**Abstract:** In the Municipality of El Corpus, Choluteca, Honduras; gold is extracted at an industrial scale through cyanidation and at an artisanal scale through amalgamation with mercury (Hg). Both processes result in environmental and human health impacts. The objective of the study was to quantify and compare the impact of both mining activities on water quality of the streams in El Corpus. Water samples were collected during the dry and rainy season in 10 sampling points located in the rivers of El Sabroso and San Juan. Physicochemical parameters were analyzed in order to determine differences between rainy and dry season in both tributaries, and a water quality index (WQI) was calculated. The water from the stream affected by artisanal mining is heavily polluted and the stream affected by industrial mining is slightly polluted based on the WQI. Artisanal mining pollutes water due the discharge of sediments and Hg. Mercury was detected in the range of  $<0.05$  to  $9103.5 \text{ ng L}^{-1}$ . The maximum values exceed those of similar studies in the region and are well above the maximum allowed for water intended for human consumption. Artisanal mining has greater impact on water quality compared to the industry in El Corpus based on the parameters analyzed. It is necessary to implement sustainable techniques for the mitigation of impacts of artisanal mining and to further investigate the impact on the health of the miners.

**Key words:** Artisanal mining, mercury, methyl mercury, pollution, water quality index.

## CONTENIDO

	Portadilla.....	i
	Página de firmas .....	ii
	Resumen .....	iii
	Contenido.....	iv
	Índice de Cuadros, Figuras y anexos .....	v
<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>13</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>24</b>
<b>5</b>	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>25</b>
<b>6</b>	<b>LITERATURA CITADA .....</b>	<b>26</b>
<b>7</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>31</b>

## ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadros		Página
1.	Descripción detallada de los diez puntos de muestreo seleccionados para el análisis de calidad de agua en El Corpus, Choluteca, Honduras, 2014. ....	6
2.	Descripción de los parámetros físico químicos analizados en las muestras de agua recolectadas.....	8
3.	Factores de ponderación (w) utilizados para el cálculo del ICA.....	10
4.	Ecuaciones utilizadas para el cálculo de puntajes individuales (q) del ICA.....	11
5.	Resultados de mercurio total y metil mercurio de estudios realizados en países en vías de desarrollo hasta octubre del 2014. ....	22
6.		
Figuras		
1.	Ubicación de los 10 puntos de muestreo de calidad de agua en la zona de estudio ubicada en el Municipio El Corpus, Choluteca, Honduras, 2014.....	7
2.	Cambios de la temperatura del agua en función de la distancia al punto inicial de la quebrada San Juan, El Corpus, Choluteca, Honduras, 2014.....	13
3.	Cambios en las concentraciones de sólidos suspendidos en función de la distancia al punto inicial de la quebrada San Juan, El Corpus, Choluteca, Honduras, 2014. ....	14
4.	Cambios en las concentraciones de sólidos suspendidos en función de la distancia al punto inicial de la quebrada El Sabroso, El Corpus, Choluteca, Honduras, 2014. ....	14
5.	Cambios en pH en función de la distancia al punto inicial de la quebrada San Juan, El Corpus, Choluteca, Honduras, 2014. ....	16
6.	Cambios en pH en función de la distancia al punto inicial de la quebrada El Sabroso, El Corpus, Choluteca, Honduras, 2014. ....	17
7.	Concentraciones de fosfatos en época seca y lluviosa en la quebrada San Juan, El Corpus, Choluteca, Honduras, 2014. ....	18
8.	Concentraciones de fosfatos en época seca y lluviosa en la quebrada El Sabroso, El Corpus, Choluteca, Honduras, 2014. ....	19

9.	Concentraciones de mercurio total en función de la distancia recorrida en las quebradas San y El Sabroso en época lluviosa, El Corpus, Choluteca, Honduras, 2014. ....	20
10.	Cambio de concentraciones de mercurio total en función de la distancia recorrida en la quebrada El Sabroso, El Corpus, Choluteca, Honduras, 2014. ....	21
11.	Concentración de metil mercurio en época lluviosa en las quebradas San Juan y el El Sabroso, El Corpus, Choluteca, Honduras, 2014.....	21

Anexos		Página
1.	Descripción detallada de los puntos de muestreo 6, 7 y 8 en la zona de confluencia de las quebradas San Juan y El Sabroso, El Corpus, Choluteca, Honduras, 2014.....	31
2.	Resultados de los análisis físico químicos medidos en las muestras recolectadas en los afluentes Sampire, El Sabroso y San Juan, El Corpus, Choluteca, Honduras, 2014.....	32
3.	Mapa litológico de la zona de estudio en El Corpus, Choluteca, Honduras, 2014. Elaborado en base al mapa de unidades geológicas de Honduras obtenido del Instituto Geográfico Militar (IGM).....	33

## 1. INTRODUCCIÓN

La minería es una de las industrias de mayor impacto ambiental en el mundo. La actividad minera genera \$ 962 mil millones anuales, lo que constituye la principal fuente de ingreso para muchos países en vías de desarrollo. El oro es un metal precioso de gran interés, cuya extracción en el año 2013 incrementó en 3.3% en comparación al 2012. Si bien la minería industrial extrae el 87% de la producción de oro a nivel mundial (UNEP 2013), alrededor de 15 millones de personas se dedican a la minería artesanal, generando un estimado de alrededor de \$ 10.5 mil millones anuales (Wade 2013).

El surgimiento de la minería artesanal está relacionado con la pobreza y la escasez de oportunidades económicas de mayor rentabilidad (Kamlongera 2011). En América Latina la actividad se asocia a la falta de protección de recursos naturales, ausencia de regulación y problemas relacionados al desarrollo socioeconómico (Vera *et al.* 2012). Los mineros artesanales están presentes en todos los países de América Latina; siendo Colombia, Perú, Brasil, Ecuador y Bolivia los países de mayor predominancia, debido a la presencia de grandes yacimientos metalúrgicos (ELLA 2012).

En Honduras la minería inició en el año 1525, con la explotación de yacimientos de oro en Trujillo. La actividad decayó debido a la reducción del número de indígenas y a desastres naturales en la época colonial (Newson 1982). Sin embargo, tras los incentivos del gobierno para la explotación minera y el incremento del precio del oro en el año 2005 (Zerbock 2005), la minería se ha rehabilitado en la última década. En el año 2012, la minería industrial representó el 0.8% del PIB en Honduras (Banco Mundial 2012). Por otro lado, la minería artesanal constituye la principal fuente de ingresos en muchos municipios rurales del país.

El municipio de El Corpus, en el Departamento de Choluteca, tiene una superficie de 233.9 km<sup>2</sup> y una población de 23,487 habitantes (Botero *et al.* 2007). Fue fundado en el año 1585, a raíz del descubrimiento de yacimientos de oro en la zona conocida como Clavo Rico (Fiallos 1989). Hasta el año 2007, la tasa de desempleo en el municipio era del 30% y el ingreso per cápita anual de \$ 1384 (Botero *et al.* 2007).

La extracción de oro en el municipio de El Corpus se da a dos escalas, industrial y artesanal. La empresa minera Clavo Rico extrae oro de forma industrial por medio de suspensión cianurada del oro extraído (Departamento de Auditoría de Gestión Ambiental de Honduras 2007). Los mineros artesanales por otro lado, utilizan la técnica de gravitación de amalgamas en medio acuoso.

En comparación a otras técnicas de extracción de oro desarrolladas a nivel mundial, la extracción por medio de suspensión cianurada es la más segura para la salud humana y la de menor impacto ambiental; siempre y cuando se lleve a cabo de forma adecuada (Ata 2010). Los compuestos cianurados no son persistentes en el ambiente, ya que el cianuro se descompone por acción de la luz solar (Johnson *et al.* 2000). Sin embargo, el compuesto puede ser altamente tóxico y requiere de conocimientos técnicos y medidas de protección de seguridad específicas para evitar accidentes letales.

El proceso de extracción por suspensión cianurada consiste en la adición de cianuro de sodio para la disolución de las moléculas de oro a través de la oxidación de las mismas. Posteriormente, el oro disuelto es lixiviado por agitación, recuperado y refinando para su comercialización (Hewitt *et al.* 2012). En el proceso las características físico químicas del agua utilizada para la dilución se alteran. La conductividad eléctrica en el agua incrementa por la presencia de iones metálicos disueltos en el agua. En algunos casos, los niveles de oxígeno disuelto incrementan debido a la difusión de oxígeno para facilitar los procesos de oxidación de los compuestos de oro (Hinton *et al.* 2003).

La descomposición del cianuro por acción de la luz solar libera nitritos en el agua, los cuales al nitrificarse por actividad bacteriana incrementan las concentraciones de nitratos en el agua (Johnson *et al.* 2000). En concentraciones elevadas ( $> 10 \text{ mg L}^{-1} \text{ NO}_3\text{-N}$ ) los nitratos pueden ser tóxicos para animales de sangre caliente (EPA 1997).

El drenaje ácido de minas es el fenómeno de mayor impacto en la actividad minera industrial. Durante la extracción de oro, los minerales de pirita ( $\text{FeS}_2$ ) son expuestos a la intemperie, los cuales al entrar en contacto con el oxígeno y en presencia de agua se oxidan, liberando sulfatos e iones de hidrógeno, que subsecuentemente disminuyen el pH del agua (Dold 2014). La adición de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) se lleva a cabo para elevar el pH tanto del escurrimiento superficial de los minerales expuestos, como para controlar el pH de la solución cianurada en el proceso de extracción de oro. La solución cianurada debe mantenerse a un  $\text{pH} > 10$ , ya que a niveles menores el punto de ebullición del cianuro es de  $26^\circ\text{C}$ . Cuando el cianuro se volatiliza libera ácido cianhídrico (HCN) al ambiente. La inhalación de ácido cianhídrico en concentraciones mayores a 300 ppm es letal para las personas, debido a que el ion cianuro inhibe los procesos de respiración celular (Tutu 2012).

En el proceso de extracción artesanal de oro en El Corpus los mineros utilizan mercurio para formar amalgamas. Con el fin de facilitar el proceso de amalgamación, es necesario reducir el tamaño de partícula de la roca extraída o broza. Para moler la broza, los mineros de El Corpus utilizan trituradoras mecánicas de roca de movimiento circular, conocidas como rastras. Posteriormente agregan mercurio, el cual se mezcla con el material triturado para luego recuperar las amalgamas de oro en la solución, mientras que los sedimentos generados son desechados en los ríos.

Los mineros que no pueden financiar la instalación de rastras aprovechan los sedimentos desechados para recuperar las trazas de oro sobrantes. Dicha acción se realiza mediante la gravitación de las amalgamas de oro, a través de la agitación circular de los sedimentos en recipientes convexos conocidos como bateas. Finalmente, purifican el oro evaporando las

trazas de mercurio en la amalgama. Experiencias a nivel internacional (Hilson y Garforth 2012, Kamlongera 2011) han atribuido la utilización de rastras a mineros experimentados con mayor ingreso económico, los cuales suelen ser migrantes; a diferencia de los mineros de batea, que generalmente suelen ser agricultores locales de subsistencia.

A diferencia de la extracción cianurada, la minería artesanal es altamente contaminante y riesgosa para la salud humana, debido a la persistencia del mercurio en el ambiente (Lusilao-Makiese *et al.* 2013). La actividad surge como una alternativa económica para alivianar la pobreza (Zerbock 2005). Sin embargo, a largo plazo tiene efectos negativos en la economía, debido al deterioro de los recursos naturales y los daños en la salud de la población (Swain *et al.* 2007).

La minería artesanal impacta negativamente la calidad del medio ambiente; contaminando fuentes de agua superficial y subterránea, suelos y aire. La extracción minera artesanal demanda agua a lo largo del proceso de molienda broza y amalgamación. Los sedimentos depositados en el agua por la extracción y molienda de brozas incrementan la turbidez y la concentración de sólidos suspendidos en el agua (Serfor-Armab *et al.* 2004).

La turbidez es un buen indicador de la cantidad de material suspendido en el agua. La temperatura del agua incrementa con la turbidez, debido a que las partículas suspendidas absorben más calor; así mismo, el paso de la luz solar a través del agua es bloqueado, reduciendo la fotosíntesis de las algas y microorganismos acuáticos. Los incrementos en temperatura y menores tasas de fotosíntesis reducen la cantidad de oxígeno disuelto en el agua, el cual es esencial para el desarrollo de organismos y la oxidación de contaminantes químicos en el agua (EPA 1997).

Los sólidos suspendidos elevan las concentraciones de sulfatos, carbonatos y fosfatos; los cuales, en función de la litología y mineralogía del lugar, se encuentran asociados a los metales extraídos. El contenido de  $\text{CaCO}_3$  disuelto en el agua está asociado a la dureza del agua. Los fosfatos son esenciales para la nutrición de plantas y animales; sin embargo, en condiciones naturales, las concentraciones en el agua son bajas, al igual que los nitratos. El incremento en las concentraciones de nitratos y fosfatos resulta en eutrofización del agua (EPA 1997).

Las características físico químicas de los efluentes mineros modifican la conductividad eléctrica del agua. La conductividad eléctrica expresa la capacidad del agua para conducir la corriente eléctrica a través de iones disueltos en el agua. Los elevados valores de conductividad eléctrica ( $> 1000 \mu\text{S cm}^{-1}$ ) son un buen parámetro de contaminación de efluentes mineros, ya que está relacionada a la cantidad de iones metálicos disueltos en el agua. En adición, el parámetro está relacionado a la presencia de sales disueltas, sólidos solubles y cambios en la temperatura del agua (Tutu 2012).

Los procesos de extracción de oro depositan metales pesados asociados a la mineralogía del lugar como cadmio, cobre, manganeso, plomo, oro, plata y arsénico (Frías-Espericueta *et al.* 2009, Wade 2013). Sin embargo, en el proceso de extracción minera artesanal de oro, el mercurio utilizado es el metal pesado que causa mayor impacto en el ambiente y la salud humana.

La extracción minera artesanal de oro es la mayor fuente de contaminación antropogénica de mercurio en el ambiente, liberando alrededor de 1000 Mg anuales de mercurio, equivalentes al 35% de las emisiones mundiales antropogénicas de mercurio (Telmer y Veiga 2009). El 95% del mercurio utilizado en el proceso es liberado al medio ambiente, contaminando el agua, la atmósfera y los sedimentos (UNEP 2013). Se estima que por cada gramo de oro producido, se liberan dos gramos de mercurio al ambiente (Telmer y Stapper 2007).

En el ciclo de producción, el mercurio contamina el agua por medio de la dilución de mercurio en el proceso amalgamación (Spiegel y Veiga 2010). El problema no se concentra en una sola región, ya que los gases de mercurio generados durante la volatilización del elemento en el proceso de quema de amalgama para purificar el oro pueden viajar grandes distancias en la atmósfera, precipitarse e integrarse en la cadena alimenticia (Bose-O'Reilly *et al.* 2010, Wade 2013). Así mismo, la decantación del mercurio en un medio acuoso contamina los sedimentos (Adler Miserendino *et al.* 2013).

Dentro de las diferentes estructuras moleculares del elemento, el metil mercurio (CH<sub>3</sub>Hg) es el más riesgoso para los humanos. El mercurio inorgánico puede ser metilado en los sedimentos por acción de microorganismos acuáticos en presencia de sulfuros. El metil mercurio puede acumularse a lo largo de la cadena trófica de organismos acuáticos, debido a que las tasas de eliminación son menores a las de ingestión (Guedas Seixas *et al.* 2014). Esta situación eleva el riesgo de consumo de especies acuáticas e intoxicación en humanos (Višnjevec *et al.* 2014).

Debido a la naturaleza informal de la actividad minera, la exposición de los mineros al mercurio utilizado y la ausencia de tratamiento de residuos; los riesgos de contaminación y perjuicio a la salud humana son altos. Los mineros que extraen el oro por bateas tienen alto riesgo de contaminación, ya que se sumergen en el agua contaminada por alrededor de ocho horas diarias. Por otro lado, las personas expuestas a la quema de amalgama son los que demuestran mayores niveles de contaminación por mercurio, debido a la ingestión directa de sus vapores (Bose-O'Reilly *et al.* 2010).

En exceso, el mercurio es un potente neurotóxico ya que causa daños en el sistema nervioso central de las personas y deformación del feto en el embarazo (Al-Saleh *et al.* 2014). En ecosistemas acuáticos produce un incremento de mortalidad de peces y afecciones al metabolismo de animales acuáticos (Frías-Espericueta *et al.* 2009).

Los ríos afectados por la actividad minera en El Corpus son tributarios del Río Choluteca, la cual desemboca en el Golfo de Fonseca. El Golfo de Fonseca hospeda la producción de camarón para exportación, uno de los principales rubros económicos de Honduras. La actividad acuícola del Golfo se puede ver afectada por la exposición de los organismos a altos niveles de mercurio. La acumulación del elemento no se limita a las especies acuáticas, ya que se ha evidenciado acumulación de mercurio en carne de cerdo, hortalizas y arroz (Li *et al.* 2011).

Los riesgos asociados a la minería artesanal en el municipio de El Corpus no se restringen a la contaminación ambiental. En julio de 2014, once mineros quedaron soterrados en una

mina artesanal ubicada en El Corpus, debido al derrumbe de una veta durante labores de extracción (Sandoval y Guerrero 2014). Este hecho ha despertado la alerta del gobierno sobre los distintos riesgos que conlleva la extracción minera artesanal en el país, incluyendo los impactos causados por el uso de mercurio. La fecha no se han realizado estudios que cuantifiquen mercurio en medios acuáticos o biota en el país. Los estudios sobre mercurio realizados en Honduras se limitan a una investigación secundaria de contaminación (Veiga 1997) y un informe sobre la situación general del mercurio en el país (Padilla 2002).

El objetivo del estudio fue cuantificar el impacto de la actividad minera industrial y artesanal en la calidad del agua de dos afluentes en El Corpus, Choluteca. Para lograrlo se evaluó parámetros de calidad de agua asociados a la contaminación minera, se comparó los impactos en la calidad del agua afectada por actividad minera industrial en la quebrada El Sabroso y la actividad minera artesanal en la quebrada San Juan en época seca y lluviosa; y se obtuvo un índice de calidad de agua asociado a actividad minera, con el fin de evaluar la magnitud del impacto causado.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó un diagnóstico de contaminación de agua en los ríos San Juan, El Sabroso y la confluencia de ambos en el río Sampile, todos localizados en el municipio de El Corpus, Choluteca, Honduras. La calidad de agua del río El Sabroso se encuentra influenciada por la extracción minera industrial de oro en la Mina Clavo Rico, a diferencia del río San Juan, influenciada por minería artesanal.

Se seleccionaron 10 puntos de muestreo, determinados por la accesibilidad e influencia de la actividad minera de los mismos. Se analizaron cinco puntos influenciados por actividad minera artesanal identificados como SJ2, SJ3 y SJ4 en la quebrada San Juan, y SA1 y SA2 en el río Sampile; y dos puntos influenciados por la descarga de efluentes de minería industrial (ES2 y ES3). En adición, se muestreó la naciente de la quebrada San Juan (SJ1) y El Sabroso (ES1). Finalmente y un punto afectado por el arrastre de los contaminantes provenientes de la zona minera y agrícola (SA3).

Cuadro 1. Descripción detallada de los diez puntos de muestreo seleccionados para el análisis de calidad de agua en El Corpus, Choluteca, Honduras, 2014.

Afluente	Punto	Código	Coordenadas		Descripción
			X	Y	
San Juan	1	SJ1	494195	1465220	Nacimiento de la quebrada. No hay flujo constante de agua.
	2	SJ2	494624	1466432	Descarga de efluente de rastra minera y mineros artesanales de batea.
	3	SJ3	494738	1469654	Influenciado por minería artesanal.
	6	SJ4	494684	1470100	Punto previo a de la confluencia con el El Sabroso.
El Sabroso	4	ES1	497198	1468984	Punto previo al ingreso del cauce a la zona de actividad minera industrial.
	5	ES2	496780	1469350	Influenciado por la descarga de efluentes mineros industriales
	7	ES4	494681	1470114	Punto previo a la confluencia con la quebrada San Juan.
Sampile	8	SA1	494669	1470108	Confluencia de la quebrada San Juan y El Sabroso.
	9	SA2	493205	1470745	Descarga de efluente de rastra minera y mineros artesanales de batea.
	10	SA3	486939	1471215	No se evidenció presencia de mineros artesanales.

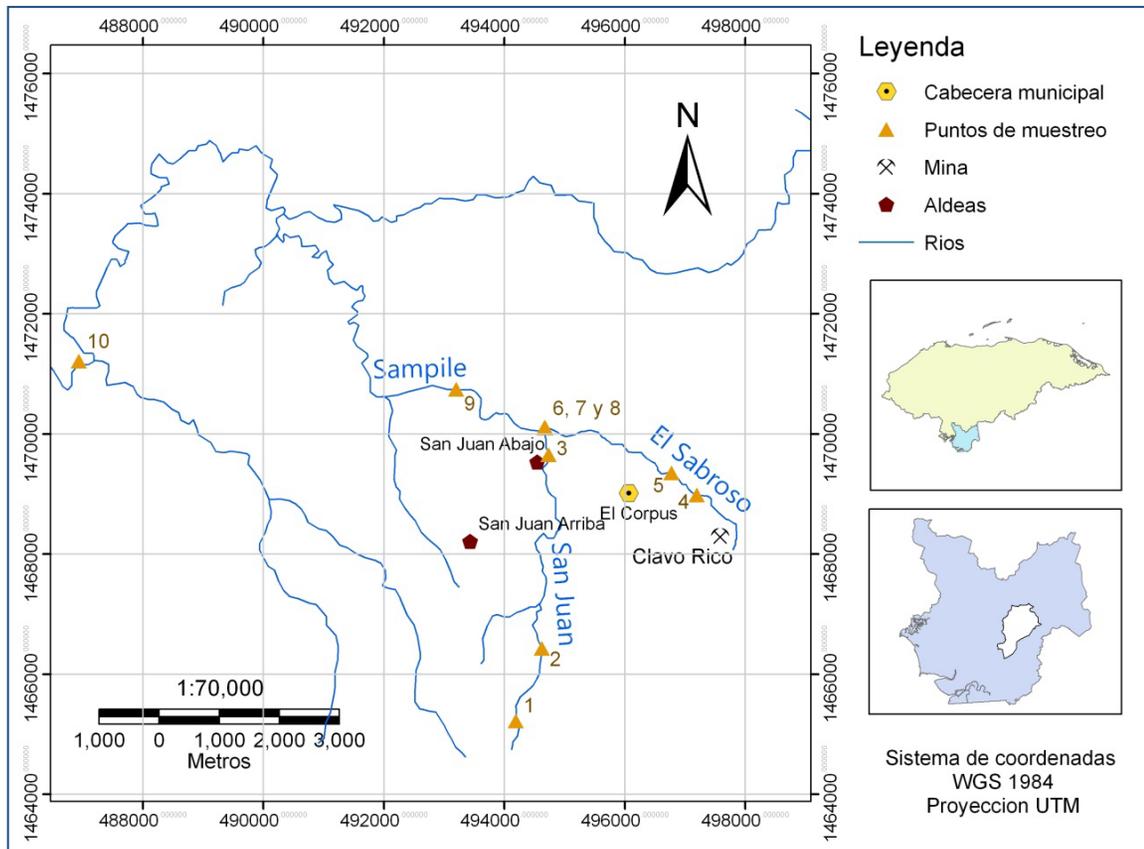


Figura 1. Ubicación de los diez puntos de muestreo de calidad de agua en la zona de estudio ubicada en el Municipio de El Corpus, Choluteca, Honduras, 2014.

Se llevaron a cabo tres muestreos para diagnosticar el estado de los afluentes. Se midieron parámetros de calidad de agua *in situ* y se recolectaron muestras para análisis en laboratorio durante los meses de mayo a julio de 2014. El primer y segundo muestreo se realizó en época lluviosa, y el tercero en época seca. Durante el segundo y tercer muestreo, se aforó el caudal en el décimo punto, mediante el método de aforo con flotador (USBS 2001). El tercer muestreo se llevó a cabo luego de dos semanas después de haberse suspendido toda actividad minera artesanal en la zona.

Se recolectaron dos muestras de 500 mL en botellas plásticas de polietileno de alta densidad. Una muestra fue recolectada para el análisis de turbidez, nitratos, fosfatos, alcalinidad, dureza y sólidos suspendidos, los cuales se llevaron a cabo en el Laboratorio de Calidad de Agua de la Carrera de Ingeniería en Ambiente y Desarrollo (IAD) de Zamorano. La segunda muestra se recolectó para el análisis de mercurio total y metil mercurio en el laboratorio de mercurio del Departamento de Recursos Naturales en la Universidad de Illinois en Urbana Champaign (UIUC), Estados Unidos.

Las muestras fueron recolectadas siguiendo el procedimiento “Clean hands, dirty hands” (Frontier Geosciences 2007). Ambas muestras se recolectaron entre las 8:30 y 14:00 horas

y se preservaron a 10°C por 5 horas durante su transporte al Laboratorio de Calidad de Agua de la Carrera de IAD, donde fueron refrigeradas a aproximadamente 4°C.

El proceso para determinar metil mercurio y mercurio total se dividió en dos etapas: la preparación de muestras, realizada en el Laboratorio de Calidad de Agua de la Carrera de IAD; y el análisis, llevado a cabo en el laboratorio de mercurio de UIUC. Los procesos de pre concentrado y análisis de muestras fueron realizados dentro de una cabina de flujo laminar, con el objetivo de evitar el intercambio gaseoso de mercurio entre la muestra y el ambiente que lo rodea. Los utensilios durante el análisis fueron lavados, desinfectados y almacenados en bolsas Ziploc® para evitar su contaminación.

Cuadro 2. Descripción de los parámetros físico químicos analizados en las muestras de agua recolectadas.

Parámetro	Método analítico	Unidad	Rango de detección
Conductividad eléctrica	4-electródo Multi parámetro Horiba© U-10	<sup>a</sup> $\mu\text{S cm}^{-1}$	0 - 1000
Turbidez	Adsorción de luz dispersada Multi parámetro Horiba© U-10	UNT <sup>b</sup>	°0 - 800
Oxígeno disuelto	Electrodo membrana Multi parámetro Horiba© U-10	$\text{mg L}^{-1}$	0 - 20
Temperatura	Termistor Multi parámetro Horiba© U-10	°C	0 - 50
Potencial de H (pH)	Electrodo de vidrio Multi parámetro Horiba© U-10		0 - 14
Nitratos $\text{NO}_3^-$	Reducción de cadmio Colorímetro HACH® DR/890	$\text{mg L}^{-1}$	0 - 30
Fosfatos $\text{PO}_4^-$	Reducción de cadmio Colorímetro HACH® DR/890	$\text{mg L}^{-1}$	0 - 2.5
Dureza	Titulación con EDTA 0.01 M	$\text{mg L}^{-1}$ <sup>d</sup>	> 0.05
Sólidos suspendidos	Gravimétrico	$\text{mg L}^{-1}$	
Mercurio total	Espectrofotometría de adsorción atómica	$\text{ng L}^{-1}$	> 0.5
Metil mercurio	Espectrometría de fluorescencia atómica	$\text{ng L}^{-1}$	> 1 E <sup>-6</sup>

<sup>a</sup>micro-Siemens por centímetro. <sup>b</sup>Unidades nefelométricas de turbidez. <sup>c</sup>Muestras con turbidez >800 NTU fueron diluidas con agua deionizada (10:1 y 50:1) y analizadas con un colorímetro HACH® DR/890 por el método de adsorción de luz en un rango de 0 a 1000 NTU. <sup>d</sup>Expresado como carbonato de calcio.

Fuente: Horiba © (2006), HACH ® Company (1999), Standard Methods (2005)

Cada muestra se coló a través de un filtro de fibra de cuarzo de 47-mm (Milipore GF/F), y una membrana de poli fluoruro de vinilo de 0.45  $\mu\text{m}$ . Los filtros se ensamblaron en una torre de filtración de politetrafluoretileno (PTFE), la cual se adaptó para ser insertada en

una disecadora de vacío de policarbonato. Debido a que la molécula de metil mercurio es susceptible a cambiar de estructura en presencia de actividad bacteriológica, fue necesario preservar las muestras a 4°C, acidificadas con 2 mL de ácido clorhídrico (HCl) al 10% v/v (0.05 N).

El mercurio está presente en el ambiente en diferentes estructuras moleculares o especies: mercurio elemental (Hg), mercurio II (Hg II), complejos orgánicos de Hg II y otras formas de mercurio (Baralkiewicz *et al.* 2005). El análisis de mercurio total se enfoca en determinar la concentración de mercurio presente en sus diferentes formas en la matriz de análisis. Las concentraciones fueron determinadas a través de espectrofotometría de absorción atómica con vapor frío a 253.7 nm (Shade y Hudson 2005).

Es difícil detectar correctamente trazas de metil mercurio en agua, debido a que tienden a asociarse con moléculas de materia orgánica disueltas (Feyte *et al.* 2010). Para evitar la asociación, las muestras se preconcentraron en columnas de resina tioladas empacadas en cartuchos de extracción de fase sólida (EFS). La preconcentración se basó en el método de catálisis de metil mercurio utilizando tiourea (CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>S), desarrollado por Vermilion y Hudson (2007). La solución de tiourea en contacto con resina tiolada a un pH ácido (~3.5) desliga moléculas de metil mercurio y otros iones metálicos blandos de la materia orgánica disuelta.

Las muestras fueron concentradas succionando las soluciones a través de un cartucho EFS por medio de una bomba peristáltica de 16 canales, a una velocidad de 3 mL min<sup>-1</sup>; a través de tubos de PTFE. Se elevó el pH de 20 mL de muestra acidificada (< 2 a 3.5) añadiendo 1 mL de solución buffer. El buffer fue preparado a partir de 1 mL de citrato de sodio (0.75 M) y 4 mL de tiourea (0.26 M). La solución buffer se agitó por dos horas. La tiourea en el medio ácido toma las moléculas de metil mercurio disueltas en la matriz y las adheridas a la materia orgánica disuelta

La columna de resina fue elaborada con 0.1 g de resina de divinilbenzeno-tiol empacada en un cartucho EFS. La resina fue humedecida con 40 mL de etanol, con el objetivo de lograr un llenado uniforme de la misma. Se añadió 10 mL de eluente preparado a partir de una solución de tiourea (0.15 M), HCl (1 M) y ácido acético (1.75 M). Posteriormente se succionaron 10 mL de agua deionizada a través de la columna para limpiar la resina.

La tiourea en medio básico liga las moléculas de metil mercurio adheridas a su estructura molecular, por lo que se añadió 3 mL de solución buffer de citrato de sodio (0.1 M) para elevar el pH de la resina tiolada a 9. Finalmente se succionó 60 mL de muestra a través de los cartuchos, para que la resina almacenara las moléculas de metil mercurio presentes en la matriz. Los cartuchos fueron empacados y enviados al laboratorio de mercurio de UIUC ocho semanas después de haber recolectado las muestras.

Para obtener una matriz acuosa para el análisis de las muestras, se eluyó 5 mL de solución buffer a través de la resina preconcentrada. La concentración de metil mercurio se determinó mediante un complejo de mercurio-tiourea de cromatografía iónica con generación de vapor frío helado y se detectó por espectrometría de fluorescencia atómica.

El diagnóstico de contaminación de agua de los sitios de muestreo fue calculado utilizando un índice de calidad de agua (ICA) adaptado para contaminación ambiental causada por el procesamiento de minerales (Nasirian 2007). El índice otorga un puntaje por medio de la sumatoria de los puntajes individuales de siete parámetros analizados multiplicados por el peso ponderado para cada parámetro.

$$ICA = \sum_{i=1}^{i=n} q_i w_i \quad [1]$$

Donde:

$q_i$ = Puntaje de calidad de agua para el parámetro.

$w_i$ = Peso de ponderación del parámetro.

$n$ = Número de parámetros

El peso de ponderación de los parámetros es determinado en función de un puntaje de importancia dado a cada parámetro dividido entre el total de puntos asignados (cuadro 3).

$$w_i = \frac{\text{puntaje asignado}}{\sum \text{puntajes asignados}} \quad [2]$$

Cuadro 3. Factores de ponderación (w) utilizados para el cálculo del ICA.

<b>Parámetro</b>	<b>Puntos asignados</b>	<b>Peso de ponderación del parámetros (w)</b>
pH	25	0.15
Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	20	0.12
Oxígeno disuelto	20	0.12
Fosfatos (PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> )	18	0.11
Metales pesados	40	0.24
Conductividad eléctrica	22	0.13
Sólidos suspendidos	25	0.15
totales		
<b>Total</b>	<b>170</b>	<b>1</b>

Los puntajes individuales (q) fueron calculados a través de curvas nominales de ecuaciones derivadas en función de valores máximos permisibles de los parámetros estudiados para descargas de agua a cuerpos receptores (cuadro 4).

Cuadro 4. Ecuaciones utilizadas para el cálculo de puntajes individuales (q) del ICA.

Parámetro	Unidades	Rango de concentración	Ecuación de la curva	Normativa
pH		<sup>a</sup> $x_1 \leq 2$ o $x_1 \geq 12$	$p = 0$	DOE (1998)
		$2 < x_1 < 12$	<sup>b</sup> $p = -0.0185x_1^6 + 0.8068x_1^5 - 13.695x_1^4 + 113.96x_1^3 - 482.71x_1^2 + 987.12x_1 - 759.41$	
Nitratos	mg L <sup>-1</sup>	<sup>c</sup> $x_2 \leq 100$	<sup>d</sup> $n = 3E^{-6} - 06x_2^4 - 0.0009x_2^3 + 0.0908x_2^2 - 4.2812x_2 + 91.769$	CCME (1999)
		$x_2 > 100$	$n = 2$	
Oxígeno disuelto	mg L <sup>-1</sup>	<sup>e</sup> $x_3 \leq 8$ o $x_3 > 140$	<sup>f</sup> $d = 0$	DOE (1998)
		$x_3 \geq 92$	$d = 100$	
		$8 < x_3 < 92$	$d = -0.395 + 0.030x_3^2 - 0.00020x_3^3$	
Fosfatos	mg L <sup>-1</sup>	<sup>g</sup> $x_4 < 1000$	<sup>h</sup> $f = -0.1x_4 + 100$	CCME (1999)
		$x_4 \geq 1000$	$f = 0$	
<sup>i</sup> Metales pesados	mg L <sup>-1</sup>	<sup>j</sup> $x_5 < 1$	<sup>k</sup> $m = -100x_5 + 100$	CCME (1999)
		<sup>l</sup> $x_5 > 1$	$m = 0$	
Cond. eléctrica	μS cm <sup>-1</sup>	<sup>m</sup> $x_6 \leq 700$	<sup>n</sup> $c = -0.0714x_6 + 100$	DOE (1998) y CCME (1999)
		$700 < x_6 \leq 6000$	$c = -0.000943x_6 + 56.6$	
		$x_6 > 6000$	$c = 0$ si $x > 6000$	
Sólidos	mg L <sup>-1</sup>	<sup>o</sup> $x_7 < 20$	<sup>p</sup> $s = 100$	DOE (1997)
		$20 \leq x_7 \leq 150$	$s = -0.77 x_7 + 115.3$	
		$x_7 > 15$	$s = 0$	

<sup>a</sup>pH. <sup>b</sup>q pH <sup>c</sup>Nitratos. <sup>d</sup>q nitratos. <sup>e</sup>Oxígeno disuelto. <sup>f</sup>q oxígeno disuelto. <sup>g</sup>Fosfatos expresados como ortofosfatos. <sup>h</sup>q fosfatos. <sup>i</sup>Mercurio y metil mercurio. <sup>j</sup>Factor promedio de concentración de metales pesados derivados de los coeficientes de concentración (h) de cada metal analizado. El coeficiente de concentración es igual a la concentración del elemento en la muestra dividido entre la concentración máxima permisible del elemento. <sup>k</sup>q metales pesados. <sup>l</sup>Si uno de los coeficientes de concentración de los metales analizados (q) >1, m=0. <sup>m</sup>Conductividad eléctrica. <sup>n</sup>q conductividad eléctrica. <sup>o</sup>Sólidos suspendidos totales. <sup>p</sup>q sólidos suspendidos total.

Fuente: Nasirian (2007).

A partir de los valores obtenidos del ICA calculado se puede calificar el estado de contaminación de cada punto de muestreo, con base en categorías establecidas, donde a mayor puntaje la calidad de agua es mejor (cuadro 5).

Cuadro 5. Categorías de contaminación de aguas basadas en el ICA calculado.

<b>Calidad</b>	<b>Rango</b>	<b>Clase</b>
Muy limpia	90-100	Clase I
Limpia	80-90	Clase II
Moderadamente contaminada	50-80	Clase III
Contaminada	40-50	Clase IV
Muy contaminada	0-40	Clase V

Fuente: Nasirian (2007)

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El caudal en el tercer muestreo, ( $287 \text{ L seg}^{-1}$ ) aforado en época seca; fue menor al del segundo ( $702 \text{ L seg}^{-1}$ ), aforado en época lluviosa en el río Sampile (SA3), confluencia de las quebradas El Sabroso y San Juan. Menores tasas de precipitación derivan en mayor evapotranspiración de los cauces, lo que incrementa el contenido de iones disueltos en el agua; por lo que la conductividad eléctrica durante el tercer muestreo incrementó con relación al segundo muestreo en el 70% de los puntos analizados.

El incremento en la temperatura del agua disminuye la cantidad de oxígeno disuelto (EPA 1997). La temperatura incrementa en función de la distancia en los tres muestreos realizados (Figura 2). Sin embargo, la disminución del oxígeno disuelto sólo se hace evidente en SA2 y SA3 en el tercer muestreo, y segundo muestreo; donde los cambios en temperatura incrementan en  $3.8$  y  $4^\circ\text{C}$  respectivamente.

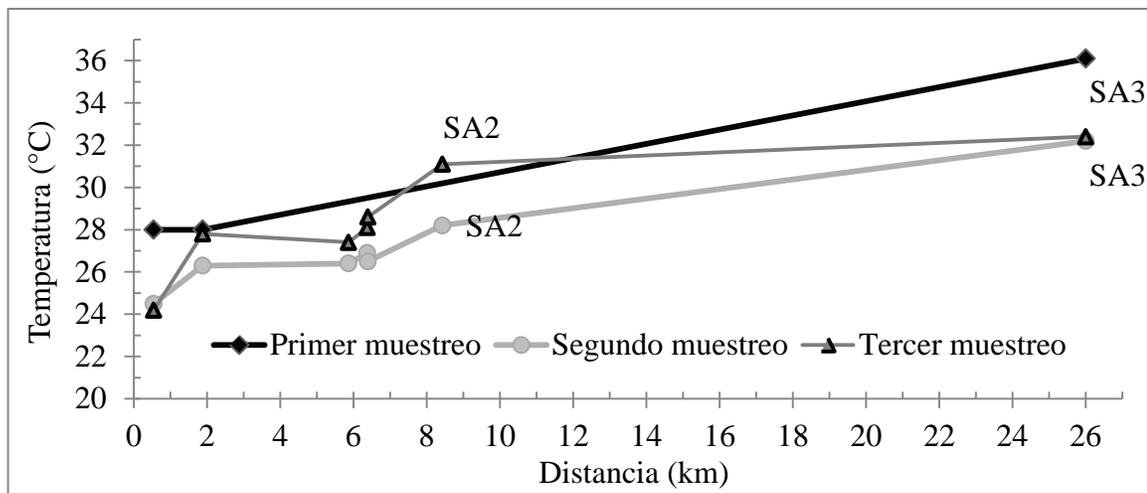


Figura 2. Cambios de la temperatura del agua en función de la distancia al punto inicial de la quebrada San Juan, El Corpus, Choluteca, Honduras, 2014.

El aporte de sedimentos provenientes de la molienda de broza incrementa la turbidez y la cantidad de sólidos suspendidos en la quebrada San Juan. Por otro lado, durante el proceso de extracción industrial también trituran las rocas minerales; sin embargo, el agua en la quebrada El Sabroso es menos turbia debido al control de los efluentes desechados y a la naturaleza misma del proceso utilizado. Durante los muestreos se evidenció la presencia de sólidos sedimentables muy finos a lo largo del cauce de El Sabroso.

Debido a un menor caudal que disminuye la dilución, la cantidad de sólidos suspendidos es mayor en época seca en ambas quebradas, a excepción del punto SA3.

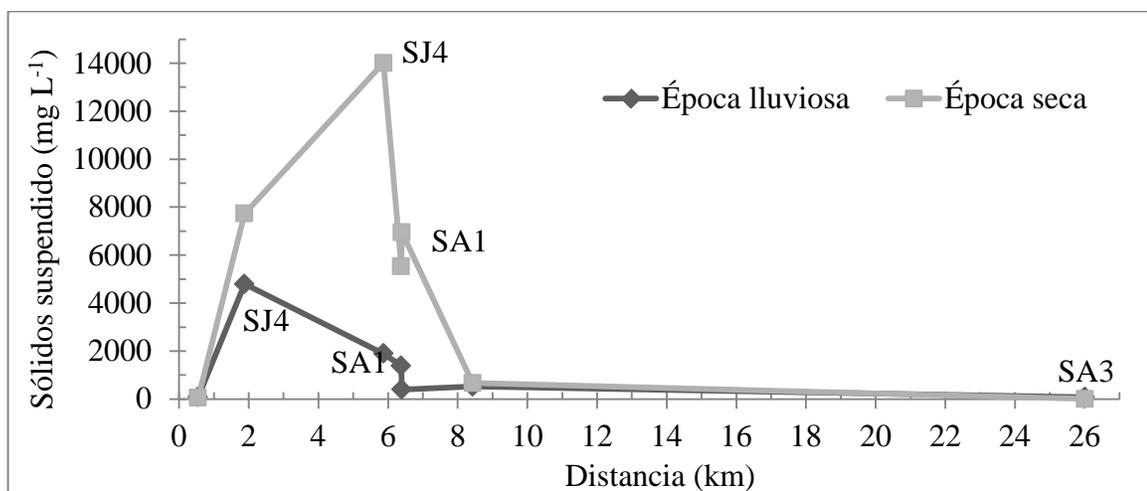


Figura 3. Cambios en las concentraciones de sólidos suspendidos en función de la distancia al punto inicial de la quebrada San Juan, El Corpus, Choluteca, Honduras, 2014.

Entre el punto ES3 y la confluencia con la quebrada San Juan en (SA1), los sólidos suspendidos incrementan de 19 a 398 mgL<sup>-1</sup> en época lluviosa, y de 23 a 490 mg L<sup>-1</sup> en época seca. Así mismo, en época lluviosa existe una reducción de 1385 a 398 mg L<sup>-1</sup> en la desembocadura de la quebrada San Juan (SJ4 a SA1), debido a la dilución aportada por la quebrada El Sabroso.

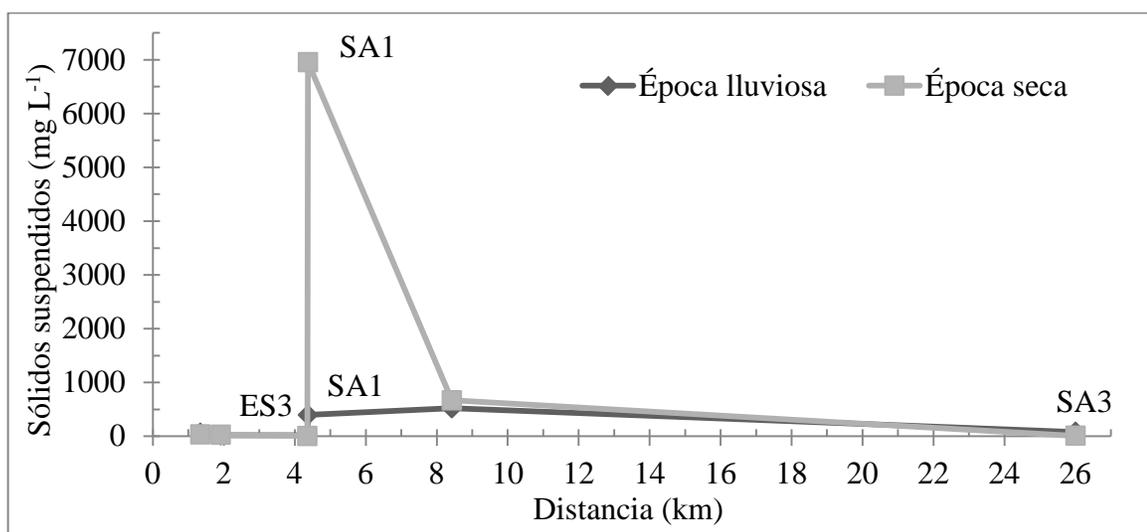


Figura 4. Cambios en las concentraciones de sólidos suspendidos en función de la distancia al punto inicial de la quebrada El Sabroso, El Corpus, Choluteca, Honduras, 2014.

En la quebrada El Sabroso la turbidez es mayor en época seca en comparación a la de en época lluviosa, debido a menor dilución y arrastre de sedimentos. La turbidez incrementa de 23 a 490 NTU en una distancia de 10 m aguas abajo durante la época lluviosa y de 2 a 240 NTU en época seca (Figura 5).

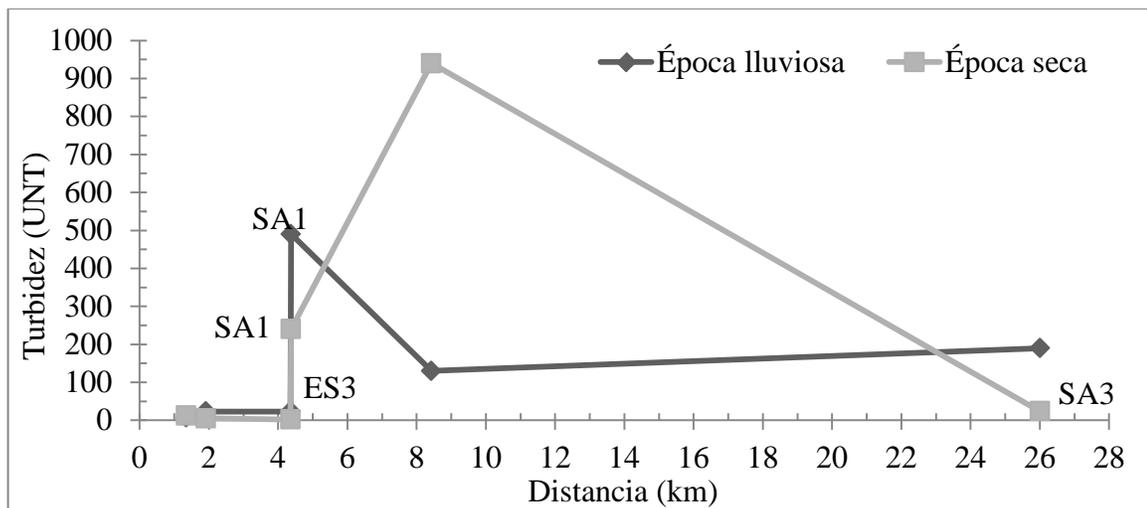


Figura 5. Cambios de turbidez en función de la distancia al punto inicial de la quebrada El Sabroso, El Corpus, Choluteca, Honduras, 2014.

Contrario al comportamiento de la quebrada El Sabroso, en la quebrada San Juan la turbidez es mayor en época lluviosa, debido a una mayor actividad minera en comparación a la época seca (Figura 6). Sólo cinco de los puntos muestreados cumple con los estándares establecidos por la agencia de protección ambiental de los Estados Unidos (EPA) de turbidez para calidad de agua destinada a consumo humano (EPA 2012).

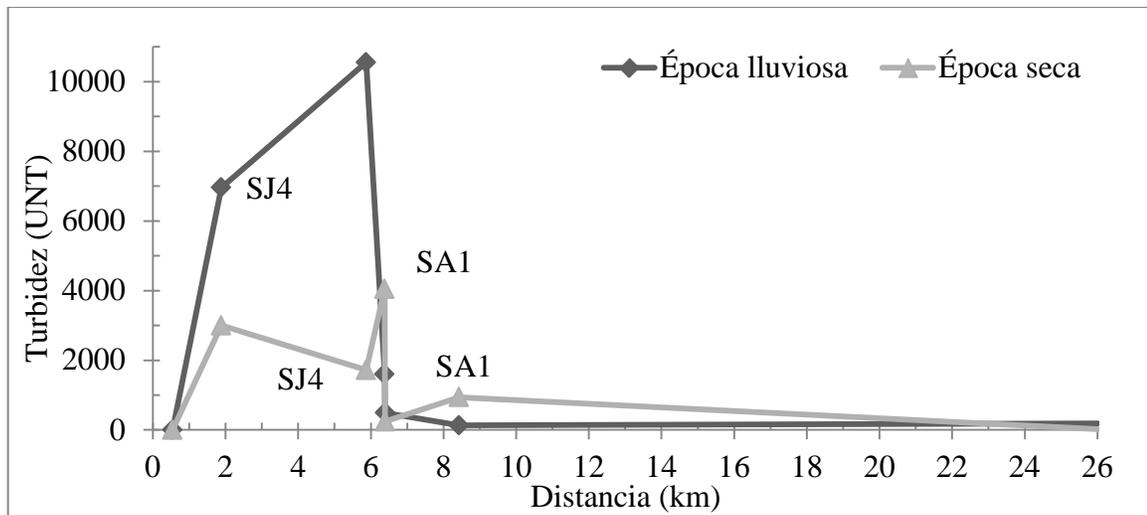


Figura 6. Cambios de turbidez en función de la distancia al punto inicial de la quebrada San Juan, El Corpus, Choluteca, Honduras, 2014.

Las concentraciones de oxígeno disuelto se encuentran en un rango de 2.6 y 6.91 mg L<sup>-1</sup>. Las concentraciones más bajas corresponden a SJ1, donde el agua está confinada. La saturación promedio de oxígeno disuelto en la quebrada El Sabroso es mayor en época lluviosa que en época seca, al contrario, en los afluentes San Juan y Sampile es menor. La disminución en oxígeno coincide con los resultados obtenidos por Mol y Ouboter (2004). La diferencia con los afluentes San Juan y Sampile puede ser explicada por la adición de oxígeno disuelto en los procesos de cianuración suspendida debido a que no se presentan en este sitio condiciones topográficas que favorezcan la aireación. El cianuro se disuelve con mayor efectividad si los niveles de oxígeno son altos (Hinton *et al.* 2003).

Los valores de pH encontrados están entre 5.45 a 8.78 para todos los sitios analizados. En la quebrada El Sabroso, el pH disminuye entre ES1 y ES2, influenciado por la descarga de aguas residuales de la mina Clavo Rico, sin embargo, tiende a aumentar en ES3. Durante los procesos de extracción minera industrial el pH puede disminuir por efectos del drenaje ácido de minas (Dold 2014), sin embargo, es neutralizado por la adición de CaCO<sub>3</sub>.

El pH en la quebrada San Juan es mayor a la del El Sabroso, con mayor predominancia en época lluviosa. Así mismo, incrementa en función de la distancia, debido al arrastre de sedimentos depositados. A un mayor arrastre de sedimentos, mayor oxidación de sulfatos asociados a compuestos metálicos y subsecuente liberación de aniones (Tutu 2012). En el punto de confluencia de ambas quebradas (SA1), el pH disminuye en relación a SJ e incrementa en relación a ES3 (Figura 7).

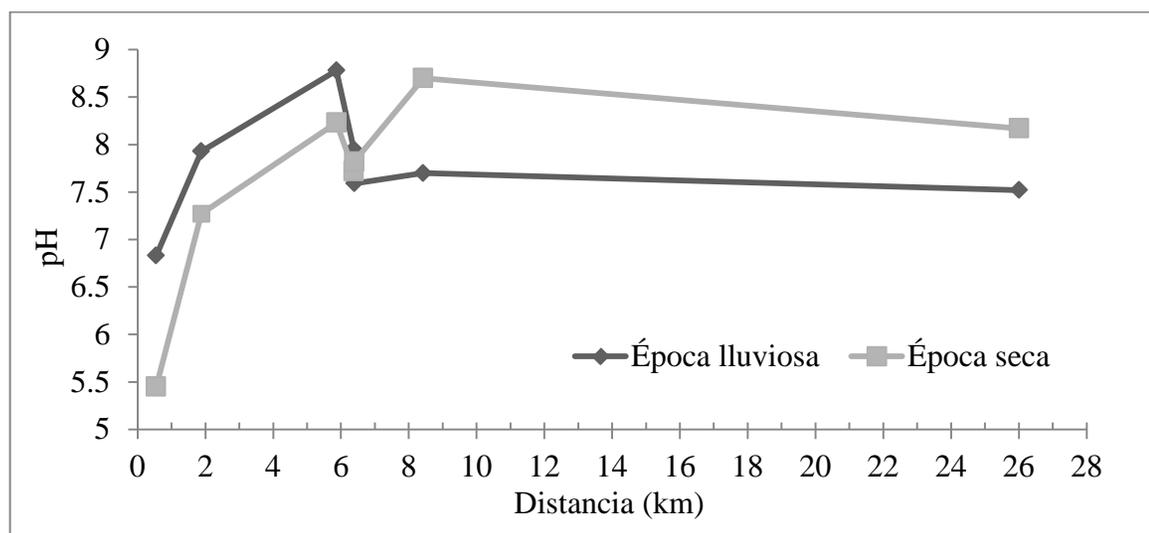


Figura 5. Cambios en pH en función de la distancia al punto inicial de la quebrada San Juan, El Corpus, Choluteca, Honduras, 2014.

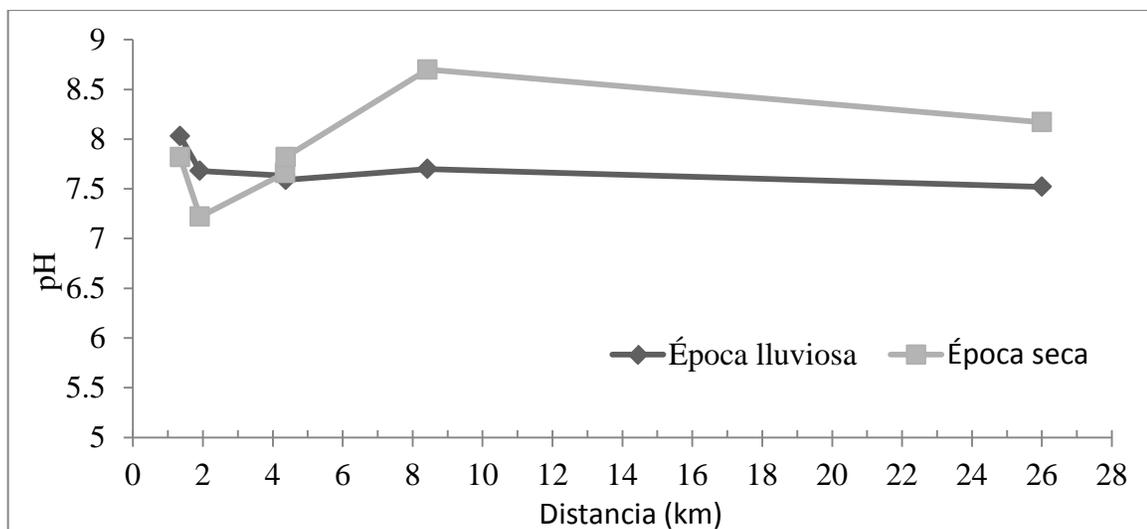


Figura 6. Cambios en pH en función de la distancia al punto inicial de la quebrada El Sabroso, El Corpus, Choluteca, Honduras, 2014.

La conductividad eléctrica en el afluente El Sabroso fue mayor en comparación con el afluente San Juan, debido a la disolución de iones metálicos en el agua por efecto de los procesos de suspensión cianurada. Disminuciones en el pH favorecen los procesos de oxidación de sulfatos metálicos, incrementando la cantidad de iones disociados, que subsecuentemente incrementan la conductividad eléctrica (Tutu 2012). Sin embargo, en la quebrada El Sabroso la relación indirecta entre pH y conductividad eléctrica no se cumple, debido a la capacidad buffer del  $\text{CaCO}_3$ .

El uso de  $\text{CaCO}_3$  en la mina Clavo Rico, se manifiesta en los valores de la dureza del agua. Estos valores varían entre 0.065 a 4.732  $\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$  en ambas quebradas. Los valores están dentro el rango de agua suave, equivalente a bajas concentraciones de iones disueltos de calcio y magnesio (USGS 2014). Existe un incremento considerable de dureza entre ES1 y ES2; donde la concentración cambia de 0.104 a 1.352  $\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$  en época lluviosa, y de 0.442 a 4.732  $\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$  en época seca. Sin embargo, las concentraciones decaen en SJ3 a 0.676 y 1.04  $\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ , para época seca y lluviosa respectivamente.

La adición de  $\text{CaCO}_3$  incrementa la cantidad de iones disueltos de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) en el agua. Así mismo, la disolución de las sales de iones de sodio ( $\text{Na}^+$ ) provenientes del cianuro de sodio, incrementan en menor proporción la dureza del agua. Los iones de  $\text{Ca}^{2+}$ , junto a los de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{HCO}_3^-$ ; expresan en promedio el 90% de la conductividad eléctrica en el agua (Langereis *et al.* 1999).

En la quebrada El Sabroso la dureza es menor en época lluviosa que en época seca, por dilución de las concentraciones de  $\text{CaCO}_3$  con el incremento del caudal. Al contrario, en la quebrada San Juan, la dureza es mayor en época lluviosa hasta su confluencia con la quebrada El Sabroso (SA1), donde la dureza incrementa de 0.104 a 1.015  $\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$  debido al aporte de  $\text{CaCO}_3$  de la quebrada El Sabroso. En época lluviosa, el arrastre de los

sedimentos desechados por las rastras artesanales incrementa la cantidad de iones de  $\text{Ca}^+$  y  $\text{Mg}^+$ , asociados a sólidos suspendidos en el agua, incrementando la dureza del agua. Esta tendencia podría explicar la fuente de iones de  $\text{Ca}^{2+}$ , que en el caso de El Sabroso sería el  $\text{CaCO}_3$  añadido en los procesos industriales y en la quebrada San Juan el arrastre de sólidos desechados por las rastras artesanales.

En 34 de los 40 puntos muestreados, el pH incrementa con la dureza, por la adición de  $\text{CaCO}_3$  (SRAC 1992). Los puntos ES1, ES2 y ES3 tomados en época seca y lluviosa no muestran la misma tendencia. En adición, cabe recalcar que entre el punto SJ1 y SJ2, la dureza incrementa de 0.104 a 0.832  $\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$  en la época lluviosa y de 0.065 a 0.439  $\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$  en época seca; lo cual puede estar relacionado con el aporte de sedimentos por las actividades mineras en SJ2.

La adición de  $\text{CaCO}_3$  provoca que los iones de calcio se adhieran a los fosfatos, formando fosfatos de calcio, los cuales no forman parte de la fase soluble, pues se precipitan como sedimentos (Kogovšek 2011). La presencia de fosfatos podría estar asociada a la presencia de apatita en el lugar (Lottermoser 2010). La naciente de la quebrada San Juan es la única zona del área de estudio que pertenece a la unidad geológica de rocas intrusivas del cretácico terciario, la cual es rica en granito y diorita, esta última contiene apatita en su composición (Wang *et al.* 2003).

Las concentraciones de fosfatos están en un rango de 0.12 a 0.71  $\text{mg L}^{-1}$ . En época de alta precipitación, hay mayor concentración de fosfatos en el afluente San Juan, hasta su confluencia con el río Sampile (SA1) (Figura 9), donde las concentraciones de fosfatos fueron mayores en época seca. Así mismo, en la quebrada El Sabroso, en ES1 y ES2 las concentraciones fueron superiores en época lluviosa; y en ES3 y los subsecuentes puntos sobre el río Sampile fueron mayores en época seca.

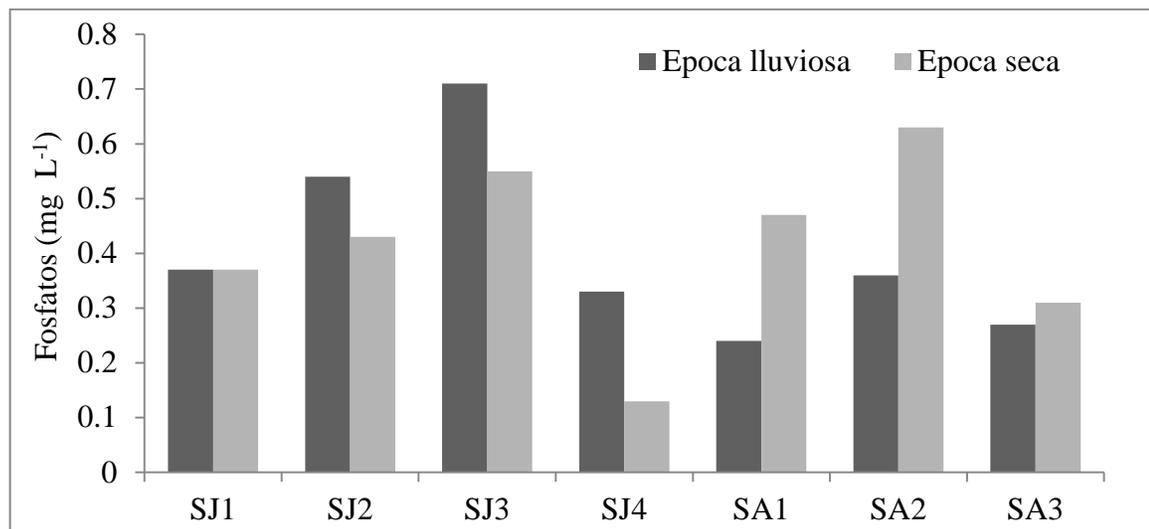


Figura 7. Concentraciones de fosfatos en época seca y lluviosa en la quebrada San Juan, El Corpus, Choluteca, Honduras, 2014.

Las concentraciones de fosfatos a lo largo de la quebrada San Juan fueron mayores a las de la quebrada El Sabroso, a excepción de ES3 en época seca. Las diferencias pueden estar asociadas a que en época lluviosa hay mayores tasas de erosión debido a la escorrentía, la cual arrastra mayor cantidad de sedimentos provenientes del material geológico de la parte alta de la Cuenca. El incremento en concentraciones e ES3 y los puntos sobre el río Sample (Figura 10) pueden atribuirse al incremento en la concentración de fosfatos aportados por la descarga de aguas domiciliarias y agrícolas.

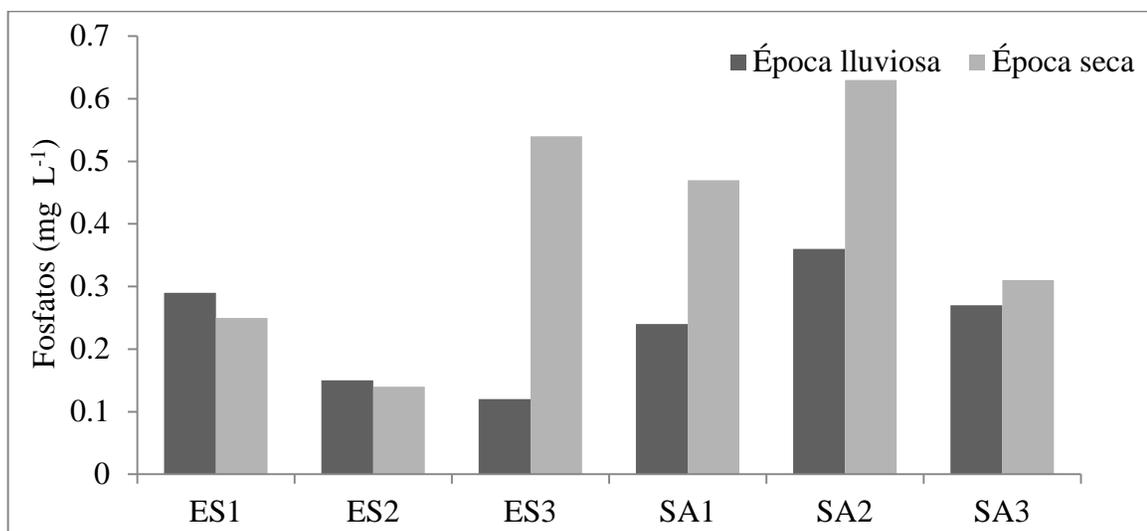


Figura 8. Concentraciones de fosfatos en época seca y lluviosa en la quebrada El Sabroso, El Corpus, Choluteca, Honduras, 2014.

Las concentraciones de nitratos se encuentran en el rango de 0.6 a 13.4 mg L<sup>-1</sup> NO<sub>3</sub>, incluso debajo del rango establecido por la EPA para sustento de la vida acuática en agua dulce (1997). Las concentraciones analizadas fueron mayores en la quebrada El Sabroso en comparación a la quebrada San Juan, tanto en época seca como en época lluviosa. El incremento puede suceder debido a la descarga de aguas residuales domésticas o agrícolas o también verse afectado por el proceso de suspensión cianurada en la mina Clavo Rico.

En el tercer muestreo, se evidencia un incremento en las concentraciones de nitratos de ES1 a ES2 (2 a 6.7 mg L<sup>-1</sup>) y un decremento en el pH (7.82 a 7.22). La misma tendencia sucede en ambos puntos analizados en el segundo muestreo, pero con cambios moderados en las concentraciones de nitratos (1.3 a 2.8 mg L<sup>-1</sup>) y en el pH (8.03 a 7.68). Los niveles de nitratos incrementan durante el proceso de suspensión cianurada, debido a la nitrificación de iones disociados presentes en los compuestos cianurados. Los nitratos en presencia de oxígeno disuelto, oxidan sulfatos ferrosos, disminuyendo el pH debido a la liberación de hidrogeniones en el agua (Bosch y Meckenstock 2012). A menor pH los procesos de desnitrificación se aceleran, disminuyendo las concentraciones de nitratos (Johnson *et al.* 2000).

Los niveles de mercurio fluctúan en el rango de  $<0.05$  a  $9103.5 \text{ ng L}^{-1}$ . El cambio en concentración por efecto de las actividades mineras artesanales se evidencia en SJ1, donde la concentración es de  $66.7 \text{ ng L}^{-1}$  e incrementan drásticamente en a  $9103.5 \text{ ng L}^{-1}$  en SJ2. Sin embargo, los niveles se regulan corriente abajo en el río Sampile, a 24.12 km en SA3, reduciendo a  $15.3 \text{ ng L}^{-1}$ .

Al comparar ambos ríos, las concentraciones en la quebrada San Juan fueron mayores a las de El Sabroso. Durante el segundo muestreo la concentración en ES2 y ES3 en el río El Sabroso es de 2.4 y  $35,8 \text{ ng L}^{-1}$ , donde subsecuentemente incrementa a  $203 \text{ ng L}^{-1}$  en su confluencia con la quebrada San Juan (SA1), llegando a un máximo de  $380.8 \text{ ng L}^{-1}$  en SA2, sitio afectado por la descarga de efluentes de una rastra artesanal y la presencia de mineros de batea. En contraste en la quebrada San Juan las concentraciones para SJ2 y SJ4 fueron de 258.2 y  $550.4 \text{ ng L}^{-1}$  respectivamente; reduciendo al confluir con El Sabroso en SA1 (Figura 11).

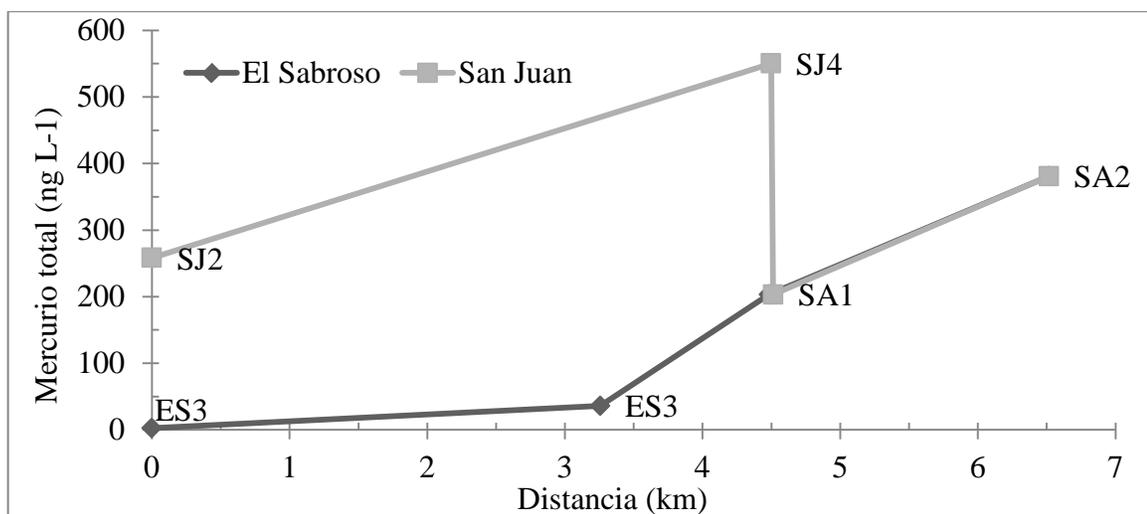


Figura 9. Concentraciones de mercurio total en función de la distancia recorrida en las quebradas San y El Sabroso en época lluviosa, El Corpus, Choluteca, Honduras, 2014.

Las concentraciones de mercurio en la quebrada El Sabroso y el río Sampile fueron mayores en época lluviosa que en época seca (Figura 12). El incremento en precipitación provoca mayores tasas de escorrentía, que a la vez es potenciada por la deforestación del lugar y erosión de los suelos. Los sedimentos concentran el mayor porcentaje del mercurio precipitado en el proceso de amalgamación (Melcalf y Veiga 2012), por lo que al ser disueltos en el agua liberan iones de  $\text{Hg}^{2+}$ , incrementando las concentraciones de mercurio en el agua (Maurice-Bourgoin, *et al.* 1999).

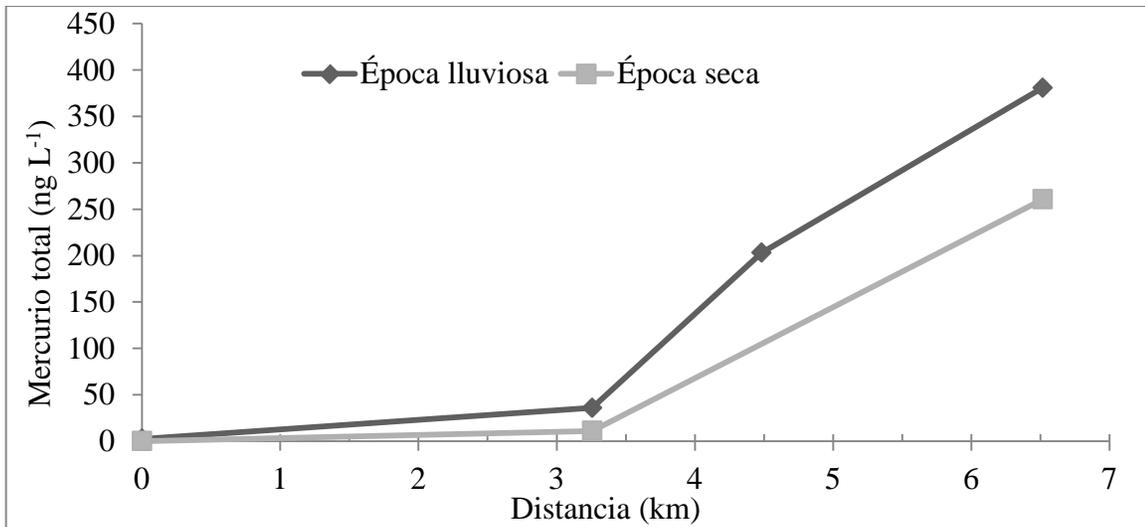


Figura 10. Cambio de concentraciones de mercurio total en función de la distancia recorrida en la quebrada El Sabroso, El Corpus, Choluteca, Honduras, 2014.

Las concentraciones de metil mercurio en están entre 0.6 a 2 ng L<sup>-1</sup>, siendo mayor en los puntos influenciados por minería artesanal en la quebrada San Juan en comparación con la concentración de metil mercurio analizada en el punto ubicado en la quebrada El Sabroso (ES2) (Figura 13). Dado que la EPA no establece un máximo permisible de concentración de metil mercurio en agua dulce, es necesario determinar la cantidad de metil mercurio en los microorganismos acuáticos de la zona. Los rangos encontrados coinciden con los resultados de metil mercurio reportados en Surinam por Gray *et al.* (2002), sin embargo, fueron considerablemente mayores a los encontrados en Bolivia por Maurice-Bourgoin *et al.* (1999).

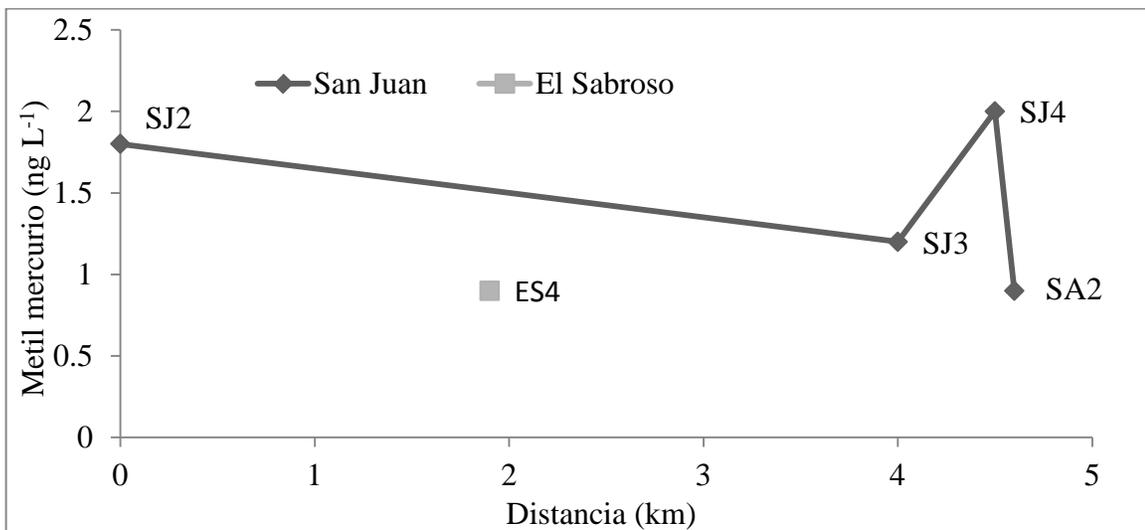


Figura 11. Concentración de metil mercurio en época lluviosa en las quebradas San Juan y el El Sabroso, El Corpus, Choluteca, Honduras, 2014.

El rango de concentración de mercurio ( $186.1 - 9103.5 \text{ ng L}^{-1}$ ) coincide con los resultados encontrados por Souza *et al.* (1990) y Tomiyasu *et al.* (2013) en ríos contaminados por minería artesanal en Brasil e Indonesia. Sin embargo, las concentraciones encontradas en la quebrada San Juan son sustancialmente mayores a estudios realizados por Orathinkal *et al.* (2011), Nogueira *et al.* (1997) y Gray *et al.* (2002) en otros contextos similares de explotación minera en países en vías de desarrollo.

Las concentraciones de mercurio analizadas en puntos distantes a los centros de minería artesanal (Mol y Ouboter 2004, Maurice-Bourgoin *et al.* 1999) coinciden con las disminuciones en la concentración obtenida en SA3, ubicado a 18 km del último punto de SA2. Pese a que las concentraciones de mercurio persisten en el lugar de contaminación, estas disminuyen con la distancia que recorre el cauce, debido a la precipitación del elemento y su subsecuente acumulación en los sedimentos (Lusilao-Makiese *et al.* 2013).

Las concentraciones halladas en la quebrada El Sabroso ( $< 0.05 - 260.6 \text{ ng L}^{-1}$ ) coinciden con los rangos analizados por Lusilao-Makiese *et al.* (2013), en un río afectado por minería industrial de oro. Sin embargo, los rangos son mayores a los presentados en estudios realizados en ríos sin contaminar (Gray *et al.* 2002, Mol y Ouboter 2004). Solo cinco de las muestras analizadas son menores al promedio mundial de mercurio en agua dulce, el cual es de  $25 \text{ ng L}^{-1}$  (OMS 2010).

Cuadro 5. Resultados de mercurio total y metil mercurio de estudios realizados en países en vías de desarrollo hasta octubre del 2014.

Actividad	Mercurio total ( $\text{ng L}^{-1}$ ) Rango	Metil mercurio ( $\text{ng L}^{-1}$ ) Rango	País	Referencia
Minería industrial	0.01 – 223	0.5 – 55.5	Sudáfrica	Lusilao-Makiese <i>et al.</i> 2013
Minería artesanal	0.01– 9970		Brasil	Souza <i>et al.</i> 1990
	260 - 9070		Indonesia	Tomiyasu <i>et al.</i> 2013
	2000 - 3000		Papua Nueva Guinea	Orathinkal <i>et al.</i> 2011
	130 - 500		Brasil	Nogueira <i>et al.</i> 1997
	11 - 930	0.05 - 3.8	Surinam	Gray <i>et al.</i> 2002
	2.9 - 3	0.2 - 0.6	Bolivia	Maurice-Bourgoin <i>et al.</i> 1999
	<0.67 - 0.59		Brasil	Mol y Ouboter 2004
Sin actividad minera	6.4 - 10	0.08 - 0.3	Surinam	Gray <i>et al.</i> 2002
	2.2 - 2.6		Surinam	Gray <i>et al.</i> 2002
	<0.05		Brasil	Mol y Ouboter 2004

En 12 de los 13 puntos analizados, el mercurio total supera el máximo permisible de  $2 \text{ ngL}^{-1}$  establecido por la EPA (1997) si esta agua fuera destinada al consumo humano. La

calidad de agua en los puntos de muestreo analizados la quebrada El Sabroso, la cual no está afectada por minería artesanal, se encuentra contaminada con mercurio. La entrada de mercurio en la quebrada puede darse por la contaminación del acuífero que alimenta la quebrada El Sabroso, actividades de extracción artesanal previas al establecimiento de los procesos de extracción cianurada o precipitación de vapores de mercurio generados en los procesos de queama de amalgama (Bose-O'Reilly *et al.* 2010, Wade 2013).

El cálculo del Índice de Calidad de Agua (ICA) otorgó un diagnóstico de la calidad de agua de los afluentes estudiados. Los índices están en un rango de 38 a 67, donde siete puntos se encuentran en la categoría de calidad de agua “muy contaminada” y sólo cuatro en “ligeramente contaminada”. El punto con mejor calidad de agua es ES1 en época seca, el único lugar donde las concentraciones de mercurio encontradas no exceden el máximo de concentración admisible. Por otro lado el punto de menor calidad corresponde a SA2 en época seca, lugar de descarga de los efluentes de una rastra artesanal, así mismo, SA2 es el único punto calificado en la clase de calidad de agua V, la más baja del sistema.

No existen diferencias notorias entre época seca y época lluviosa en los valores de Hg encontrados, sin embargo, el ICA de El Sabroso es mayor a de la quebrada San Juan. Los puntos de muestreo ubicados en el río El Sabroso fueron catalogados como ligeramente contaminados (clase III), a diferencia de los puntos ubicados en el río San Juan y Sample, categorizados como muy contaminados. La contaminación en el río San Juan disminuye en la confluencia con el río El Sabroso, un comportamiento antagónico se observa en El Sabroso. Si bien el número de rastras mineras incrementa en función de la distancia en la quebrada San Juan, la calidad de agua mejora por efecto de la dilución.

Los factores con menor puntaje en el cálculo del índice fueron las concentraciones de sólidos suspendidos, mercurio y oxígeno disuelto, donde sólo una muestra (ES1 del tercer muestro) no superó el nivel máximo permisible de mercurio y ninguna cumplió con los parámetros de oxígeno disuelto. Esto evidencia la contaminación por mercurio en ambas quebradas y el impacto que tiene en la calidad del agua. La interacción entre los distintos factores que afectan la calidad y cómo estos se ven influenciados por las prácticas mineras contribuyen a un mejor entendimiento de los impactos generados por la minería artesanal, a partir de los cuales se pueden presentar propuestas para la mitigación.

La contaminación por mercurio representa un alto riesgo para la salud humana. Pese a que las personas de El Corpus no utilizan el agua de las quebradas para consumo humano, se evidenció la presencia de animales domésticos y el constante contacto de los mineros con agua contaminada. El metil mercurio se bioacumula en plantas y animales, que al ser consumidos por los humanos (Višnjevec *et al.* 2014) incrementan los niveles de mercurio en el organismo causando daños persistentes en el sistema nervioso central (Bose-O'Reilly *et al.* 2010). Así mismo, el mercurio puede ingresar al organismo de forma cutánea, lo que representa un elevado riesgo para los mineros de batea (Li *et al.* 2011).

## 4. CONCLUSIONES

- El proceso de suspensión cianurada tiene menor impacto en la calidad de agua de los afluentes de El Corpus en comparación a la minería artesanal, sin embargo, el tratamiento de efluentes mineros en la mina Clavo Rico altera la composición físico-química del afluente El Sabroso, lo que se refleja en el incremento de dureza y conductividad eléctrica en el agua.
- El arrastre de sedimentos en época lluviosa incrementa la cantidad de contaminantes en el afluente San Juan, asociados a la composición físico-química de los materiales extraídos y procesados por los mineros artesanales.
- El afluente San Juan se encuentra muy contaminado por el vertido de sedimentos y mercurio en los procesos de extracción minera artesanal. Las concentraciones de mercurio encontradas, revelan uno de los mayores grados de contaminación estudiados hasta la fecha en países en vías de desarrollo.
- Las actividades mineras artesanales y las descargas de mercurio asociadas a las mismas constituyen una amenaza a la salud de las poblaciones aguas-abajo y en los márgenes de las quebradas estudiadas en El Corpus. Los valores encontrados superan considerablemente las concentraciones de mercurio y metil mercurio recomendadas por la EPA en aguas destinadas a consumo humano.

## 5. RECOMENDACIONES

- Verificar el cumplimiento con la normativa nacional por parte de la empresa minera Clavo Rico y desarrollar normativas que regulen la actividad minera artesanal, tales como la certificación de mineros, exigencias en seguridad laboral y tratamiento adecuado de los residuos.
- Asignar recursos para el diagnóstico y monitoreo de los impactos causados por la minería artesanal, así como el desarrollo de infraestructura adecuada y adquisición de tecnología para el análisis de mercurio y metil mercurio en el país.
- Alertar a la población y autoridades nacionales sobre los impactos que la minería artesanal tiene en la calidad de agua de los afluentes del municipio. En adición, realizar estudios para el análisis de concentraciones de mercurio en sedimentos, suelos, aire, fauna, microorganismos y tejidos humanos; con el fin de determinar el impacto del mismo en la salud de las personas y la fauna acuática de la zona.
- Ejecutar medidas para la mitigación y reducción de los impactos provocados por la minería artesanal, capacitando a los mineros artesanales en técnicas enfocadas en la reducción del uso de mercurio y minimización de riesgos en la salud. Así mismo, impulsar el comercio responsable y sostenible del oro y el desarrollo de actividades económicas alternativas en la zona.
- Elaborar un estudio socio económico para identificar el impacto de la actividad en la población de El Corpus y proyectar alternativas sostenibles a largo plazo.

## 6. LITERATURA CITADA

- Adler Miserendino, R., B.A. Bergquist, S.E. Adler, J.R. Davée, P.S.J. Lees, W. Niquen, P.C. Colon y M.M. Veiga. 2013. Challenges to measuring, monitoring, and addressing the cumulative impacts of artisanal and small-scale gold mining in Ecuador. *Resources Policy* 38(4):713-722.
- Al-Saleh, I., R. Al-Rouqí, C. Obsum, N. Shinwari, A. Mashour, G. Billedo y A. Rabbah. 2014. Mercury (Hg) and oxidative stress status in healthy mothers and its effect on birth anthropometric measures. *International Journal of Hygiene & Environmental Health* 217(4):567-585.
- Ata, A. 2010. A new global approach of cyanide management: International cyanide management code for the manufacture, transport, and use of cyanide in the production of gold. *Mineral Processing & Extractive Metallurgy Review* 31(3): 135-149.
- Banco Mundial. 2012. Rentas mineras (% del PIB) (en línea). Consultado el 25 de mayo de 2014. Disponible en:  
<http://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.MINR.RT.ZS>
- Baralkiewicz, D., H. Gramowska y R. Goldyn. 2005. Distribution of total mercury and methyl mercury in water, sediment and fish from Swarzedzkie Lake. *Chemistry and Ecology* 22(1):59-64.
- Bosch, J. y R.U. Meckenstock. 2012. Rates and potential mechanism of anaerobic nitrate-dependent microbial pyrite oxidation. *Biochemical Society Transactions* 40(6):1280-1283.
- Bose-O'Reilly, G. Drasch, C. Beinhoff, S. Rodriguez-Filho, G. Roider, B. Lettmeier, A. Maydi y U. Siebert. 2010. Health assessment of artisanal gold miners in Indonesia. *Science of the Total Environment* 408(4): 713-725.
- Botero, M., C. Doebel, K. Mazier, L. Sosa, N. García, O. Mencía y S. Damas 2007. Libro verde: Plan de ordenamiento territorial. Municipio El Corpus, Choluteca, Honduras. Honduras: Escuela Agrícola Panamericana El Zamorano. 152 p.
- CCME. 1999. Canadian environmental quality guidelines. Winnipeg: Canadian Council of Ministers of the Environment. Canadá.

- Departamento de auditoría de gestión ambiental de Honduras. 2007. Auditoría de gestión ambiental practicada a la dirección ejecutiva de fomento a la minería DEFOMIN (2004-2006) . Tegucigalpa: Tribunal Superior de Cuentas. 67 p.
- DOE. 1997. Interim national water quality standards for Malaysia. Department of Environment, Ministry of Science, Technology and the Environment, Malaysia.
- DOE. 1998. Malaysian Environment Quality Report. Department of Environment, Ministry of Science, Technology and the Environment, Malaysia.
- Dold. 2014. Evolution of acid mine drainage formation in sulphidic mine tailings. *Minerals* 4(3):621-641.
- ELLA. 2012. Small-scale and Informal Mining: A Big Problem for Latin American States. Extractive industries and conflict management, Economic development. Evidences and lessons from Latin America (ELLA). 9 p.
- EPA. 2002. List of drinking water contaminations and MCLs. United States Environmental Protection Agency.
- EPA. 1997. Volunteer stream monitoring: A methods manual. Washington, D.C. United States Environmental Protection Agency: Office of water.
- Feyte, S. A. Tessier, C. Gobeil y D. Cossa. 2010. In situ adsorption of mercury, methylmercury and other elements by iron oxyhydroxides and organic matter in lake sediments. *Applied Geochemistry* 25(7):984–995.
- Fiallos, C. 1989. Los municipios de Honduras. Tegucigalpa, Estados Unidos, Editorial Universitaria Tegucigalpa: Universidad Nacional Autónoma de Honduras.
- Frías-Espericueta, M., D. Voltolina, I. Osuna-López y G. Izaguirre-Fierro. 2009. Toxicity of metal mixtures to the Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* postlarvae. *Marine Environmental Research* 68:223-226.
- Frontier Geosciences. 2007. Protocol for sampling water for methyl mercury analysis.
- Gray, J., V.F. Labson, J.N. Weaver y D.P. Krabbenhoft. 2002. Mercury and methyl mercury contamination related to artisanal gold mining, Suriname. *Geophysical Research Letters* 29(23):20-1 - 20-4.
- Guedas Seixas, T., I. Moreira, S. Siciliano, O. Malm y H. Amaral Kehrig. 2014. Mercury and selenium in tropical marine plankton and their trophic successors. *Chemosphere* 111: 32-39.
- HACH® Company. 1999. DR/820, DR/850 and DR/890 portable data logging colorimeter instrument manual (1 ed.).

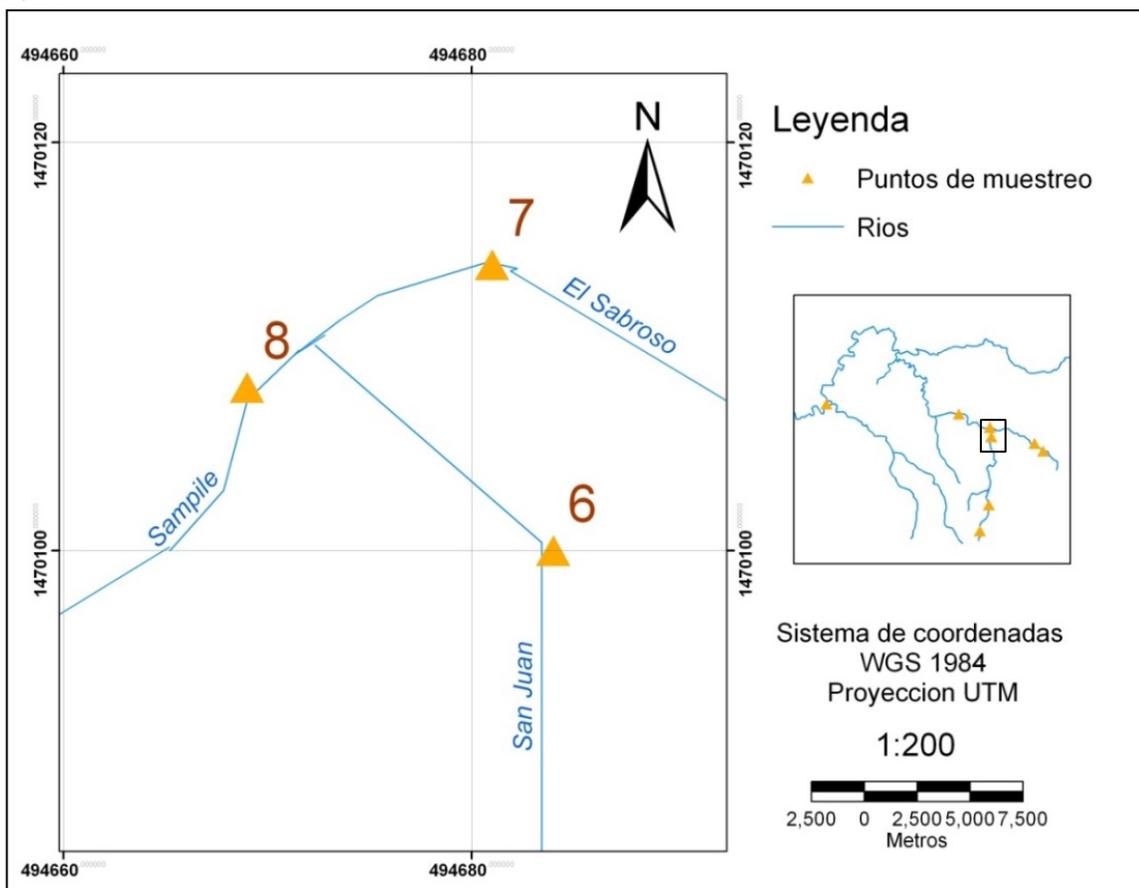
- Hewitt, D., P. Breuer y C. Jeffery. 2012. Cyanide detoxification of gold cyanidation tails and process streams. *Mineral Processing & Extractive Metallurgy* 121(4):228-236.
- Hilson, G., y C. Garforth. 2012. Agricultural poverty and the expansion of artisanal mining in Sub-Saharan Africa: Experiences from Southwest Mali and Southeast Ghana. *Population Research & Policy Review* 31(3):435-464.
- Hinton, J. J., M.M. Veiga y A.C. Veiga. 2003. Clean artisanal gold mining: a utopian approach? *Journal of Cleaner Production* 11(2):99-115.
- Horiba©. 2006. Water quality checker U-10: Instruction manual. Kyoto.
- Johnson, C., D. Grimes y R. Rye. 2000. Fate of process solution cyanide and nitrate at three Nevada gold mines inferred from stable carbon and nitrogen isotope measurements. *Mineral Processing & Extractive Metallurgy* 109(2):68-78.
- Kamlongera, P. 2011. Making the poor "poorer" or alleviating poverty? Artisanal mining livelihoods in rural Malawi. *Journal of International Development* 23(8):1128-1139.
- Kogovšek, J. 2011. Impact of chlorides, nitrates, sulphates and phosphates on increased limestone dissolution in the karst vadose zone (Postojna Cave, Slovenia). *Acta Carsológica*, 40(2):319-327.
- Langereis, G., W. Olthuis y P. Bergveld, 1999. Tap water hardness estimated by conductivity measurement to reduce detergent dosing. Netherlands: MESA Research Institute, University of Twente.
- Li, P., X. Feng y G. Qiu. 2011. Methyl mercury exposure through rice consumption and its health risk assessment for the residents in Guizhou mercury mining areas. *Chinese Journal of Ecology* 30(5):914-921.
- Lottermoser, B. G. 2010. Mine wastes: Characterization, treatment and environmental impacts (3 ed.). Berlin, Alemania, Springer.
- Lusilao-Makiese, J., E. Cukrowska, E. Tessier, D. Amouroux e I. Weiersbye. 2013. The impact of post gold mining on mercury pollution in the West Rand region, Gauteng, South Africa. *Journal of Geochemical Exploration* 134:111-119.
- Maurice-Bourgoin, L., Quiroga, I., Guyot, J. y Malm, O. 1999. Mercury pollution in the upper Beni River, Amazonian basin: Bolivia. *Ambio* 28:302-306.
- Melcalf, S. M. y Veiga, M. M. 2012. Using street theatre to increase awareness of and reduce mercury pollution in the artisanal gold mining sector: a case from Zimbabwe. *Journal of Cleaner Production* 27:179-184.
- Mol, J. H., y P.E. Ouboter. 2004. Downstream Effects of Erosion from Small-Scale Gold Mining on the In stream habitat and fish community of a small Neotropical rainforest stream. *Conservation Biology* 18(1):201-214.

- Nasirian, M. 2007. A new water quality index for environmental contamination contributed by mineral processing: A case study of Amang (tin tailing) processing activity. *Journal of Applied Sciences* 7(20):2977-2987.
- Newson, L. 1982. Labour in the colonial mining industry of Honduras. *the Americas* 39(2):185-203.
- Nogueira, F., E.E. Silva, y W. Junk. 1997. Mercury from gold mining in the Pantanal of Pocone (Mato Grosso, Brazil). *International Journal of Environmental Health Research* 7(3):181-192.
- OMS. 2010. Mercury in drinking water: Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality. Organización Mundial de la Salud.
- Orathinkal, J., A. Tetang y J. Kilip. 2011. Mercury concentration and its effect on the aquatic environment of the Lower Watut River, Morobe Province, Papua New Guinea. *Contemporary PNG Studies* 1438-1450.
- Padilla, A. 2002. Situación actual del Mercurio en Honduras. PNUMA. 11 p.
- Sandoval, E. y K. Guerrero. 2014. (4 de Julio de 2014). 3 rescued from Honduran mine; 8 still trapped. . CNN, Tegucigalpa, Honduras, Julio 4:14.
- Serfor-Armab, Y., B. Nyarko, D. Adotey, D. Adomako y E. Akaho. 2004. The impact of small-scale mining activities on the levels of mercury in the environment: The case of Prestea and its environs. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 262(3):685-690.
- Shade, C. W. y R.J. Hudson. 2005. Determination of MeHg in environmental sample matrices using Hg–Thiourea complex ion chromatography with On-line Cold Vapor Generation and Atomic Fluorescence Spectrometric Detection. *Environmental science and technology* 39(13):4974–4982.
- Souza, C., O. Malm. R. Reuther y C. Pfeiffer. 1990. Mercury pollution due to gold mining in the Madeira River basin, Brazil. *Ambio* 19(1):11.
- Spiegel, S. y M. Veiga 2010. International guidelines on mercury management in small-scale gold mining. *Journal of cleaner production* 18:375-385.
- SRAC. 1992. Interactions of pH, carbon dioxide, alkalinity and hardness in fish ponds. Kentucky: Souther Regional Aquaculture Center.
- Swain, E., P. Jakus, G. Rice, F. Lupi, P. Maxson, J. Maxosn y M. Veiga. 2007. Socioeconomic consequences of mercury use and pollution. *Ambio* 36(1): 45-61.
- Telmer, K. y M. Veiga 2009. World emissions of mercury from artisanal and small scale gold mining. In: N. Pironne y R. Mason (ed) *Mercury fate and transport in global atmosphere*. Springer Dordrecht, New York, Estados Unidos. Heildeberg. p 131-172.

- Telmer, K. y D. Stapper. 2007. Evaluating and monitoring small scale gold mining and mercury use: Building a knowledge-base with satellite imagery and field work. UNIDO. 48 p.
- Tomiyasu, T., Y. Kono, H. Kodamatani, N. Hidayati, y J. Setijo Rahajoe. 2013. The distribution of mercury around the small-scale gold mining area along the Cikaniki River, Bogor, Indonesia. *Environmental Research* 125:12-19.
- Tutu, H. 2012. Mining and water pollution. In K. Vouduris, y D. Voutsas (ed), *Water quality monitoring and assessment*. p 347-372.
- UNEP. 2011. *Environmental for development perspectives: Mercury use in ASGM*. Geneva: Chemicals Branch.
- UNEP. 2013. *Global Mercury Assessment 2013: Sources, Emissions, Releases and Environmental Transport*. Genova, Suiza: UNEP Chemicals Branch.
- USBS. 2001. Special measurement methods in open channels: Measurement by Floats . In: *Water measurement manual: A water resources technical publication* (3 ed.), p 13-4 - 13-5.
- USGS. 2014. USGS Water-Quality Information Pages (en línea). Disponible en U.S. Geological Survey: <http://water.usgs.gov/owq/index.html>
- Veiga, M. 1997. *Introducing New Technologies for Abatement of Global Mercury Pollution in Latin America*. Rio de Janeiro, UNIDO, UBC y CETEM.
- Vera, L.D., E. Raufflet y M. Pozzebon. 2012. Community-Building and green gold certification. *Greener Management International* 57:77-90.
- Vermilion, B. R. y R.J. Hudson. 2007. Thiourea catalysis of MeHg ligand exchange between natural dissolved organic matter and a thiol-functionalized resin: a novel method of matrix removal and MeHg preconcentration for ultratrace Hg speciation analysis in freshwater. *Analytical and bionalytical chemistry* 388:341-352.
- Vieira, R. 2006. Mercury-free gold mining technologies: possibilities for adoption in the Guianas. *Journal of Cleaner Production* 14(3-4):448–454.
- Višnjevec, A., D. Kocman y M. Horvat. 2014. Human mercury exposure and effects in Europe. *Environmental Toxicology & Chemistry* 33(1):1259-1270.
- Wade, L. 2013. Gold's dark side. *Science* 341(6153):1448-1449.
- Zerbock, O. 2005. *Land use and water quality in El Corpus, Choluteca, Honduras*. Tesis Mag. Sci., Michigan Technological University, Estados Unidos, School of Forest Resources and Environmental Science. 145 p.

## 7. ANEXOS

Anexo 1. Descripción detallada de los puntos de muestreo 6, 7 y 8 en la zona de confluencia de las quebradas San Juan y El Sabroso, El Corpus, Choluteca, Honduras, 2014.

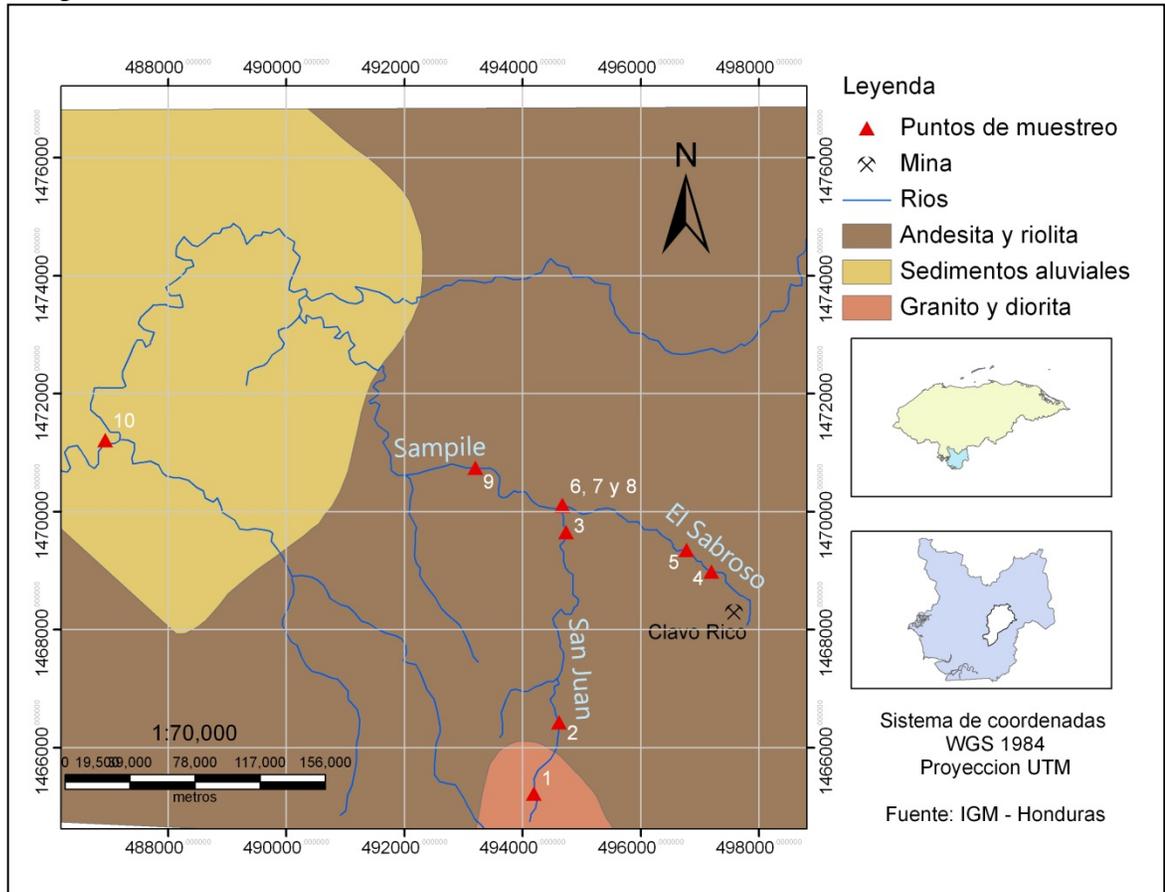


Anexo 2. Resultados de los análisis físico químicos medidos en las muestras recolectadas en los afluentes Sampire, El Sabroso y San Juan, El Corpus, Choluteca, Honduras, 2014.

Punto	Oxígeno disuelto (mg L <sup>-1</sup> )	Temp. (°C)	Cond. eléctrica (μS <sup>a</sup> cm <sup>-1</sup> )	pH	<sup>b</sup> Fosfatos (mg L <sup>-1</sup> )	Nitratos (mg L <sup>-1</sup> )	Dureza ( <sup>c</sup> mg L <sup>-1</sup> )	Mercurio (ng L <sup>-1</sup> )	Metil mercurio (ng L <sup>-1</sup> )	Sólidos suspendidos (mg L <sup>-1</sup> )	Turbidez (NTU <sup>d</sup> )
2SJ1	2.6	24.5	126	6.83	0.37	1.6	0.10	na	na	79	3
2SJ2	6.7	26.3	203	7.93	0.54	2.7	0.83	258.2	1.8	4797	6960
2SJ3	6.5	26.4	161	8.78	0.71	1.9	1.20	na	1.2	1895	10550
2SJ4	4.2	26.9	165	7.95	0.33	0.6	0.73	550.4	550.4	1385	1600
2ES1	4.3	25.3	125	8.03	0.29	1.3	0.10	na	na	63	7
2ES2	5.3	25.4	272	7.68	0.15	2.8	1.35	2.4	2.4	20	23
2ES3	4.0	26.1	103	7.63	0.12	13.4	0.68	35.8	na	19	23
2SA1	3.8	26.5	133	7.59	0.24	1.4	0.68	203.0	35.8	398	490
2SA2	6.5	28.2	131	7.7	0.36	2.2	0.68	380.8	na	522	130
2SA3	5.6	32.2	170	7.52	0.27	1.6	0.52	na	na	80	190
3SJ1	2.8	24.2	122	5.45	0.37	2.6	0.07	na	na	51	2
3SJ2	6.9	27.8	161	7.27	0.43	2.6	0.43	186.1	na	7730	3000
3SJ3	6.2	27.4	96	8.23	0.55	2.1	0.55	na	na	14010	1720
3SJ4	6.3	28.1	205	7.72	0.13	1.7	0.10	na	na	5527	4050
3ES1	3.5	25.5	156	7.82	0.25	2.0	0.44	nd <sup>f</sup>	na	37	12
3ES2	3.8	25.4	655	7.22	0.14	6.7	4.73	na	na	26	5
3ES3	4.8	27.4	301	7.66	0.54	2.4	1.04	11.1	na	5	2
3SA1	5.4	28.6	228	7.82	0.47	2.7	1.01	na	na	6955	240
3SA2	5.3	31.1	265	8.7	0.63	1.8	1.04	260.6	na	670	940
3SA3	4.7	32.4	244	8.17	0.31	8.3	1.01	na	na	10	24

<sup>a</sup>micro-Siemens por centímetro. <sup>b</sup>Expresados como ortofosfatos. <sup>c</sup>Expresados como carbonato de calcio. <sup>d</sup>Unidades nefelométricas de turbidez. <sup>e</sup>No analizado. <sup>f</sup>No detectado.

Anexo 3. Mapa litológico de la zona de estudio en El Corpus, Choluteca, Honduras, 2014. Elaborado en base al mapa de unidades geológicas de Honduras obtenido del Instituto Geográfico Militar (IGM).



Anexo 4. Puntajes de calidad utilizados para calcular el Índice de Calidad de Agua (ICA) adaptado para actividades mineras.

<b>Punto</b>	<b>Conductividad eléctrica (c)</b>	<b>pH (p)</b>	<b>Nitratos (n)</b>	<b>Oxígeno disuelto (d)</b>	<b>Fosfatos (f)</b>	<b>Metales pesados (m)</b>	<b>Sólidos suspendidos (s)</b>	<b>ICA</b>	<b>Calidad de agua</b>
2SJ2	85.51	91.98	80.85	0	68.27	0	0	41.3	Muy contaminada
2ES2	80.58	94.99	80.47	0	86.44	0	100	57.7	Muy contaminada
2SJ4	88.22	91.70	89.23	0	77.60	0	0	43.6	Ligeramente contaminada
2ES3	92.65	95.50	48.64	0	87.99	0	100	55.8	Muy contaminada
2SA1	90.50	95.89	85.95	0	81.92	0	0	44.6	Muy contaminada
2SA2	90.65	94.78	82.78	0	76.20	0	0	43.5	Muy contaminada
3SJ2	88.50	98.29	81.24	0	73.03	0	0	43.2	Ligeramente contaminada
3ES1	88.86	93.40	83.56	0	81.43	100	0	63.6	Ligeramente contaminada
3ES3	78.51	95.20	82.00	0	68.27	0	100	55.7	Muy contaminada
3SA2	81.08	77.96	84.35	0	64.57	0	0	38.7	Muy contaminada