

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL



**FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS QUÍMICAS Y AMBIENTALES**

PROYECTO DE TITULACIÓN

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

**“MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA PARA LA
GESTIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICO”**

TEMA:

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA ACTIVIDAD MINERA SOBRE
LA CALIDAD DEL AGUA, SEDIMENTOS Y LA COMUNIDAD DE
MACROINVERTEBRADOS EN RÍOS Y ARROYOS DE LAS
CUENCAS PAGUA Y SIETE**

AUTOR:

CHRISTIAN JOSÉ SANGA SUÁREZ

Guayaquil - Ecuador

2020

RESUMEN

Los efectos irreversibles que ha sufrido el medio ambiente, debido a la actividad antropogénica, han reducido en cantidad y calidad la disponibilidad de agua para los seres vivos. Las actividades de desarrollo industrial, agrícola, minero y urbano, han llevado en muchos casos a la generación de descargas de contaminantes que amenazan la salud de nuestros ecosistemas. Los impactos de la actividad minera en los ecosistemas acuáticos han sido ampliamente documentados, informando el deterioro de la calidad del agua, su impacto en la biodiversidad, así como la liberación de metales pesados de acumulación potencial en organismos y la posterior biomagnificación a través de la cadena alimentaria. Aunque se sabe que la actividad minera no técnica afecta el medio ambiente, es necesario identificar y priorizar aquellos factores relacionados con la actividad minera que tienen un mayor impacto en el ecosistema (por ejemplo, extracción, cianuración, amalgamación). La identificación de estos factores permitirá a las autoridades de control ambiental priorizar las acciones de gestión centradas en los parámetros con mayor impacto, mitigando así, el impacto de la actividad minera en los ecosistemas acuáticos.

La minería artesanal del oro en la zona de Ponce Enríquez es un problema que está afectando a los ecosistemas acuáticos y a los servicios ecosistémicos que estos brindan. Este estudio tiene como objetivo evaluar el impacto de la minería del oro sobre la calidad del agua, los sedimentos y los macroinvertebrados de los ríos Pagua y Siete. Se identificaron los factores ambientales asociados con las comunidades de macroinvertebrados y la calidad ecológica. Se evaluaron las características biológicas (macroinvertebrados), químicas, físicas e hidromorfológicas de 29 tramos de río Siete y Pagua. Se realizaron análisis regresión lineal multivariable (LRM) para relacionar variables ambientales y macroinvertebrados.

Varias familias de Coleoptera, Ephemeroptera y Trichoptera se encontraron en los ríos Pagua y Siete. Lo cual determinó, una “mala” calidad del agua en el río Siete durante la época seca y “muy mala” durante la época húmeda. La calidad del agua en el río Pagua para las dos épocas es “pobre”. Los principales factores identificados como responsables del deterioro de la calidad ecológica de los ríos estudiados fueron el aluminio, el arsénico, el cadmio, el cromo, el hierro, el magnesio, el níquel, el selenio, las modificaciones relacionadas a la actividad minera tales como el cambio de pendiente de la cuenca, así como las características del sustrato.

Los desechos que genera la cuenca alta del río Siete podrían generar mayores problemas a los acuicultores que desarrollan sus actividades en la zona costera. La medición de cianuro en muestras de agua y metales pesados en sedimentos de fondo y las especies acuáticas es necesaria para incluirlas en el análisis y la generación de medidas ambientales para la preservación o el mejoramiento de la condición ecológica de los cuerpos de agua.

ABSTRACT

The irreversible effects that the environment has suffered, due to anthropogenic activity, have reduced the availability of water for living beings in quantity and quality. The impacts of mining activity on aquatic ecosystems have been widely documented, reporting the deterioration of water quality, the impact of biodiversity, as well as the release of heavy metals from potential accumulation in organisms and the subsequent biomagnification through the food chain.

Artisanal gold mining in the Ponce Enríquez area is a problem that is affecting aquatic ecosystems and the ecosystem services they provide. To determine the environmental quality of the sites visited in the Pagua and Siete rivers, the application of the BMWP / Col index was used, which is based on the structure of the macroinvertebrate community present. Additionally, a set of environmental variables of the quality of water and sediments were used as indicators of the environmental pressure of the activities carried out in the basin, which is mainly dedicated to gold extraction.

Several families of Coleoptera, Ephemeroptera and Trichoptera were found in the Pagua and Siete rivers. Which determined, a "bad" quality of the water in the Siete river during the dry season and "very bad" during the wet season. The quality of the water in the Pagua River for both seasons is "poor".

The main stressors of the deterioration of the ecological quality of the rivers studied are aluminum, arsenic, cadmium, chromium, iron, magnesium, nickel, selenium, the average slope of the basin and the modification of the substrate characteristics, all related to mining.

DEDICATORIA

A mi familia por su constante apoyo, a mis profesores por transmitirme los conocimientos y a mis compañeros y amigos por acompañarme en mi periplo por alcanzar este nuevo logro.

AGRADECIMIENTO

Este proyecto de titulación fue posible desarrollar gracias al soporte financiero y logístico de la ESPOL y del Centro del Agua y Desarrollo Sustentable (CADS).

A mi director de tesis por la idea de este trabajo y las enseñanzas recibidas durante mi ciclo como maestrante y como tesista.

También me gustaría dar las gracias al Prof. Peter Goethals y su esposa, la Dr. Marie Eurie, por el apoyo durante mi etapa de entrenamiento en la Unidad de Investigación en Ecología Acuática del Departamento de Ciencias Animales y Ecología Acuática de la Facultad de Ingeniería de Biociencias de la Universidad de Gante en Bélgica donde disfruté y aprendí mucho sobre los árboles de decisión durante mi estancia auspiciada en el marco del programa WATERMAS ejecutado bajo el apoyo de la iniciativa ERASMUS+ de la Unión Europea.

DECLARACIÓN EXPRESA

La responsabilidad por los hechos y doctrinas expuestas en este Proyecto de Titulación, me corresponde exclusivamente y ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría. El patrimonio intelectual del mismo, corresponde exclusivamente a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.



Christian José Sanga Suárez

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



Fernando Morante Carballo, Ph.D.
PRESIDENTE



Luis Domínguez Granda, Ph.D.
DIRECTOR



David Matamoros Camposano, Ph.D.
VOCAL 1



Verónica Minaya Maldonado, Ph.D.
VOCAL 2

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1	1
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Descripción del problema.....	2
1.3 Hipótesis	3
1.4 Objetivos.....	3
1.5 Alcance	4
CAPÍTULO 2	5
2 MARCO TEÓRICO	5
2.1 Impacto de actividad minera sobre sistemas fluviales.....	5
2.2 Marco legal	6
2.2.1 Regulaciones de calidad para agua dulce, marina y estuarios en el Ecuador.	7
2.3 Bioindicación de la calidad del agua	7
CAPÍTULO 3	9
3 METODOLOGÍA.....	9
3.1 Área de estudio.....	9
3.2 Recopilación de datos.....	13
3.3 Calidad del agua	13
3.4 Metales en aguas y características del sedimento	14
3.5 Características hidráulicas de los cauces	14
3.6 Comunidad de macroinvertebrados	16
3.7 Análisis de datos.....	18
CAPÍTULO 4	19
4 RESULTADOS	19
4.1 Caracterización fisiográfica de las cuencas hidrográficas.	19
4.2 Metales totales en muestras de agua.....	20
4.3 Parámetros de calidad del agua.....	21
4.4 Sedimentos.....	23
4.5 Taxones de macroinvertebrados acuáticos.	23
4.6 Índice BMWP-Col.....	25
CAPÍTULO 5	29
5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	29
5.1 Discusión	29

5.2	Conclusiones y recomendaciones.....	30
6	Referencias	1
7	Apéndices y anexos.....	7

LISTADO DE FIGURAS

Figura 3-1.- Ubicación en el Ecuador de las cuencas en estudio	10
Figura 3-2.- Distribución temporal de precipitación de la estación M185.....	10
Figura 3-3.- Mapa de uso de suelo de las cuencas de los ríos Pagua y Siete.....	11
Figura 3-4.- Concesiones y desarrollos mineros y asentamientos poblacionales .	11
Figura 3-5.- Ubicación de sitios muestreados con (a) Ubicación de la cuenca de los ríos Siete y Pagua en Ecuador e hidrografía, mina de oro y planta de cianuro; (b) Elevación. La información sobre los mapas fue proporcionada por el Instituto Geográfico Militar (IGM), el Sistema Nacional de Información y Gestión de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica y el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) de Ecuador.....	15
Figura 4-1.- Cuencas hidrográficas principales del área de estudio	19
Figura 4-2.- Taxa de macroinvertebrados presentes en los sitios de muestreo en los ríos Siete y Pagua durante febrero y diciembre de 2015. F = Río Fermin, G = Guanache, LF = Arroyo La Florida, M = Río Margarita, P = Río Pagua, S = Río Siete, V = rio de villa. D = época seca, W = época húmeda.	24
Figura 4-3.- Variación estacional y espacial de la calidad del agua de los ríos Siete y Pagua. (a) Calidad actual del agua en la estación húmeda. (b) Calidad actual del agua en la estación seca.	26
Figura 7-1.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de Zn y el límite permitido – época húmeda.....	9
Figura 7-2.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de Zn y el límite permitido – época seca	9
Figura 7-3.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de Se y el límite permitido – época húmeda.....	10
Figura 7-4.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de Se y el límite permitido – época seca	10
Figura 7-5.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de Ni y el límite permitido – época húmeda.....	11
Figura 7-6.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de Ni y el límite permitido – época seca	11
Figura 7-7.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de Mn y el límite permitido – época húmeda.....	12
Figura 7-8.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de Mn y el límite permitido – época seca	12
Figura 7-9.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de Fe y el límite permitido – época húmeda.....	13
Figura 7-10.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de Fe y el límite permitido – época seca	13
Figura 7-11.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de Cu y el límite permitido – época húmeda	14
Figura 7-12.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de Cu y el límite permitido – época seca	14
Figura 7-13.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de Cr y el límite permitido – época húmeda	15

Figura 7-14.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de Cr y el límite permitido – época seca	15
Figura 7-15.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de Cd y el límite permitido – época húmeda	16
Figura 7-16.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de Cd y el límite permitido – época seca	16
Figura 7-17.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de Al y el límite permitido – época húmeda.....	17
Figura 7-18.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de Al y el límite permitido – época seca	17
Figura 7-19.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de Pb y el límite permitido – época húmeda	18
Figura 7-20.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de Pb y el límite permitido – época seca.....	18
Figura 7-21.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de As y el límite permitido – época húmeda.....	19
Figura 7-22.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de As y el límite permitido – época seca	19

LISTADO DE TABLAS

Tabla 3-1.- Puntajes de las familias de macroinvertebrados acuáticos para el índice BMWP/Colombia	17
Tabla 3-2.- Clases de Calidad de agua, valores BMWP/Col., significado y colores para representaciones cartográficas.	17
Tabla 4-1.- Concentraciones de metales totales en los sitios de muestreo durante la estación seca y húmeda.....	20
Tabla 4-2.- Estadísticas descriptivas de los parámetros físicos y químicos de los sitios muestreados en los ríos Siete y Pagua.....	22
Tabla 4-3.- Calidad del agua de las cuencas estudiadas por época de muestreo.	28
Tabla 7-1.- Taxa de macroinvertebrados, puntajes de tolerancia, número de presencias en las muestras y grupo de alimentación funcional (FFG) encontrado en las cuencas de los ríos Siete y Pagua.....	7
Tabla 7-2.- Resultados de la correlación entre parámetros físico-químicos. Los valores marcados corresponden a correlaciones significativas a $p < 0.05$ y $R > 0.7$	8
Tabla 7-3.- Resultados de la correlación entre familias de macro-invertebrados y metales pesados. Los valores marcados corresponden a correlaciones significativas a $p < 0.05$ y $R > 0.4$	8

CAPÍTULO 1

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El oro es un metal precioso e importante porque forma parte de la reserva monetaria, se encuentra distribuido en todo el mundo y se obtiene de la explotación de depósitos a través de la extracción directa de oro o subproducto (Gleich et al., 2006).

La actividad minera del oro en la economía y la sociedad representa una gran fuente de inversión que incrementa los ingresos de familias consideradas en pobreza extrema y que habitan en sitios inhóspitos (Santos & E, 2006).

La actividad minera ha ocurrido en el Ecuador desde el Imperio Inca. Desde entonces, el oro, la plata y el zinc han sido los metales más extraídos (Prada-Trigo, 2017).

Durante los últimos años, la extracción de oro en el Ecuador ha aumentado debido a la implementación de políticas públicas (Agencia de Regulación y Control Minero, 2015). En particular, en el área de Ponce Enríquez, la cual se encuentra ubicada al suroeste del Ecuador.

Lastimosamente, los procesos de extracción, físicos y químicos, podrían generar problemas de contaminación de suelo y agua con metales pesados, reducción de la cobertura vegetal de las cuencas e incremento de sedimentos, los cuales resultan perjudiciales para el ecosistema, si no se realiza un buen manejo de desechos (Olivero & Solano, 1998).

Actualmente, en el cantón Ponce Enríquez existen alrededor de 400 concesiones mineras de oro que están comprometiendo los ríos Jagua, Balao Grande, Gala, Tenguel y Siete, cuyas aguas fluyen hacia el golfo de Guayaquil (INAMHI, 2016) y proporcionan varios servicios ecosistémicos. Lastimosamente, los cuerpos de agua se han visto afectados por las actividades mineras de los últimos años (World Health Organization, 2011).

Estudios relacionados con la calidad del agua de los ríos en el Ecuador han confirmado la presencia de metales pesados y altas concentraciones de sólidos en suspensión en los ríos Siete y Tenguel (Lascano & Carlos, 2008). En aquellos estudios, la variación estacional no fue considerada.

La extracción de oro artesanal en el área de Ponce Enríquez, es un problema socio-técnico que estaría afectando los ecosistemas acuáticos y los servicios ecosistémicos que proporcionan el río Siete (Appleton et al., 2001). Es posible que los depósitos de relaves, provenientes del proceso de extracción de oro, estén cargados de grandes cantidades de metales pesados que finalmente están llegando a los ríos de la zona en forma de escorrentía (Rajaei et al., 2015).

1.2 Descripción del problema

Los estudios sobre los efectos de la extracción de oro en los ecosistemas acuáticos son limitados, sin embargo, las escasas investigaciones establecen fuertes relaciones entre la contaminación ambiental que presentan los sitios analizados con la actividad minera.

El problema de la minería del oro es el alto impacto ambiental que produce sobre el medio ambiente. Esta actividad puede llegar a generar y liberar grandes cantidades de desechos cargados de metales pesados al ecosistema. Aunque algunos metales pesados son esenciales para los procesos fisiológicos de la vida normal, concentraciones con niveles superiores a los requeridos tienen efectos nocivos sobre la salud humana y la biota (Fashola et al., 2016).

Otras degradaciones ambientales asociadas con la actividad minera son la deforestación y el aumento de la erosión y la bioacumulación de contaminantes (por ejemplo, metales y compuestos orgánicos) que provienen de relaves (Nussey & van Vuren, 2000). La bioacumulación de metales es la más dañina porque los metales pueden pasar a la cadena alimenticia, con los seres humanos como consumidores finales (N. Håkan Tarras-Wahlberg et al., 2000).

Dentro de este ámbito, un ejemplo de los efectos de los relaves mineros es la mina de oro abandonada en Columbia Británica, Canadá, la cual se erosionó gravemente, con el posterior transporte de As, Pb, Cu y Zn al lago adyacente. Algunos elementos estaban biodisponibles en los sedimentos, lo que afectó la actividad microbiana (Mudroch & Azcue, 1995).

Otro ejemplo, es el área de Witi Creek en el Parque Nacional Brownsberg (BNP) donde la extracción del oro aumentó la turbidez a niveles donde no puede haber vida animal (P. Ouboter et al., 2006).

La extracción del oro en el Ecuador también está causando considerables impactos ambientales. En la zona de Zaruma - Portovelo, provincia de El Oro, se viene desarrollando actividad minera desde la época precolombina, que ha contaminado principalmente al río Puyango con metales pesados relacionados principalmente con la descarga de relaves (N. H Tarras-Wahlberg et al., 2001))

Además de los estudios antes mencionados, es importante resaltar la contribución de algunos estudios que han evaluado la actividad antropogénica en las cuencas hidrográficas utilizando macroinvertebrados como indicadores de la degradación.

1.3 Hipótesis

La minería artesanal del oro en la zona de Ponce Enríquez es un problema técnico social que estaría afectando a los ecosistemas acuáticos y a los servicios ecosistémicos que estos brindan. Los desechos provenientes del proceso de extracción del oro y de los depósitos de relaves podrían estar reduciendo la capacidad de autodepuración de los ríos.

Mediante el presente estudio se tratará de estudiar la influencia que tiene la actividad minera del oro sobre la calidad del agua de los ríos Pagua y Siete a través del análisis de muestras de agua, sedimentos y de macroinvertebrados bénticos, haciendo uso del índice biótico BMWP Col desarrollado en Colombia.

1.4 Objetivos

Este estudio tiene como objetivo general evaluar el impacto de la minería del oro sobre la calidad del agua, los sedimentos y los macroinvertebrados de los ríos Pagua y Siete.

Para alcanzar el objetivo principal se plantearon los siguientes objetivos específicos:

1. Medir las variables abióticas y recolectar invertebrados bentónicos para estimar la calidad del agua
2. Evaluar la variación temporal y espacial de la calidad del agua como resultado de la minería en base a bioindicadores, y
3. Determinar los principales factores abióticos responsables de la degradación de estas cuencas y que afectan a las comunidades de invertebrados bentónicos.

1.5 Alcance

La minería aurífera artesanal y en pequeña escala, está creciendo, y los problemas en las comunidades dentro del área de influencia directa, son complejos y multifacéticos. Para ayudar a aumentar la comprensión de tales problemas, permitir la creación de consenso, transmitir de manera efectiva los hallazgos científicos a las partes interesadas, ayudar a informar las políticas y, en última instancia, mejorar la toma de decisiones, es necesario un enfoque de Evaluación Integrada, que esté conformado por grupos de trabajo disciplinarios relacionados a Ciencias Naturales, Salud humana, Ciencias Sociales y Economía. Donde se trate de conocer las causas, consecuencias y correctivos de la minería de oro a pequeña escala en Ecuador y en específico las alternativas disponibles en entornos de recursos limitados, que permiten que la extracción de oro, ocurra de una manera que mantenga la salud ecológica y la salud humana sin obstaculizar la prosperidad económica a corto y largo plazo.

La presente investigación se ha enfocado en documentar las afectaciones que han generado las descargas de desechos provenientes de la actividad minera al río Siete y sus afluentes. Para efectos comparativos se han seleccionado tres sitios de referencia en un tramo del río Pagua, cuya cuenca hidrográfica no tiene presencia de desarrollos mineros. Para determinar la calidad del agua de los ríos Siete y Pagua se empleó el índice BMWP/Col que utiliza a los macroinvertebrados como bioindicadores. Además se relacionaron la calidad del agua con las características biológicas (macroinvertebrados), químicas, físicas e hidromorfológicas de los sitios seleccionados.

Si bien, estudios relacionados han documentado la presencia de mercurio en el suelo, los sedimentos, el agua y los alimentos de las zonas donde se desarrolla la minería de oro artesanal y en pequeña escala, y los efectos sobre la salud de la vida silvestre y los sistemas ecológicos y el ser humano (N. H Tarras-Wahlberg et al., 2001). No se evaluó la incidencia del mercurio sobre la calidad del agua de los ríos analizados, debido al alto costo de implementación de técnicas estandarizadas de medición de mercurio en cuerpos de agua. La misma condición no permitió determinar la concentración de cianuro en los cuerpos de agua, así como las concentraciones de metales pesados en muestras de sedimentos.

CAPÍTULO 2

2 MARCO TEÓRICO

La experiencia de países desarrollados recomienda que los ríos deben evaluarse comparando su estado actual con un estado de referencia. Para este fin, se deben describir las comunidades de referencia que representan un muy buen estado ecológico. Además, para el desarrollo de un conjunto representativo de métricas para la evaluación ecológica de los ríos, se necesita conocer la relación entre las comunidades acuáticas y las actividades humanas que afectan a estos sistemas de agua. Los conocimientos en estas relaciones también serán valiosos para la detección de las causas de determinadas condiciones de los ríos (evaluación del impacto ambiental), así como para la toma de decisiones en la restauración de ríos y la gestión de la protección para cumplir y mantener un buen estado del ecosistema acuático.

2.1 Impacto de actividad minera sobre sistemas fluviales

Varios problemas ambientales se han relacionado con la minería del oro artesanal y en pequeña escala. Por ejemplo en Ghana, la contaminación con mercurio y otros metales pesados en suelo, sedimentos, y en cuerpos de agua; acidificación de las aguas e incremento de la turbidez; y reducción de la cobertura vegetal natural y la biodiversidad han sido categorizadas como las principales presiones que ejerce la actividad minera del oro sobre los ambientes acuáticos (Emmanuel et al., 2018).

En el área minera de oro de Apolobamba ubicada en la parte noroeste de La Paz, Bolivia, el manejo primitivo de los desechos que produce el proceso de extracción del oro mediante amalgamación, estaría conllevando a un deterioro significativo de los ecosistemas Sunchullí-Viscachani, Katantika, y Sural. Aquí se evidencia la presencia de mercurio con concentraciones que se encuentran por encima de estándares de referencia en suelo y sedimentos, y aunque en agua estuvieron por debajo de los niveles de referencia, las concentraciones fueron significativas (Acosta et al., 2011).

Otros factores importantes a tener en cuenta dentro del análisis, son las precipitaciones y el régimen de descargas de desechos. En un muestreo físico-químico de agua y sedimento realizado en el área minera de oro de Ponce Enríquez, Portovelo-Zaruma, y Nambija en Ecuador, durante un periodo de seis días en el año 1996, quedó evidenciado como las precipitaciones y la escorrentía influyen en la reducción de las concentraciones de la contaminación del ambiente fluvial (agua y sedimento) por mercurio (Hg) y elementos potencialmente tóxicos relacionados con el mineral, tales como arsénico (As), cadmio (Cd), cobre (Cu), plomo (Pb) y zinc (Zn). Los resultados también resaltaron la necesidad de garantizar que el sedimento y el agua contaminados no entren en los desarrollos agrícolas y acuícolas que se encuentran aguas abajo del distrito minero de Ponce Enríquez (Appleton et al., 2001).

Las estrategias de evaluación ambiental en Ghana, Apolobamba en Bolivia, Ponce Enríquez, Portovelo-Zaruma, y Nambija en Ecuador para medir los impactos de la actividad minera sobre los sistemas fluviales consideraron muestreo físico-químico de agua y sedimento.

2.2 Marco legal

El desarrollo de la actividad minera metálica y no metálica en el Ecuador está sujeta a las disposiciones de la Ley Minera del 2009, a la normativa ambiental vigente y a las normativas legales y reglamentos de la autoridad única del agua.

La Ley Minera, establece la obligatoriedad de realizar estudios de impacto ambiental y planes de manejo antes del inicio de cualquier actividad minera; la causal de caducidad del título minero por "grave daño ambiental"; y la restricción de las actividades mineras en áreas naturales protegidas, a menos que aquellas fueran declaradas de interés nacional.

La ley de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del agua tiene como objetivo, garantizar el derecho humano al agua, así como regular y controlar la autorización, gestión, preservación, conservación, restauración, de los recursos hídricos, uso y aprovechamiento del agua, la gestión integral y su recuperación, en sus distintas fases, formas y estados físicos, a fin de garantizar el buen vivir y los derechos de la naturaleza establecidos en la Constitución.

Dentro del ámbito de la actividad minera, la Autoridad Única del Agua, otorgará la autorización de aprovechamiento productivo de las aguas que se utilicen en el proceso, que será otorgada de conformidad con los procedimientos y requisitos establecidos en la ley y su reglamento, para lo que

se respetará estrictamente el orden de prelación que establece la Constitución, es decir, consumo humano, riego que garantice la soberanía alimentaria, caudal ecológico y actividades productivas. Al efecto, coordinará con la Autoridad Ambiental Nacional.

De esta manera, se regulará toda actividad que pueda afectar la calidad y cantidad de agua, y el equilibrio de los ecosistemas, en especial en las fuentes y zonas de recarga de agua. La sustentabilidad de los ecosistemas y el consumo humano serán prioritarios en el uso y aprovechamiento del agua.

2.2.1 Regulaciones de calidad para agua dulce, marina y estuarios en el Ecuador.

La ley ambiental ecuatoriana tiene regulaciones sobre la calidad del agua en las masas de agua, para la preservación de la flora y la fauna y el mantenimiento de la vida natural de los ecosistemas asociados. Los criterios de calidad admisibles establecen valores máximos de concentraciones permisibles de parámetros químico-físicos presentes en el agua.

La norma también establece un valor límite para diferentes parámetros en relación con el tipo de cuerpo de agua, agua fría o caliente de agua dulce, marina y de estuario. El presente estudio ha considerado los valores límite referidos a las aguas cálidas y frías, tabla 2 y tabla 3, (MAE, 2008)

2.3 Bioindicación de la calidad del agua

La evaluación de la calidad del agua en los últimos años ha considerado a los macroinvertebrados como indicadores biológicos, gracias a los límites de tolerancia específicos que tienen estos organismos a las diferentes alteraciones de su hábitat. Esta técnica se viene implementando en la Unión Europea desde 1984, ya que ha permitido conocer el estado ecológico de los ríos y lagos durante un período de tiempo más o menos largo y no solo del momento de toma de muestra. En las últimas décadas, esta metodología ha sido aplicada en América Latina. En varios países como en Colombia se han realizado muchos estudios de campo para conocer la taxonomía y ecología de los macroinvertebrados acuáticos, con la finalidad de proponer un método adaptado a nuestra región, para realizar la evaluación de los ecosistemas.

Los métodos de evaluación de la calidad de los ecosistemas acuáticos basados en organismo, se sustentan en la teoría del ecosistema acuático como un sistema con múltiples funciones, en el que hay intercambio de materia y energía entre los organismos vivos como los macroinvertebrados y el ambiente abiótico. Es un hecho, cuando los factores abióticos que caracterizan el espacio físico en donde habitan las comunidades de

macroinvertebrados, también la composición de las comunidades se modifica, reflejándose estos cambios, en la calidad de los ecosistemas acuáticos (Roldán-Pérez, 2016).

Las comunidades de macroinvertebrados acuáticos se desarrollan en un lugar específico, el cual es conocido como hábitat. El ecosistema acuático interactúa con el medio que lo rodea, los organismos vivos, el agua, la tierra y la atmósfera, se ven alterados a causa de la acción del hombre. Entre las actividades humanas que causan mayor daño, se encuentran: la deforestación, los residuos domésticos, industriales, agrícolas y mineros. Siendo la temperatura del agua, la dinámica de los nutrientes y los sedimentos y la morfología del cauce los principales parámetros afectados. Otro efecto importante de la acción antrópica es la bioacumulación de sustancias tóxicas en los tejidos de los organismos presentes en el agua, que si bien no les causan la muerte, pueden distribuirse a lo largo de la cadena alimenticia y provocar finalmente problemas en la salud del hombre. El índice biótico combina una medida cuantitativa de diversidad de especies con la información cualitativa sobre la sensibilidad ecológica de cada familia.

Un análisis realizado a la cuenca del río Guayas evaluó 120 sitios para determinar la calidad ecológica del agua, empleando índices de macroinvertebrados (Ambarita et al., 2016). En Flanders se evaluaron 1,189 sitios para conocer las concentraciones máximas permitidas para que el estado de los ecosistemas sea de buena calidad (Van Ael et al., 2015). En la cuenca del río Iskar en Bulgaria, se evaluaron 15 sitios, para conocer la capacidad de auto-purificación y dilución del cuerpo de agua en presencia de efluentes de una planta de tratamiento de aguas residuales (Lock et al., 2011). Se tomaron muestras de 88 sitios para demostrar que la acumulación de metales en especies resistentes como los quironómidos y los gusanos tubífidos tienen el potencial de ser utilizados como predictores de efectos ecológicos en los ecosistemas acuáticos (Bervoets et al., 2016). La escasez de estudios y el uso de índices para evaluar la respuesta de los macroinvertebrados a la minería de oro hacen necesario realizar estudios para probar estos índices.

CAPÍTULO 3

3 METODOLOGÍA

En este apartado se detalla la metodología utilizada en la investigación, inicialmente se describe la zona de estudio y los sitios muestreados. Luego se citan los parámetros físicos – químicos – biológicos obtenidos en campo y laboratorio, como resultado de las campañas de recolección de muestras de agua, sedimento y organismos en diciembre del 2015 y en febrero del 2016. Finalmente se provee información de las técnicas de análisis de datos empleadas.

3.1 Área de estudio

El área de estudio se desarrolla en las cercanías del cantón Camilo Ponce Enríquez, en las pequeñas elevaciones existentes entre los ríos Pagua y Siete. Dentro de la zona se desarrolla el Distrito Minero Bella Rica y Guanache, el cual ocupa un área de 1,5 km² donde se encuentran yacimientos de pirita, calcopirita, y arsenopirita y lecho rocoso de rocas volcánicas tales como andesítica y basáltica (Prodeminca, 1998).

Los ríos principales de la zona son el Pagua y el Siete. Las cuencas de los ríos están ubicadas al suroeste de Ecuador, dentro de las provincias de Guayas, El Oro y Azuay, Figura 3-1. La extensión superficial de las cuencas es de 176 y 376 km², respectivamente. La altitud dentro de las cuencas varía entre 8 y 530 m.s.n.m. Los principales afluentes del río Siete son las quebradas Guanache, Tres de Mayo, La Florida, y El Paraíso, los cuales se secan durante la estación seca.

El régimen de lluvia dentro del área de estudio es variable y está regido por el registro climatológico de la estación agrometeorológica Machala UTM Pagua-M185, donde se observa una mayor precipitación entre enero y abril, que se considera como la estación húmeda, mientras que los meses restantes se consideran como la estación seca, ver Figura 3-2.

Figura 3-1.- Ubicación en el Ecuador de las cuencas en estudio

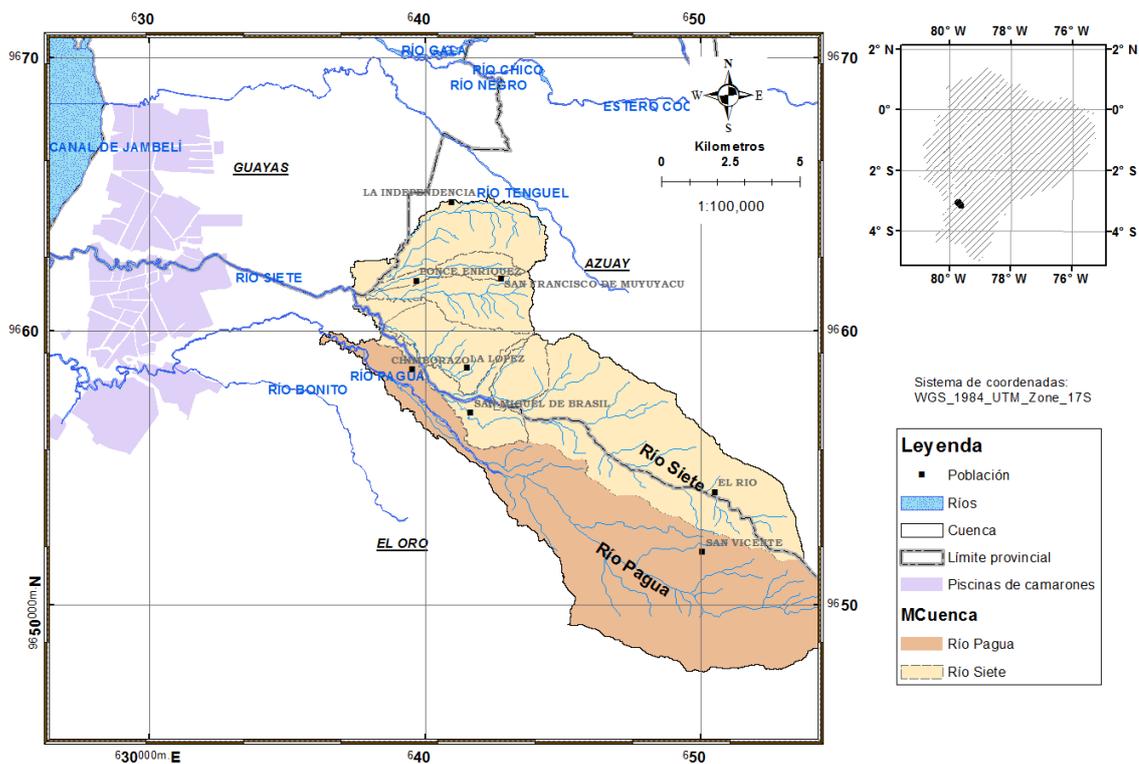
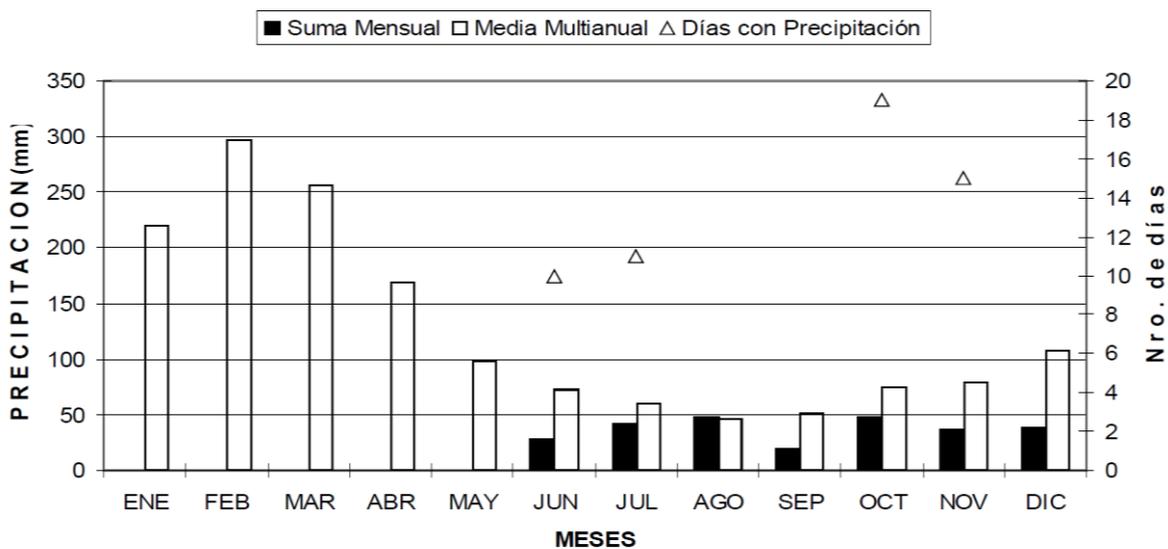
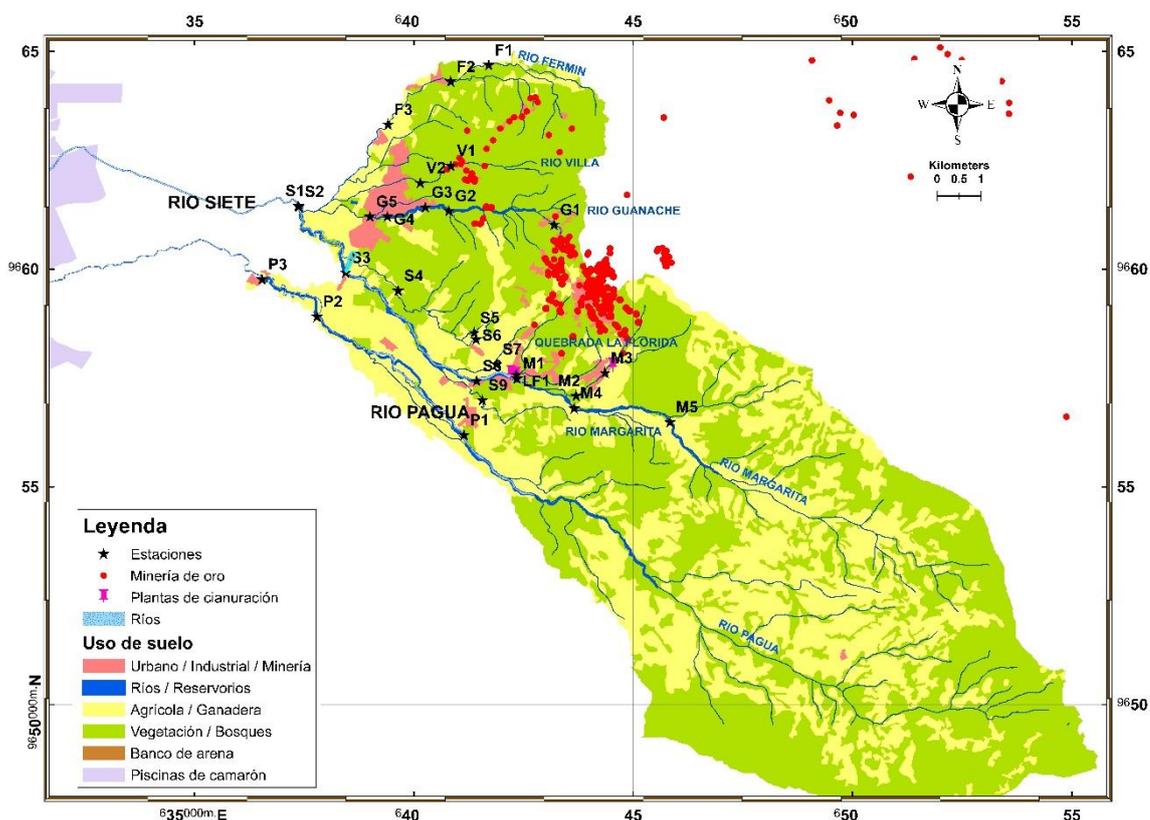


Figura 3-2.- Distribución temporal de precipitación de la estación M185



La cuenca del rio Pagua presenta usos de suelo agrícola, ganadero y bosques. Mientras que la cuenca del rio Siete presenta usos de suelo agrícola, ganadero, bosques, asentamientos humanos, industrias y minería. Además, la cuenca del río Siete, presenta áreas con concesiones mineras y sitios de extracción de oro.

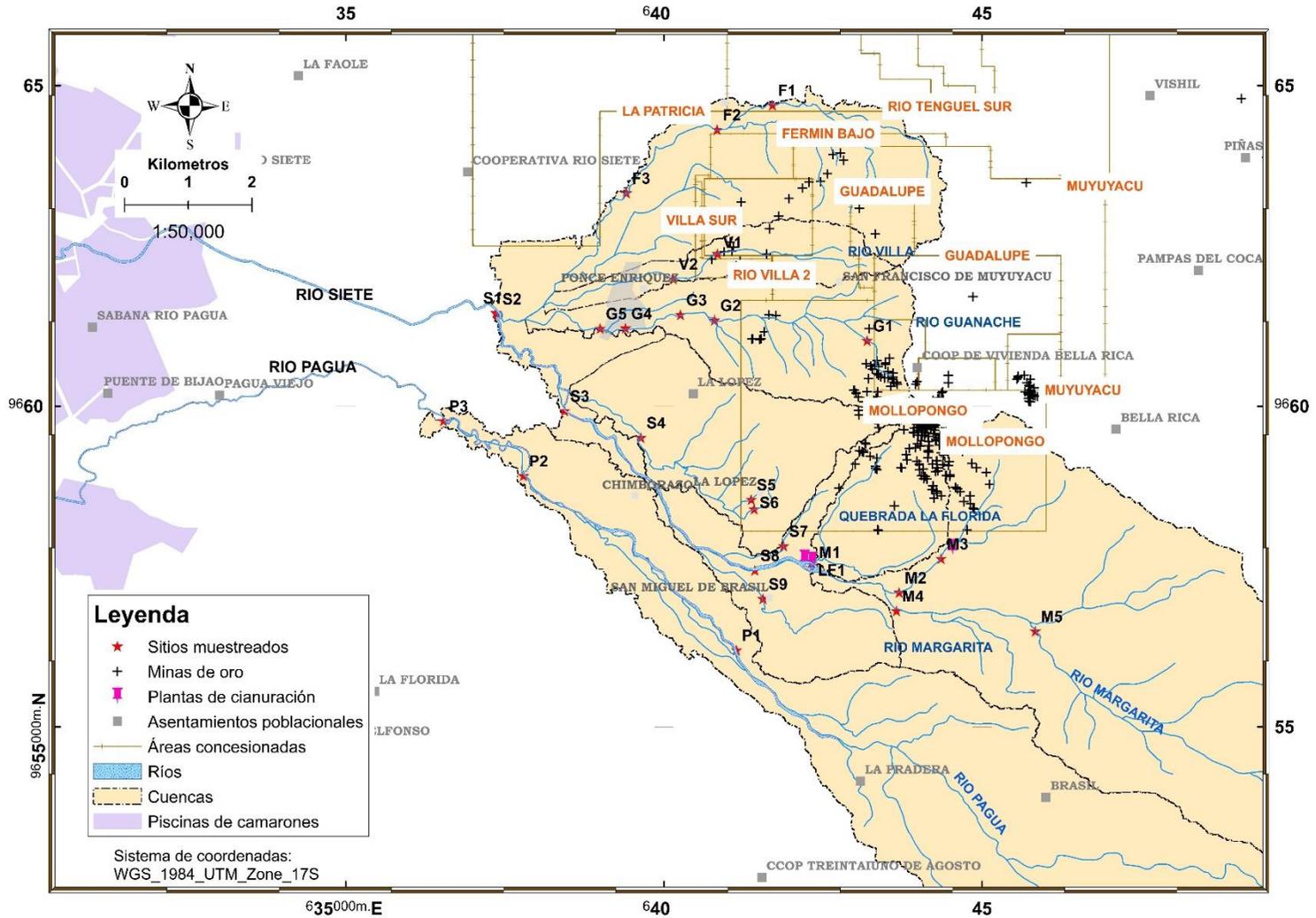
Figura 3-3.- Mapa de uso de suelo de las cuencas de los ríos Pagua y Siete



El límite cantonal circunscribe una extensión superficial aproximada de 640 km², de las cuales, aproximadamente el 40% son áreas concesionadas a desarrollo minero, donde existen al menos 118 puntos de extracción. El área presenta una tasa de deforestación anual del 5%, lo cual ha producido que por lo menos el 50% de la población se encuentre emplazada en zonas con riesgo de movimiento de masa. Entre los principales asentamientos poblacionales se encuentran: Bella Rica, Villa Rica, La Rica, San Vicente de Cachi, Moras, Guena, San Juan de Naranjillas, San Gerardo, La fortuna; así como también comunidades de la parroquia de Carne de Pijilí como lo es Pijilí Chico, Campanas, Mangán, Lagunas, Naranjo, Limón y Trinchera Campesina (Figura 3-4).

La explotación de minas y canteras es una de las principales actividades que desarrolla la población, con alrededor del 40% de la población censal al 2010. La minería del oro es la más desarrollada por ser una fuente de mayores ingresos para los mineros. (Sistema Nacional de Información, 2010).

Figura 3-4.- Concesiones y desarrollos mineros y asentamientos poblacionales



3.2 Recopilación de datos

Las campañas de muestreo de los 29 sitios se realizaron durante los meses de diciembre del 2015 (estación seca) y en febrero del 2016 (estación húmeda), considerando el régimen de lluvias que se presentan en el sector. Se tomaron muestras dos veces y se recolectaron variables ambientales físicas, químicas, hidromorfológicas y biológicas (macroinvertebrados) de cada sitio.

Los sitios de estudio fueron seleccionados bajo los principios científicos, ecológicos y pragmáticos (Cooman & Kerre, 1996) y se ubicaron con la ayuda de cartas topográficas y un sistema de posicionamiento global portátil. El proceso de selección de los 29 sitios de muestreo consideró la ubicación de los desarrollos mineros y los puntos de extracción, las áreas de disposición final de los relaves, los asentamientos poblacionales, las estaciones de medición de flujo líquidos y sólidos del INAMHI y las variaciones fisiográficas como la altitud (Chapman, 1996).

Los sitios de estudio se distribuyen de la siguiente manera: Los sitios de referencia o también llamados "blancos", se caracterizan por tener cuencas hidrográficas donde se especula, no hay actividad antropogénica significativa y se identifican como P1, P2 y P3 y se ubican en el río Pagua, y el sitio M5 se ubica en la cuenca media del río Margarita. Los sitios cuyas cuencas tienen asentamientos de población dispersa son del F1-F3 y están ubicados en el río Fermín, y los S1-S8 están ubicados en el río Siete. Los sitios V1 y V2 y G1-G5 están ubicados en el río Villa y el arroyo Guanache, respectivamente. La cuenca hidrográfica de este río que intercepta la ciudad de Ponce Enríquez presenta una actividad minera media. Los sitios M1-M4 y LF1 están ubicados en el río Margarita y el arroyo La Florida respectivamente, ambos afluentes del río Siete, donde hay una alta actividad minera, Figura 3-5.

3.3 Calidad del agua

Los parámetros medidos en el sitio mediante la sonda multiparamétrica YSI 6920-V2 fueron el oxígeno disuelto, pH, conductividad, temperatura, sólidos disueltos totales (TDS), turbidez, clorofila y cloruro. Se tomaron las lecturas una vez que el equipo llegó a estabilizarse.

Las muestras de agua en botellas oscuras de 500 ml se recolectaron en cada sitio y luego se almacenaron en hieleras portátiles y se transportaron al laboratorio donde se midieron las concentraciones de nitrógeno total (N total), fósforo total (P total), nitrato-NO₃, nitrito NO₂⁻, amonio-N y demanda

química de oxígeno (DQO) utilizando los kits del espectrofotómetro Hach-Lange DR 3900 y el total de sólidos en suspensión mediante secado a 103-105°C.

3.4 Metales en aguas y características del sedimento

La caracterización se complementó con la identificación de metales pesados (Al, As, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, Se y Zn) en muestras de agua por espectrometría. Las pruebas se desarrollaron en el Laboratorio de Geología de la Universidad de Colorado, mediante la técnica ICP-MS (Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente), que permite determinar las concentraciones (en unidades de ppb) de metales pesados en agua. También se realizó la caracterización de los sedimentos en base al tamaño de grano promedio y el contenido orgánico, determinados a partir de muestras obtenidas in situ por medio de una draga Van Veen y almacenadas en bolsas Ziploc. Las muestras de sedimento fueron analizadas en el laboratorio. La escala utilizada para la definición de los diferentes rangos de diámetros de partículas fue la escala de Wentworth, donde:

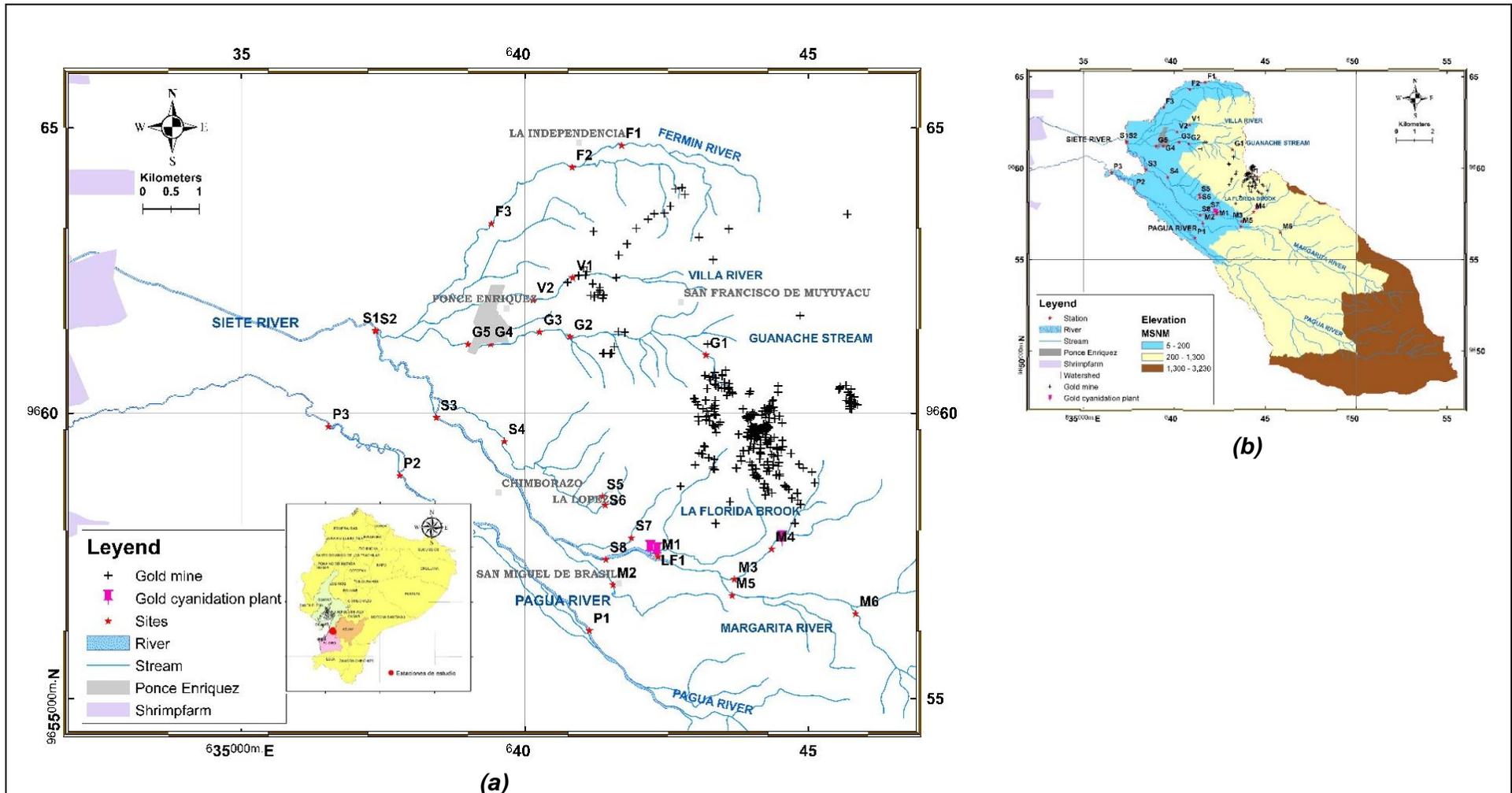
Diámetro de partícula	Tipología
0 - 4 μ m	Arcilla
4 - 63 μ m	Cieno
63 - 125 μ m	Arena muy Fina
125 - 250 μ m	Arena fina
250 - 500 μ m	Arena media
500 - 1000 μ m	Arena gruesa
>1000 μ m	Grava

3.5 Características hidráulicas de los cauces

Las características hidráulicas medidas fueron: la velocidad media del canal, altura de la lámina de agua, el ancho del canal y la descripción de la vegetación presente. La velocidad promedio del canal se obtuvo mediante la aplicación del método USGS de dovelas y el uso de un medidor de velocidades portátil marca HACH.

Las características geomorfológicas de los canales y las características fisiográficas de las cuencas hidrográficas se obtuvieron a partir de imágenes satelitales, cartografías y estudios topográficos disponibles en el Geportal del Sistema Nacional de Información, Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca, e Instituto Geográfico Militar.

Figura 3-5.- Ubicación de sitios muestreados con (a) Ubicación de la cuenca de los ríos Siete y Pagua en Ecuador e hidrografía, mina de oro y planta de cianuro; (b) Elevación. La información sobre los mapas fue proporcionada por el Instituto Geográfico Militar (IGM), el Sistema Nacional de Información y Gestión de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica y el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) de Ecuador.



3.6 Comunidad de macroinvertebrados

La evaluación de la calidad del agua en la Unión Europea considera a los macroinvertebrados como indicadores biológicos, debido a los límites perceptibles de tolerancia que estos organismos tienen tanto a los cambios físicos y químicos como a las alteraciones hidromorfológicas de su hábitat (Dominguez-Granda et al., 2011), (De Pauw et al., 2006), (Griffiths, 2002), (Armitage et al., 1983). En las últimas décadas, esta metodología se ha aplicado en América Latina porque es menos costosa que los métodos fisicoquímicos y predice el comportamiento de los parámetros químicos cuando sus efectos acumulativos han sido recurrentes en la biota durante un período previo al muestreo biológico (Restrepo-Manrique et al., 2018).

Con la finalidad de conocer la composición de la comunidad presente en el ecosistema acuático y medir el impacto de la actividad antropogénica se tomaron muestras de macroinvertebrados acuáticos en 28 lugares diferentes, 25 se distribuyeron en el río Siete y sus afluentes y 3 se distribuyeron en el río Pagua. Su recolección trató de cubrir todos los hábitats posibles, y se realizó antes del registro de variables hidráulicas para muestrear áreas no perturbadas. Mediante una red de mano tipo D se realizó muestreo de múltiples hábitats. Las muestras de bentos se conservaron en una solución de alcohol al 75% hasta su posterior procesamiento e identificación taxonómica en el laboratorio. Las muestras se enjuagaron sobre un tamiz (tamaño de malla 0,5 mm), luego se colocaron en bandejas blancas, bien iluminadas y con la ayuda de pinzas se extrajeron los organismos presentes, teniendo cuidado de no maltratarlos. Para el proceso de identificación, se utilizaron las claves taxonómicas y un microscopio estereoscópico (Ziglio et al., 2008)(Domínguez & Fernández, 2009).

Habiéndose identificado la familia de macroinvertebrados presentes en los sitios de estudio, se hizo necesario medir el grado de impacto de la actividad antropogénica mediante el BMWP-Colombia. El método BMWP para Colombia es una adaptación del método Biological Monitoring Working Party (BMWP) establecido en Inglaterra en 1970 (Pérez, 2003), que considera los grupos taxonómicos que habitan sus ecosistemas, BMWP-Col (Roldán-Pérez, 2016). Esta metodología se caracteriza por ser sencilla y rápida de aplicar cuando se trata de evaluar la calidad del agua. En la Tabla 3-1 se muestran los puntajes de las familias que habitan en la zona de Ponce Enríquez. La suma de productos de puntaje por el número de especies en cada familia da como resultado el índice BMWP/Col.

Tabla 3-1.- Puntajes de las familias de macroinvertebrados acuáticos para el índice BMWP/Colombia

Familias	Puntaje
Chironomidae, Culicidae, y Psychodidae	2
Hydrophilidae, y Tipulidae	3
Ceratopogonidae, Libellulidae, Tabanidae, y Simuliidae	5
Aeshnidae, Corydalidae, Lymnaeidae, y Staphylinidae	6
Baetidae, Elmidae, Hyallelidae, Coenagrionidae, Hydrobiidae, Hydropsychidae, Leptohyphidae	7
Leptoceridae, Naucoridae, y Sphaeriidae	8
Gomphidae, Hydrobioscidae, Hydraenidae, y Leptophlebiidae	9
Chordodidae, Odontoceridae, Psephenidae, y Ptilodactylidae	10

Tabla 3-2.- Clases de Calidad de agua, valores BMWP/Col., significado y colores para representaciones cartográficas.

Clase	Calidad	BMWP/Col.	Significado	Color
I	Buena	>123	Aguas muy limpias-no contaminadas	Azul
II	Moderada	71-122	Aguas ligeramente contaminadas: se evidencian efectos de contaminación	Verde
III	Pobre	46-70	Aguas moderadamente contaminadas	Amarillo
IV	Mala	21-45	Aguas muy contaminadas	Naranja
V	Muy mala	<20	Aguas fuertemente contaminadas, situación crítica	Rojo

La clasificación de la calidad del agua en los ríos Siete y Pagua se basó en el índice “Grupo de Trabajo de Monitoreo Biológico” adaptado a Colombia (BMWP-Col) (Álvarez, 2005) que tiene en cuenta la puntuación de sensibilidad a la contaminación orgánica de los taxones encontrada. La Tabla 3-1 muestra los puntajes de las familias que fueron encontradas en el presente estudio para el área de Ponce Enríquez. La suma de las puntuaciones sensibles de cada familia da como resultado el índice BMWP / Col. Los puntajes sensibles van de 1 a 10, siendo 1 para taxones muy tolerantes y 10 para familias más sensibles. Los puntajes de BMWP-COL se pueden dividir en cinco categorías de calidad de agua que consisten en: muy mala (<20), mala (21-45), dudosa (46-70), aceptable (71-122) y buena (> 123). La Tabla 3-2 presentan las clases de calidad, el significado de los valores del BMWP y los colores utilizados en los mapas cartográficos (Álvarez, 2005).

3.7 Análisis de datos

El análisis de datos consistió en la construcción de una matriz conformada por tantas columnas como parámetros medidos y tantas filas como muestras recolectadas y analizadas.

Los parámetros analizados se agrupan de la siguiente manera: 5 parámetros de medición en campo realizados con equipo multiparamétrico, 3 parámetros físicos, 5 iones principales, 13 metales totales, 1 parámetro orgánico, 32 taxones de macroinvertebrados, granulometría de los sedimentos, características de las cuencas aportantes y del transecto de los ríos analizados.

El estudio de datos incluyó un análisis exploratorio de la variabilidad de las características morfológicas físico-químicas de los sitios de referencia e impactado mediante diagramas de caja, análisis de significación estadística entre los conjuntos de datos tomados en la estación seca (diciembre de 2015) y la estación húmeda (febrero de 2016), análisis de similitud de muestras por medio de la prueba T de Student y correlaciones de Pearson para medir correlaciones entre las características físicas, químicas y biológicas.

Los análisis de datos estadísticos se desarrollaron utilizando un programa estadístico de computadora llamado Estadística 4.0 (Dell & Statsoft, 1993)

CAPÍTULO 4

4 RESULTADOS

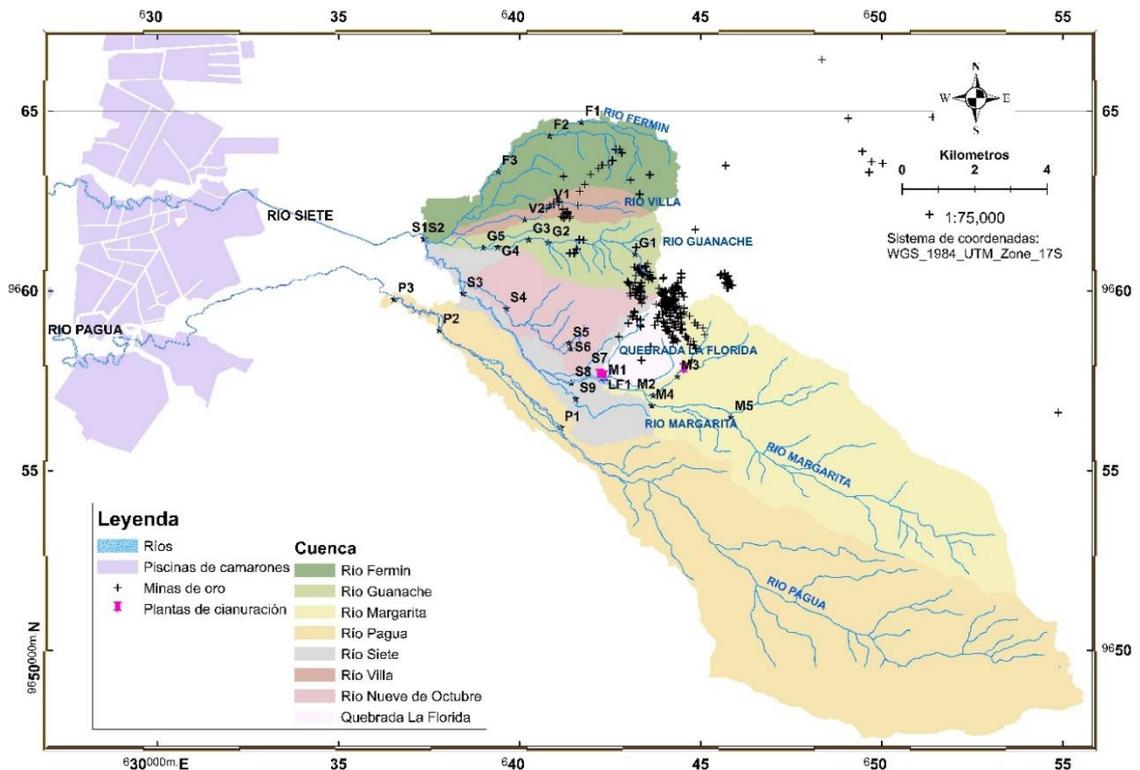
La presente sección muestra los resultados obtenidos en el trabajo de campo, laboratorio y oficina realizados durante la elaboración de esta investigación.

4.1 Caracterización fisiográfica de las cuencas hidrográficas.

Los límites de las cuencas se demarcaron para los 28 sitios muestreados, con respecto a la división topográfica del agua realizada a través del análisis de las características de la hidromorfología del terreno y el modelo de elevación digital (DEM). En consecuencia, las cuencas de los ríos Siete y Pagua se demarcaron en 25 subcuencas y 3 subcuencas, respectivamente.

Las subcuencas delimitadas se caracterizan por ser de tipo alargada, presentan superficies de terreno que varían entre 0,44 y 78,5 ha. La pendiente media de las subcuencas es del 37,52%. La longitud máxima de las cuencas varía entre 1,8 y 27 km. Las pendientes en estos cursos de agua varían entre 0,05 y 0,3 m / m. El índice promedio de Gravelius es 2,1 y varía entre 1,57 y 2,83, valores correspondientes a las subcuencas definidas hasta LF1 y S7.

Figura 4-1.- Cuencas hidrográficas principales del área de estudio



4.2 Metales totales en muestras de agua.

Las concentraciones de metales totales no mostraron diferencias significativas entre la estación seca y la estación húmeda (valor $p > 0,24$). Varios metales se correlacionaron con otros metales $R^2 > 0,93$ y $p < 0,05$ (por ejemplo, aluminio y cromo, aluminio y hierro, cromo y hierro y níquel y cadmio). Las familias de macroinvertebrados que tienen una puntuación de tolerancia superior a 7 mostraron una ligera correlación inversa con los metales (R entre 0,5 y 0,7). Estas correlaciones fueron Baetidae & Calcio, Leptohiphidae & Calcio, Leptohiphidae & Magnesio, y Leptophlebiidae & Aluminio. Mientras que Psychodixidae presentó una correlación directa con el aluminio, arsénico, calcio, cadmio, hierro, manganeso, níquel, plomo y zinc ($R > 0,4$). Se muestra un resumen de estas correlaciones en la Tabla 4 y una Tabla 5 en el Apéndice A.

Los metales pesados disueltos presentaron concentraciones de aluminio, arsénico, cadmio, cobre, hierro, manganeso, níquel y zinc que excedían la norma de calidad para agua dulce (MAE, 2008). Se observaron altas concentraciones de metales en el arroyo Florida (LF1), el río Guanache (G1 y G2), el río Siete (S8) y el río Margarita (M3), especialmente en la estación seca.

Parámetros	Época seca – Diciembre/2015					Época húmeda – Febrero/2016					Límite permisible ¹
	Media	Mediana	Min.	Max.	Dev. Std.	Media	Mediana	Min.	Max.	Dev. Std.	
Al (ug/l)	1456,50	974,50	32,22	8088,25	1746,57	1457,45	225,64	41,23	11583,43	2637,26	< 100
As (ug/l)	176,50	33,25	0,80	795,65	264,64	141,70	32,64	0,31	797,12	224,27	< 50
Ca (mg/l)	34,80	34,41	4,31	118,53	24,70	36,98	33,81	4,02	127,84	28,51	-
Cd (ug/l)	0,41	0,21	0,02	2,98	0,61	0,44	0,24	0,01	1,73	0,53	< 1
Cr (ug/l)	4,00	2,44	0,27	19,48	4,54	4,58	1,89	0,27	26,93	6,45	< 32
Cu (ug/l)	214,40	29,83	0,58	1238,09	339,91	144,76	42,23	0,05	892,28	236,95	< 20
Fe (mg/l)	6,08	1,98	0,06	51,57	10,36	7,13	1,87	0,10	46,41	11,41	< 0,30
Mg (mg/l)	12,01	11,69	1,35	35,53	8,21	10,64	11,48	0,98	34,20	0,75	-
Mn (ug/l)	352,03	163,14	3,12	1673,93	428,02	420,15	226,66	8,59	1433,83	455,45	< 100
Ni (ug/l)	14,78	4,39	0,10	141,61	27,55	14,81	6,06	0,04	85,06	20,56	< 25
Pb (ug/l)	10,09	2,61	0,03	59,97	16,92	11,32	1,30	0,02	96,43	23,25	< 10
Se (ug/l)	0,79	0,46	0,34	3,38	0,69	0,78	0,60	0,34	2,81	0,55	< 10
Zn (ug/l)	53,23	40,17	8,36	204,17	43,35	77,32	40,83	2,30	399,41	98,30	< 180

Tabla 4-1.- Concentraciones de metales totales en los sitios de muestreo durante la estación seca y húmeda.

¹ Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua; Criterios de calidad de aguas para la preservación de flora y fauna en aguas dulces frías o cálidas, y en aguas marinas y de estuarios.

Nota: Valores resaltados corresponden a aquellos resultados que excedieron los límites permisibles.

4.3 Parámetros de calidad del agua.

El oxígeno disuelto (OD) observado en la mayoría de los sitios es aceptable para la vida acuática. El valor medio de oxígeno disuelto es de 7,88 mg /L, varía entre 6,7 mg / L y 8,9 mg / L. Las concentraciones más bajas de OD, menos de 7 mg / L ocurrieron en el curso superior de la corriente de Guanache (G1) y aguas abajo de la confluencia del río Fermín con el Siete (S1), mientras que las concentraciones más altas se encontraron en el curso alto del río Margarita, el curso medio del río Siete y el curso inferior del río Pagua.

Las aguas de los ríos Margarita, Villa y Pagua en los sitios M2-M4, V2 y P1, respectivamente, presentan un proceso de acidificación. Los valores de pH en estos sitios son menores que 6,5. En general, el valor promedio del pH es 6,55, varía entre 3,39 y 7,6, Tabla 4-2.

La medición promedio de la demanda química de oxígeno (DQO) es de 17,5 mg / L y varía entre 3.0 mg / L y 177 mg / L. Las mayores concentraciones de DQO ocurrieron en los sitios M2 y M4 en el río Margarita durante la estación seca.

Parámetros	Época Seca – Diciembre/2015					Época húmeda – Febrero/2016					Límite permisible ²
	Media	Mediana	Min.	Max.	Dev. Std.	Media	Mediana	Min.	Max.	Dev. Std.	
Temperatura(°C)	25,73	25,60	23,60	28,05	1,39	25,34	24,95	22,70	28,80	1,67	-
pH	6,35	6,19	4,87	7,48	0,86	6,73	7,04	3,39	7,60	0,85	6,5-9
Oxígeno disuelto (%)	97,63	97,70	87,10	108,30	4,67	100,12	101,00	92,30	106,20	3,35	> 80
Oxígeno disuelto (mg/l)	7,74	7,82	6,72	8,42	0,44	8,03	8,12	6,98	8,90	0,44	-
Conductividad (µS/cm)	363,08	361,50	24,60	929,00	237,27	277,16	311,50	4,32	974,00	205,52	-
Turbidez (ntu)	182,39	56,05	1,68	1000,00	272,38	145,12	64,40	6,42	1000,00	254,40	-
Altura promedio (m)	0,39	0,27	0,06	2,00	0,38	0,89	0,55	0,10	5,00	1,03	-
Ancho de la lámina de agua (m)	8,95	7,45	1,40	32,00	7,77	8,46	8,00	2,00	27,00	5,85	-
Sólidos suspendidos totales (mg/l)	419,12	38,65	0,40	8549,70	1606,68	131,23	60,50	3,00	1056,00	213,01	-
Sólidos suspendidos volátiles (mg/l)	7,38	4,00	0,00	26,67	7,66	14,80	7,50	1,33	84,00	16,42	-
Fosfatos (mg P/l)	0,17	0,05	0,01	1,25	0,31	0,13	0,05	0,01	1,00	0,21	-
Nitrito-nitrógeno (mg/l NO ₂ N)	0,15	0,03	0,00	1,00	0,30	0,04	0,02	0,01	0,27	0,06	< 0,2
Nitrato-nitrógeno (mg/l NO ₃ N)	5,12	3,68	0,42	13,80	4,11	3,16	2,69	0,22	10,10	2,52	< 13
Demanda química de oxígeno (mg/l DOC)	22,46	3,50	3,00	177,00	46,93	9,95	9,00	3,00	23,00	5,08	-
Dureza (mg/l CaCO ₃)	210,29	179,00	38,00	760,00	157,13	210,39	241,50	11,90	584,00	135,63	-
Alcalinidad (mg/l CaCO ₃)	45,71	46,00	10,00	94,00	18,28	72,11	78,00	28,00	112,00	22,67	-

Tabla 4-2.- Estadísticas descriptivas de los parámetros físicos y químicos de los sitios muestreados en los ríos Siete y Pagua.

² Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua; Criterios de calidad de aguas para la preservación de flora y fauna en aguas dulces frías o cálidas, y en aguas marinas y de estuarios.

Nota: Valores resaltados corresponden a aquellos resultados que excedieron los límites permisibles.

4.4 Sedimentos

Los ríos analizados presentan tamaño de sedimentos de tipo limo y arcilla.

La cantidad de sólidos suspendidos totales reportada fue mayor durante la época seca. Las concentraciones en promedio, alcanzaron los 66 mg / L en el río Pagua y 461 mg / L en el río Siete. Los resultados muestran el incremento de material particulado en suspensión en los tramos de los ríos analizados, desde la cuenca alta hasta la cuenca baja. También, valores altos en los sitios M1 y M2 del río Margarita, con 1059 mg / L y 8549,7 mg / L, respectivamente.

El análisis de correlaciones entre la turbidez y los sólidos suspendidos totales y la turbidez y los nitritos reportó correlaciones con R de 0,89 y 0,72, respectivamente. Las concentraciones y los indicadores manifiestan el grado de opacidad producido en el agua por el material particulado en suspensión.

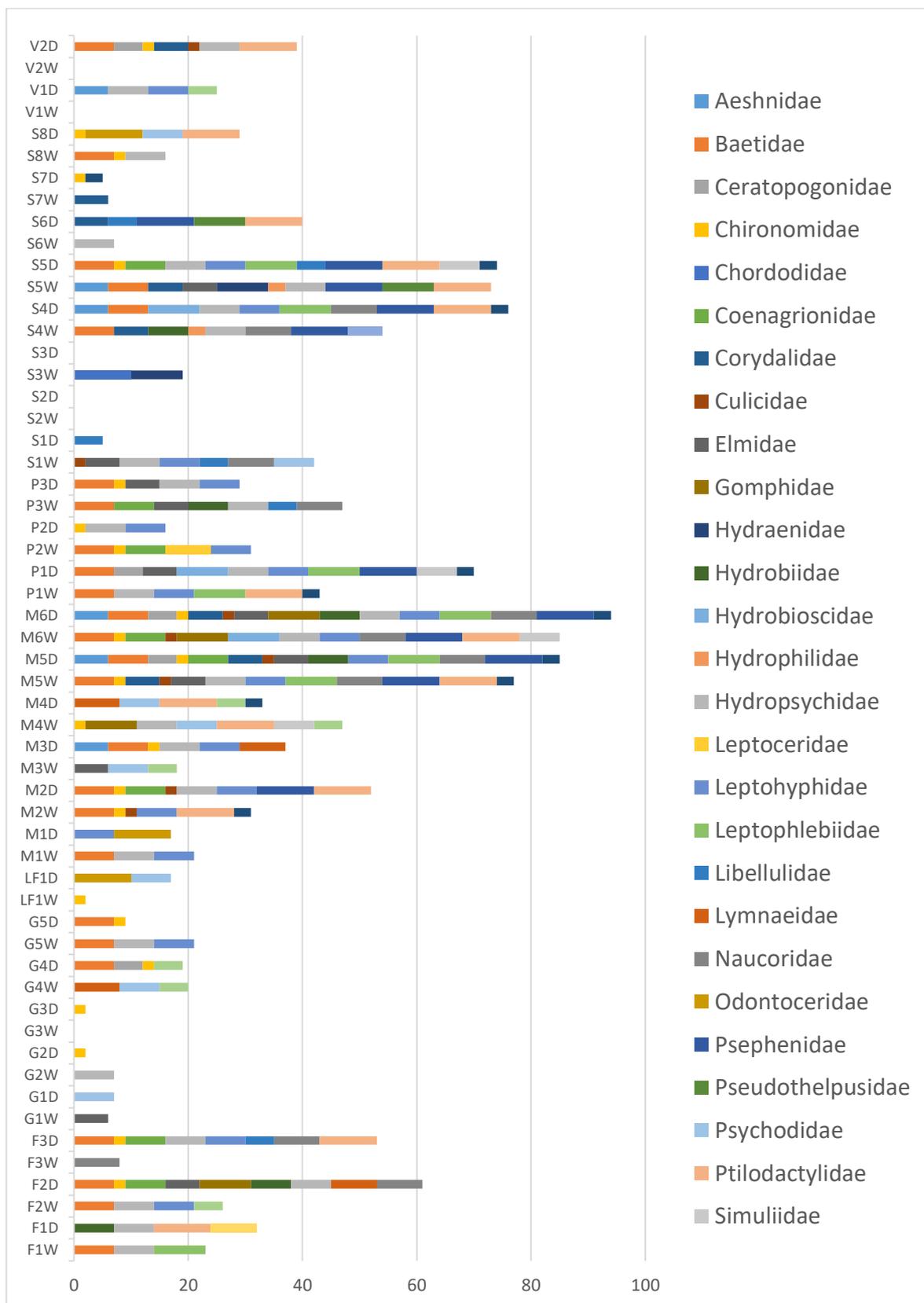
4.5 Taxones de macroinvertebrados acuáticos.

El muestreo dio como resultado un total de 1824 individuos compuestos por 32 taxones, que fueron la base para el cálculo del BMWP-Col. En la época seca, hubo una mayor abundancia de organismos. El 67% de los macroinvertebrados identificados, se recolectó en las campañas llevadas a efecto durante la época seca, mientras que el 33% se recolectó durante las jornadas de la época húmeda.

El número total de taxones en cada sitio muestreado varía entre 15 y 1 para la época seca-ES y entre 12 y 1 para la época húmeda-EH, siendo Hydropsychidae (ES=155; EH=144), Baetidae (ES=72; EH=118), Leptohiphidae (ES=106; EH=220), Ptilodactylidae (ES=76; EH=68) y Psephenidae (ES=37; EH=162), las familias más dominantes. La variación de las familias presentes en los sitios muestreados se presenta en la Figura 4-2.

Por otro lado, se descubrió que más del 80% de los individuos recolectados pertenecen a órdenes de los insectos, mientras que el 20% restante corresponde a moluscos y crustáceos. Entre los órdenes de insectos, Ephemeroptera y Coleoptera fueron los más abundantes con 662 y 501 especies respectivamente. Los sitios con el mayor número de macroinvertebrados sensibles a la actividad antropogénica, es decir, Baetidae y Psephenidae, fueron M4 y M5 en el río Margarita seguidos de P1 en el río Pagua. Siendo la época seca, cuando hubo una mayor abundancia de este tipo de organismos raspadores.

Figura 4-2.- Taxa de macroinvertebrados presentes en los sitios de muestreo en los ríos Siete y Pagua durante febrero y diciembre de 2015. F = Río Fermin, G = Guanache, LF = Arroyo La Florida, M = Río Margarita, P = Río Pagua, S = Río Siete, V = rio de villa. D = época seca, W = época húmeda.



4.6 Índice BMWP-Col

El índice de calidad promedio en los sitios estudiados es de 30 y varía entre 0 y 94. La calidad del agua de los ríos Pagua y Siete, según el índice BMWP Colombia, se clasificó en cuatro clases: muy mala, mala, pobre y moderada.

La calidad del agua del río Pagua varió en la dirección del flujo, desde aguas arriba hacia aguas abajo durante la época seca, la calidad se degradó de moderado a malo, mientras que, en la época húmeda, la calidad se mantuvo pobre.

La calidad del agua del cauce principal del río Siete varió en la dirección del flujo, desde aguas arriba hacia aguas abajo durante las dos épocas (seca y húmeda), la calidad se degradó de malo a muy malo.

La calidad del agua de los principales afluentes del río Siete varió de moderado a muy malo durante las dos épocas de estudio. La condición más favorable se presentó en el río Nueve de Octubre mientras que la condición más desfavorable se presentó en el río Guanache.

Mediante el análisis de correlaciones multivariantes, se observó que en presencia de Baetidae y Psephenidae, las puntuaciones de calidad del agua fueron más altas (Correlaciones $R > 0,65$).

Los sitios muestreados donde se encontraron mayor recurrencia de Baetidae y Psephenidae fueron los ríos Margarita y Pagua (M4, M5 y P1, respectivamente). Las mejores condiciones ambientales se presentaron en el afluente 9 de octubre del río Siete (S5) y en el curso alto del río Margarita (M4 y M5). La variación espacial y estacional de la calidad ecológica de las cuencas de los ríos Siete y Pagua se muestran en la Figura 4-3 (a y b).

El cromo, el cobre, el hierro, el manganeso y los sólidos totales en suspensión presentaron diferencias significativas por clases ($p < 0,05$), es decir entre aquellos sitios clasificados por el BMWP como muy malo, malo, pobre y moderado. Mientras que Naucoridae y Psephenidae fueron las familias que presentaron diferencias significativas por clases.

La variación espacial de la condición ecológica de los ríos Siete y Pagua en la estación de muestreo húmeda y seca se presenta en la Figura 4-3 a y b. La ilustración describe la disminución en la calidad ecológica de los ríos Siete y Pagua y las influencias de las actividades antropogénicas que ocurren en la cuenca.

Figura 4-3.- Variación estacional y espacial de la calidad del agua de los ríos Siete y Pagua. (a) Calidad actual del agua en la estación húmeda. (b) Calidad actual del agua en la estación seca.

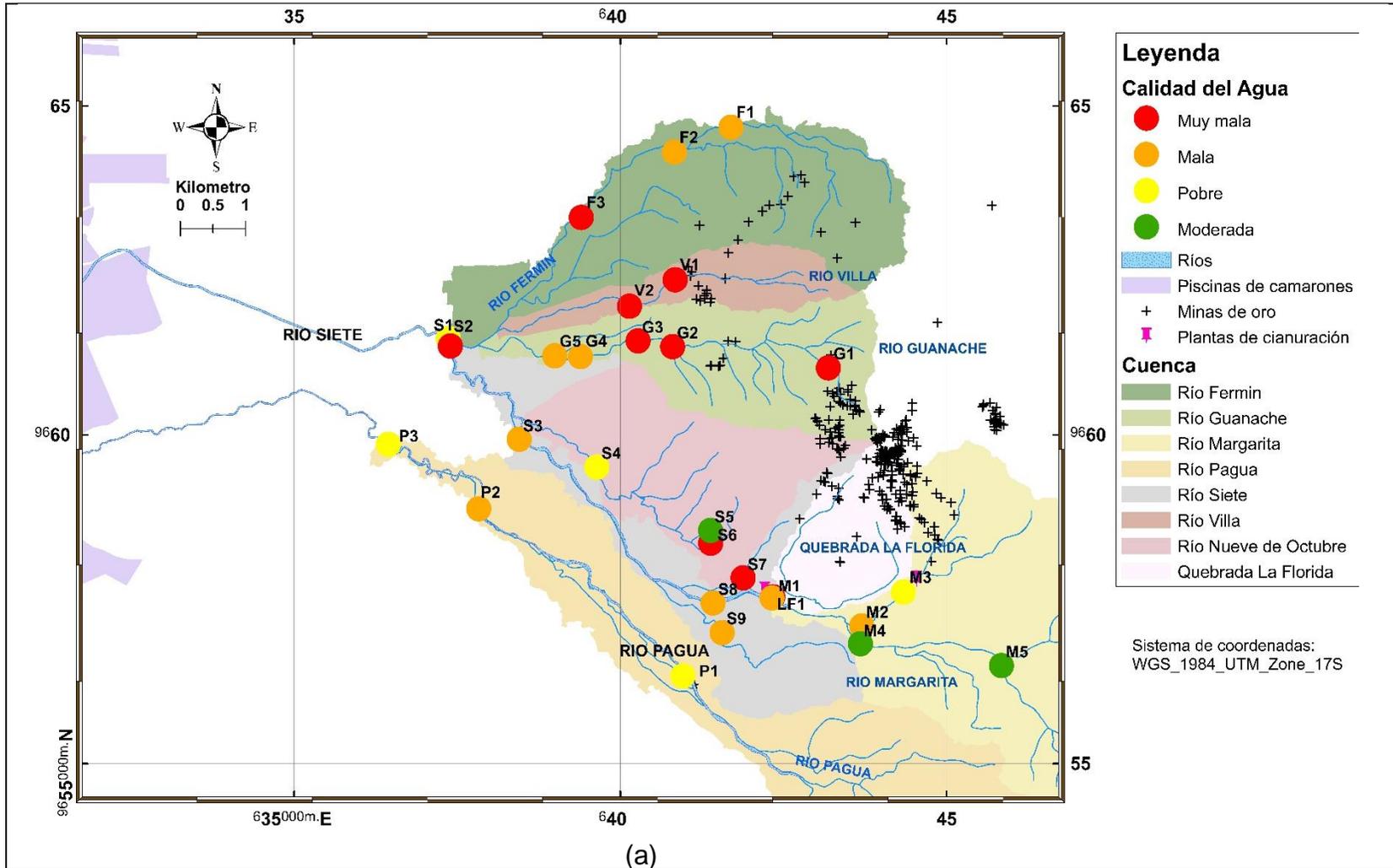
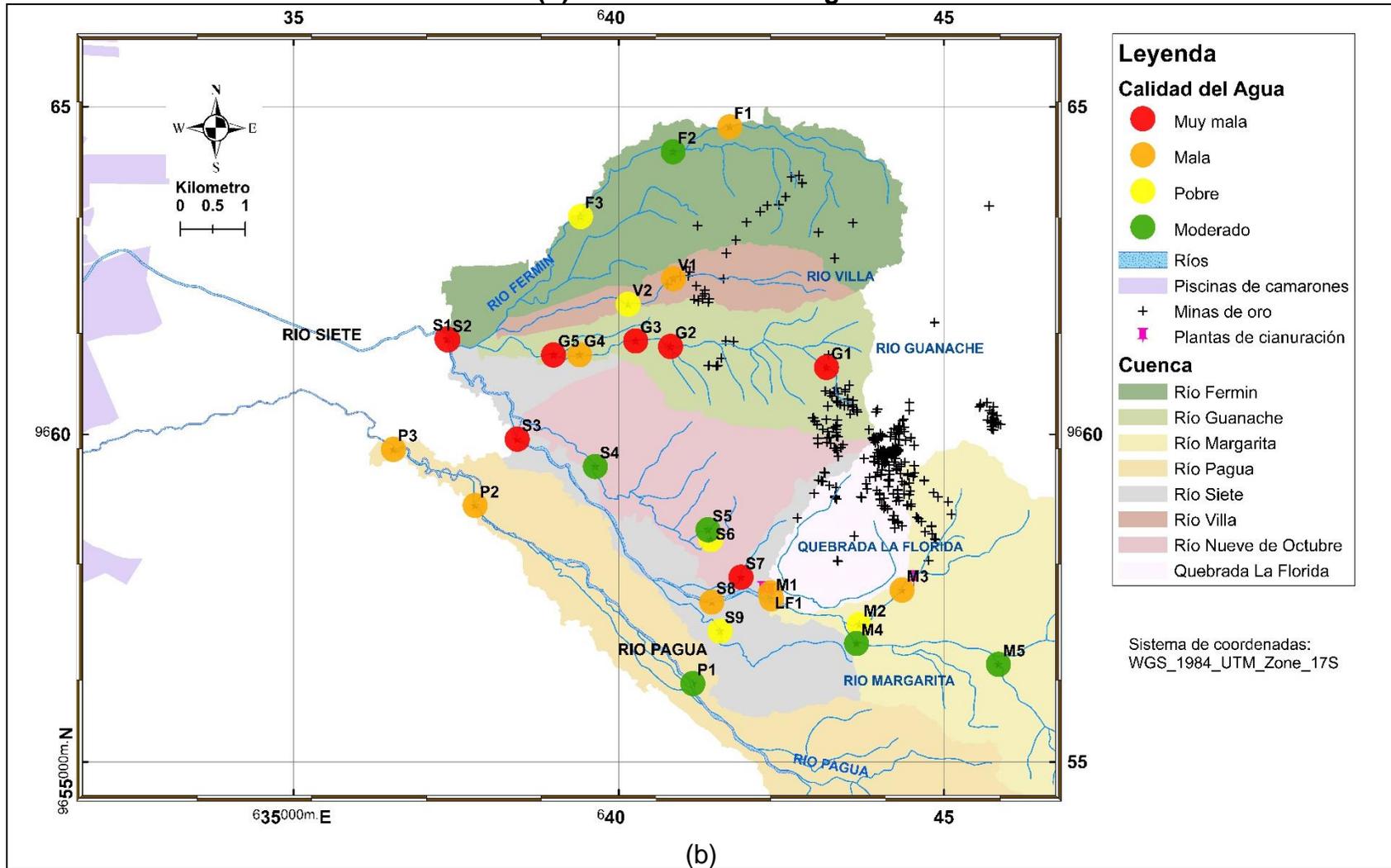


Figura 4-3.- Variación estacional y espacial de la calidad del agua de los ríos Siete y Pagua. (a) Calidad actual del agua en la estación húmeda. (b) Calidad actual del agua en la estación seca.



La Tabla 4-3 muestra la calidad del agua de las cuencas estudiadas durante las épocas de muestreo. La calificación fue obtenida a partir de la interpretación de la media aritmética de los valores de BMWP-Col que obtuvo la cuenca a través de los puntos monitoreados. La tabla también presenta el número de sitios mineros por cuenca y su impacto en la calidad del agua que presenta el cauce principal de la cuenca, a mayor número de minas en la cuenca, mayor degradación de la calidad del agua en los puntos monitoreados.

Cuenca	Área de la cuenca-km ²	Puntos monitoreados	# de minas	Calidad del agua	
				Época seca	Época húmeda
Río Pagua	62,00	P1, P2, P3	0	Pobre	Pobre
Río Siete	7,86	S1, S2, S3, S7, S8, S9	6	Mala	Muy mala
Río Nueve de Octubre	7,82	S4, S5, S6	11	Moderado	Pobre
Río Villa	3,15	V1, V2	12	Mala	Muy mala
Río Fermín	11,71	F1, F2, F3	13	Pobre	Mala
Río Margarita	36,62	M1, M2, M3, M4, M5	36	Pobre	Pobre
Río Guanache	7,58	G1, G2, G3, G4, G5	68	Muy mala	Muy mala
Quebrada La Florida	3,77	LF1	125	Mala	Mala

Tabla 4-3.- Calidad del agua de las cuencas estudiadas por época de muestreo.

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Discusión

Los ríos Siete, Villa y Guanache y el arroyo La Florida, que tienen una alta incidencia de actividad minera en los sitios S8, V2, G1 y LF1, respectivamente, se caracterizan por agua dura y ácida, altas concentraciones de metales pesados y mala calidad del agua. Del grupo de metales pesados observados, el aluminio, el arsénico, el cobre, el hierro y el manganeso se destacan porque presentaron concentraciones que estaban por encima del nivel máximo permitido de contaminantes en aguas dulces frías o cálidas, y en aguas marinas y de estuarios.

Carling et al., 2013, Appleton et al., 2001 y Tarras-Wahlberg et al., 2000 también reportaron altas concentraciones de arsénico y cobre para muestras filtradas en el río Siete, en el orden de los 100 ug/l de arsénico y 1000 ug/l de cobre. También informaron concentraciones considerables de cadmio, plomo y zinc en el agua, pero ninguna estaba por encima del estándar de calidad del agua dulce para salvaguardar la vida acuática dados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (Carling et al., 2013), (Appleton et al., 2001) y (N. Håkan Tarras-Wahlberg et al., 2000).

Pocos estudios han utilizado macroinvertebrados para estimar la contaminación de los ríos por metales pesados, particularmente en América del Sur y en el Ecuador no hay referencias de estudios relacionados. Los parámetros físico-químico-hidromorfológicos estudiados inducen diferentes respuestas en la fauna acuática en los sitios alterados por la extracción de oro, ya que esta alteración es compleja debido a la falta de conocimiento de la calidad y cantidad de residuos provenientes de las áreas o sitios mineros, por ejemplo, los sitios donde se deposita el desperdicio de la actividad (relaveras). Otro aspecto importante a tenerse en cuenta en futuros análisis es la interacción de la climatología, los impactos previos y las características del ecosistema.

Para el presente caso de estudio, se ha encontrado que la presencia de Baetidae y Psephenidae, Ephemeroptera y Coleoptera respectivamente, son buenos indicadores de la calidad ambiental de los ríos Siete y Pagua. Lo cual guarda relación con el estudio desarrollado por Hickey y Clements, 1998, donde encontraron que Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera fueron los mejores indicadores de metales pesados en los ríos de Nueva Zelanda. Resultaría interesante profundizar el estudio de estas especies de macroinvertebrados y su interacción con los ecosistemas afectados por la extracción de oro (Hickey & Clements, 1998).

La calidad del agua de los ríos estudiados, basada en el índice BMWP-Col, varía desde la cuenca alta hasta la cuenca baja de moderada a mala en el río Pagua y de moderado a muy mala en el río Siete y sus afluentes. El régimen de lluvias en el área no influyó significativamente en la calidad del agua, sin embargo, durante el día la concentración podría fluctuar en función de la actividad minera y el tiempo de descarga de los residuos.

En general, el índice BMWP-Col se desempeña bien en la cuenca, la clasificación es coherente con el nivel de impacto de la actividad antropogénica. Los valores más altos del índice BMWP-Col se asociaron con una mayor concentración de oxígeno disuelto, un tipo de sedimento más grueso y la pendiente promedio de la cuenca, propio del curso medio de los ríos donde existe suficiente energía hidráulica. Mientras los niveles más bajos se asociaron con una mayor conductividad y mayores concentraciones de metales y nitratos, donde se evidencia la actividad antropogénica. Los sitios de muestreo ubicados en las cabeceras de las cuencas presentaron una mejor calidad del agua, en comparación con los sitios muestreados aguas abajo donde hay presiones de los asentamientos de población, la agricultura intensiva y la minería, que Malmqvist y Rundle, 2002 consideran como Principales causas inmediatas del cambio de ecosistemas en arroyos y ríos (Malmqvist & Rundle, 2002).

Bajo escenarios semejantes al caso de estudio, cuando los recursos son insuficientes para realizar muestreos rutinarios, los índices bióticos son una buena alternativa para conocer la condición ambiental de los ecosistemas acuáticos. Esta metodología, relacionada con los parámetros físicos-químicos comúnmente levantados en monitoreo de agua, permitiría obtener una retrospectiva de la calidad que goza el cuerpo de agua. Para llevar a efecto esta nueva técnica de evaluación es menester conocer los aspectos funcionales y cuantitativos de las comunidades acuáticas.

5.2 Conclusiones y recomendaciones

Los desarrollos mineros en el área de estudio, se concentran en la cuenca del río Siete, siendo la quebrada La Florida, el cuerpo de agua que receipta las descargas de un gran parte de los desarrollos mineros. La cuenca del río Pagua, de acuerdo al mapa de concesiones y desarrollos mineros, no presenta sitios de extracción del mineral.

La calidad del agua del río Pagua durante el año es "Pobre" mientras que la calidad del agua del río Siete varía entre "Moderado" y "Muy malo" durante la época seca y entre "Pobre" y "Muy malo" en la época húmeda. En el tramo del río Siete analizado, se encontró que el deterioro de la calidad del agua era mayor en las cercanías de su confluencia con el río Guanache.

La calidad del agua varía naturalmente según la fuente y los impactos antropogénicos. En virtud de ello, las aguas del río Siete se encuentran más deteriorada debido a las descargas de residuos líquidos de la actividad minera. Los efectos de la minería en el área de Ponce Enríquez están presentes a través de la

movilización de partículas sólidas, la adición de metales pesados y de sales al agua y la acidificación de los cursos de agua.

La condición ecológica de los ríos analizados, a través del uso de BMWP-Col, se rige principalmente por la concentración de metales pesados como el magnesio, el manganeso y el níquel en las corrientes de agua y la pendiente promedio de la cuenca. En estas circunstancias, las iniciativas políticas para mejorar la calidad del ecosistema estarían relacionadas con la reducción de las concentraciones de magnesio, el manganeso y el níquel en los cuerpos de agua analizados. En este contexto, vale la pena mencionar que es indispensable que los responsables de la toma de decisiones revisen los estándares de calidad del agua, a fin de garantizar la vida acuática y la buena salud de los ecosistemas acuáticos. Si no se toman medidas correctivas en los procesos, es muy probable que las altas concentraciones de metales pesados, como magnesio, el manganeso y el níquel aumenten, lo que implicaría un riesgo ecológico y para la salud humana, pudiendo ingresar a la cadena alimentaria o ser lixiviados al área de camarones o estuarios aledaños.

En Ecuador, es necesario generar información relacionada con la composición y función de las comunidades de macroinvertebrados en ríos de montaña y llanos, para comprender mejor los procesos de autorregulación en los sistemas acuáticos y la influencia de las perturbaciones naturales o artificiales sobre ellos. En el estudio, se evidenció que la presencia de Baetidae y Psephenidae implicaba buena condición del ecosistema acuático. La información sobre los aspectos funcionales y cuantitativos de las comunidades acuáticas permite calificar los sistemas de evaluación de la calidad ecológica de los ríos que utilizan, principalmente, la estructura de las comunidades, como criterios de indicación (Bonada et al., 2006)

A partir del presente estudio se han generado los primeros mapas de calidad del agua de los ríos Pagua y Siete, aplicando el método BMWP/Col, tanto para la época seca como para la época húmeda. Estos mapas evidencian la variación espacial y temporal de la calidad del agua en los cuerpos de agua, con lo cual se genera la línea base para un plan de recuperación de sus ecosistemas acuáticos.

Los resultados de este estudio son valiosos para comprender los sistemas acuáticos de alta montaña y media montaña que tienen incidencia de la minería del oro y proporcionan información sobre los efectos de las condiciones ambientales en los invertebrados de arroyos, lo que ayudará a proteger y conservar los sistemas.

6 Referencias

- Acosta, J. A., Cano, Á. F., Muñoz, M. Á., Vera, R., Martínez-Martínez, S., Millán, R., & Terán, T. (2011). Caracterización de la contaminación potencial por mercurio en el área minera de Apolobamba, Bolivia. *Spanish Journal of Soil Science*, 1(1). <https://doi.org/10.3232/SJSS.2011.V1.N1.06>
- Agencia de Regulación y Control Minero. (2015, abril 21). *Agencia de Regulación y Control Minero*. Agencia de Regulación y Control Minero. <http://www.controlminero.gob.ec/>
- Álvarez, L. F. (2005). *Metodología para la utilización de los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad del agua*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt. <http://repository.humboldt.org.co/handle/20.500.11761/31357?show=full>
- Ambarita, D., Naomi, M., Lock, K., Boets, P., Everaert, G., Nguyen, T. H. T., Forio, M. A. E., Musonge, P. S. L., Semjonova, N., Bennetsen, E., Landuyt, D., Dominguez-Granda, L., & Goethals, P. (2016). Ecological water quality analysis of the Guayas river basin (Ecuador) based on macroinvertebrates indices. *LIMNOLOGICA*, 57, 27-59. <http://dx.doi.org/10.1016/j.limno.2016.01.001>
- Appleton, J. D., Williams, T. M., Orbea, H., & Carrasco, M. (2001). Fluvial Contamination Associated with Artisanal Gold Mining in the Ponce Enríquez, Portovelo-Zaruma and Nambija Areas, Ecuador. *Water, Air, and Soil Pollution*, 131(1-4), 19-39. <https://doi.org/10.1023/A:1011965430757>
- Armitage, P. D., Moss, D., Wright, J. F., & Furse, M. T. (1983). The performance of a new biological water quality score system based on macroinvertebrates

over a wide range of unpolluted running-water sites. *Water Research*, 17(3), 333-347. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(83\)90188-4](https://doi.org/10.1016/0043-1354(83)90188-4)

Bervoets, L., De Jonge, M., & Blust, R. (2016). Identification of threshold body burdens of metals for the protection of the aquatic ecological status using two benthic invertebrates. *Environmental Pollution*, 210, 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.12.005>

Bonada, N., Prat, N., Resh, V. H., & Statzner, B. (2006). DEVELOPMENTS IN AQUATIC INSECT BIOMONITORING: A Comparative Analysis of Recent Approaches. *Annual Review of Entomology*, 51(1), 495-523. <https://doi.org/10.1146/annurev.ento.51.110104.151124>

Carling, G. T., Diaz, X., Ponce, M., Perez, L., Nasimba, L., Pazmino, E., Rudd, A., Merugu, S., Fernandez, D. P., Gale, B. K., & Johnson, W. P. (2013). Particulate and Dissolved Trace Element Concentrations in Three Southern Ecuador Rivers Impacted by Artisanal Gold Mining. *Water, Air, & Soil Pollution*, 224(2), 1415. <https://doi.org/10.1007/s11270-012-1415-y>

Chapman, D. (Ed.). (1996). *Water quality assessments: A guide to the use of biota, sediments and water environmental monitoring* (2. ed). E & FN Spon.

Cooman, G. D., & Kerre, E. E. (1996). Possibility and necessity integrals. *Fuzzy Sets and Systems*.

De Pauw, N., Gabriels, W., & Goethals, P. L. M. (2006). River Monitoring and Assessment Methods Based on Macroinvertebrates. En *Biological Monitoring of Rivers* (pp. 111-134). Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/0470863781.ch7>

Dell, & Statsoft. (1993). *STATISTICA* (STATISTICA versión 4.0) [Windows]. <http://www.statsoft.com/Products/STATISTICA-Features>

- Domínguez, E., & Fernández, H. R. (Eds.). (2009). *Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos: Sistemática y biología*. Fundación Miguel Lillo.
- Dominguez-Granda, L., Lock, K., & Goethals, P. L. M. (2011). Using multi-target clustering trees as a tool to predict biological water quality indices based on benthic macroinvertebrates and environmental parameters in the Chaguana watershed (Ecuador). *Ecological Informatics*, 6(5), 303-308.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2011.05.004>
- Emmanuel, A. Y., Jerry, C. S., & Dzigbodi, D. A. (2018). Review of Environmental and Health Impacts of Mining in Ghana. *Journal of Health and Pollution*, 8(17), 43-52. <https://doi.org/10.5696/2156-9614-8.17.43>
- Fashola, M. O., Ngole-Jeme, V. M., & Babalola, O. O. (2016). Heavy Metal Pollution from Gold Mines: Environmental Effects and Bacterial Strategies for Resistance. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/ijerph13111047>
- Gleich, A. von, Ayres, R. U., & Gößling-Reisemann, S. (Eds.). (2006). *Sustainable Metals Management: Securing Our Future - Steps Towards a Closed Loop Economy*. Springer Netherlands.
[//www.springer.com/la/book/9781402040078](http://www.springer.com/la/book/9781402040078)
- Griffiths, D. M. (2002). *The European Water Framework Directive: An Approach to Integrated River Basin Management*.
- Hickey, C. W., & Clements, W. H. (1998). Effects of heavy metals on benthic macroinvertebrate communities in New Zealand streams. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 17(11), 2338-2346.
<https://doi.org/10.1002/etc.5620171126>

- INAMHI, I. N. de M. e. (2016, enero 29). Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología » Biblioteca. *Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología*.
<http://www.serviciometeorologico.gob.ec/biblioteca/>
- Lascano, D., & Carlos, J. (2008). *Diagnóstico de la contaminación por mercurio en aguas y sedimentos de ríos que reciben efluentes de la minería de oro en los sectores de Nambija, Ponce Enríquez y Portovelo*.
<http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/785>
- Lock, K., Asenova, M., & Goethals, P. L. M. (2011). Benthic macroinvertebrates as indicators of the water quality in Bulgaria: A case-study in the Iskar river basin. *Limnologica*, 41(4), 334-338.
<https://doi.org/10.1016/j.limno.2011.03.002>
- MAE. (2008). *LIBRO I DE LA AUTORIDAD AMBIENTAL - TITULO I*.
- Malmqvist, B., & Rundle, S. (2002). Threats to the running water ecosystems of the world. *Environmental Conservation*, 29(2), 134-153.
<https://doi.org/10.1017/S0376892902000097>
- Mudroch, A., & Azcue, J. (1995). Design of Studies in Evaluating Effects of Mining on Aquatic Ecosystems. En W. J. Van Den Brink, R. Bosman, & F. Arendt (Eds.), *Contaminated Soil '95* (pp. 239-240). Springer Netherlands.
- Nussey, G., & van Vuren, J. (2000). *Bioaccumulation of chromium, manganese, nickel and lead in the tissues of the moggel, Labeo umbratus (Cyprinidae), from Witbank Dam, Mpumalanga*. 16.
- Olivero, J., & Solano, B. (1998). Mercury in environmental samples from a waterbody contaminated by gold mining in Colombia, South America. *Science of The Total Environment*, 217(1), 83-89.
[https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(98\)00175-2](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(98)00175-2)

- P. Ouboter, G. Landburg, H. Hiwat, & V. Wortel. (2006). *Impact of Gold Mining on the Aquatic Ecosystem of Witi Creek, Brownsberg*. [Technical report].
https://www.researchgate.net/publication/262972829_Impact_of_Gold_Mining_on_the_Aquatic_Ecosystem_of_Witi_Creek_Brownsberg
- Pérez, G. R. (2003). *Bioindicación de la calidad del agua en Colombia: Propuesta para el uso del método BMWP Col*. Universidad de Antioquia.
- Prada-Trigo, J. (2017). Governance and Territorial Development in Ecuador: The Plan Nacional del Buen Vivir in Zaruma, Piñas and Portovelo. *Journal of Latin American Studies*, 49(2), 299-326.
<https://doi.org/10.1017/S0022216X16001474>
- Prodeminca (Ed.). (1998). *Monitoreo ambiental de las áreas mineras en el sur del Ecuador: 1996 - 1998*. Prodeminca.
- Rajae, M., Obiri, S., Green, A., Long, R., Cobbina, S. J., Nartey, V., Buck, D., Antwi, E., & Basu, N. (2015). Integrated Assessment of Artisanal and Small-Scale Gold Mining in Ghana—Part 2: Natural Sciences Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(8), 8971-9011. <https://doi.org/10.3390/ijerph120808971>
- Restrepo-Manrique, R., Salcedo-Reyes, J. C., Restrepo-Manrique, R., & Salcedo-Reyes, J. C. (2018). Application of physico-chemical indexes and BMWP / Col. To establish the impact of urbanization on Río Frío (Bucaramanga, Colombia). *Universitas Scientiarum*, 23(1), 109-128.
<https://doi.org/10.11144/javeriana.sc23-1.aopc>
- Roldán-Pérez, G. (2016). Los macroinvertebrados como bioindicadores de la calidad del agua: Cuatro décadas de desarrollo en Colombia y Latinoamérica. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas,*

Físicas y Naturales, 40(155), 254-274.

<https://doi.org/10.18257/raccefyn.335>

Santos, S., & E, M. (2006). *La importancia de la actividad minera en la economía y sociedad peruana*. CEPAL.

<https://repositorio.cepal.org/handle/11362/6312>

Sistema Nacional de Información. (2010). *PDOT- Descargas*. PLANES DE DESARROLLO Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL -PDYOT.

<https://multimedia.planificacion.gob.ec/PDOT/descargas.html>

Tarras-Wahlberg, N. H, Flachier, A., Lane, S. N., & Sangfors, O. (2001).

Environmental impacts and metal exposure of aquatic ecosystems in rivers contaminated by small scale gold mining: The Puyango River basin, southern Ecuador. *Science of The Total Environment*, 278(1–3), 239-261.

[https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)00655-6](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)00655-6)

Tarras-Wahlberg, N. Håkan, Flachier, A., Fredriksson, G., Lane, S., Lundberg, B.,

& Sangfors, O. (2000). Environmental Impact of Small-scale and Artisanal Gold Mining in Southern Ecuador. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 29(8), 484-491.

<https://doi.org/10.1579/0044-7447-29.8.484>

Van Ael, E., De Cooman, W., Blust, R., & Bervoets, L. (2015). Use of a

macroinvertebrate based biotic index to estimate critical metal concentrations for good ecological water quality. *Chemosphere*, 119, 138-

144. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.06.001>

World Health Organization (Ed.). (2011). *Guidelines for drinking-water quality* (4th ed). World Health Organization.

Ziglio, G., Flaim, G., & Siligardi, M. (2008). *Biological Monitoring of Rivers:*

Applications and Perspectives. John Wiley & Sons.

7 Apéndices y anexos

Orden	Familia	BMWP-Col Puntaje de tolerancia	No. de Presencia		Grupo de alimentación funcional
			Época seca	Época húmeda	
Veneroidea	Corbiculidae	0	0	1	
Diptera	Chironomidae	2	12	57	Collector-gatherer
Diptera	Culicidae	2	4	6	Collector-gatherer
Coleoptera	Hydrophilidae	3	2	0	Depredador
Diptera	Tipulidae	3	4	15	Trituradors
Diptera	Ceratopogonidae	5	0	6	Recolector
Odonata	Libellulidae	5	8	8	Depredador
Diptera	Tabanidae	5	24	4	Depredador
Odonata	Aeshnidae	6	1	17	Depredador
Megaloptera	Corydalidae	6	8	7	Depredador
Coleoptera	Elmidae	6	6	82	Raspador
Coleoptera	Staphylinidae	6	2	0	Depredador
Ephemeroptera	Baetidae	7	72	118	Raspador
Odonata	Coenagrionidae	7	7	17	Depredador
Mesogastropoda	Hydrobiidae	7	3	155	Raspador
Trichoptera	Hydropsychidae	7	151	144	Recolector
Ephemeroptera	Leptohyphidae	7	106	220	Recolector
Diptera	Psychodidae	7	42	9	Raspador
Diptera	Simuliidae	7	6	14	Collector-filterer
Basommatophora	Lymnaeidae	8	1	8	Raspador
Hemiptera	Naucoridae	8	16	15	Depredador
Veneroidea	Sphaeriidae	8	0	3	Collector-filterer
Odonata	Gomphidae	9	3	4	Depredador
Coleoptera	Hydraenidae	9	2	0	Recolector
Trichoptera	Hydrobioscidae	9	2	34	Depredador
Ephemeroptera	Leptophlebiidae	9	14	74	Recolector
Crustacea	Pseudothelphusidae	9	1	1	Triturador
Chordodea	Chordodidae	10	1	0	Parasite
Trichoptera	Odontoceridae	10	0	6	Recolector
Coleoptera	Psephenidae	10	37	162	Raspador
Coleoptera	Ptilodactylidae	10	76	68	Triturador

Tabla 7-1.- Taxa de macroinvertebrados, puntajes de tolerancia, número de presencias en las muestras y grupo de alimentación funcional (FFG) encontrado en las cuencas de los ríos Siete y Paga.

Parámetros										Porcentaje
	Al	As	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Limo-Sedimentos
Al	1.00	0.68	0.65	0.57	0.96	0.32	0.93	0.50	0.58	0.26
As	0.68	1.00	0.48	0.29	0.76	0.07	0.72	0.24	0.26	0.25
Ca	0.65	0.48	1.00	0.57	0.62	0.44	0.66	0.91	0.67	0.01
Cd	0.57	0.29	0.57	1.00	0.54	0.82	0.49	0.69	0.88	0.09
Cr	0.96	0.76	0.62	0.54	1.00	0.31	0.94	0.45	0.59	0.26
Cu	0.32	0.07	0.44	0.82	0.31	1.00	0.24	0.61	0.81	0.08
Fe	0.93	0.72	0.66	0.49	0.94	0.24	1.00	0.48	0.54	0.20
Mg	0.50	0.24	0.91	0.69	0.45	0.61	0.48	1.00	0.77	0.00
Mn	0.58	0.26	0.67	0.88	0.59	0.81	0.54	0.77	1.00	0.11
Ni	0.41	0.14	0.49	0.95	0.38	0.81	0.35	0.69	0.86	0.02
Pb	0.76	0.85	0.41	0.34	0.81	0.03	0.76	0.15	0.27	0.34
Se	0.28	-0.09	0.71	0.43	0.20	0.53	0.32	0.78	0.60	0.06
Zn	0.61	0.38	0.43	0.70	0.60	0.43	0.54	0.40	0.58	0.19
Conductividad	0.32	0.15	0.74	0.45	0.31	0.48	0.32	0.84	0.62	0.02
Turbidez	0.79	0.51	0.50	0.50	0.79	0.34	0.73	0.39	0.51	0.30
Porcentaje Arcilla-Sedimentos	0.21	0.30	0.03	0.05	0.24	0.07	0.18	0.01	0.06	0.89

Tabla 7-2.- Resultados de la correlación entre parámetros físico-químicos. Los valores marcados corresponden a correlaciones significativas a $p < 0.05$ y $R > 0.7$.

Familias	Metales pesados												
	Al	As	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	Pb	Se	Zn
Baetidae	-0.34	-0.43	-0.51	-0.44	-0.37	-0.38	-0.37	-0.49	-0.48	-0.40	-0.31	-0.33	-0.32
Hydropsychidae	-0.27	-0.34	-0.39	-0.37	-0.33	-0.39	-0.28	-0.41	-0.42	-0.37	-0.21	-0.21	-0.22
Leptohyphidae	-0.32	-0.35	-0.57	-0.46	-0.40	-0.44	-0.34	-0.58	-0.47	-0.40	-0.24	-0.34	-0.39
Leptophlebiidae	-0.68	-0.25	-0.43	-0.27	-0.28	-0.25	-0.24	-0.42	-0.35	-0.24	-0.21	-0.28	-0.24
Odontoceridae	0.29	0.31	0.27	0.08	0.33	0.07	0.48	0.21	0.16	0.06	0.38	0.24	0.08
Psephenidae	-0.29	-0.29	-0.46	-0.31	-0.32	-0.30	-0.29	-0.43	-0.41	-0.29	-0.24	-0.32	-0.11
Psychodidae	0.54	0.46	0.47	0.56	0.50	0.36	0.57	0.39	0.44	0.45	0.46	0.27	0.48

Tabla 7-3.- Resultados de la correlación entre familias de macro-invertebrados y metales pesados. Los valores marcados corresponden a correlaciones significativas a $p < 0.05$ y $R > 0.4$.

Figura 7-1.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de Zn y el límite permitido – época húmeda

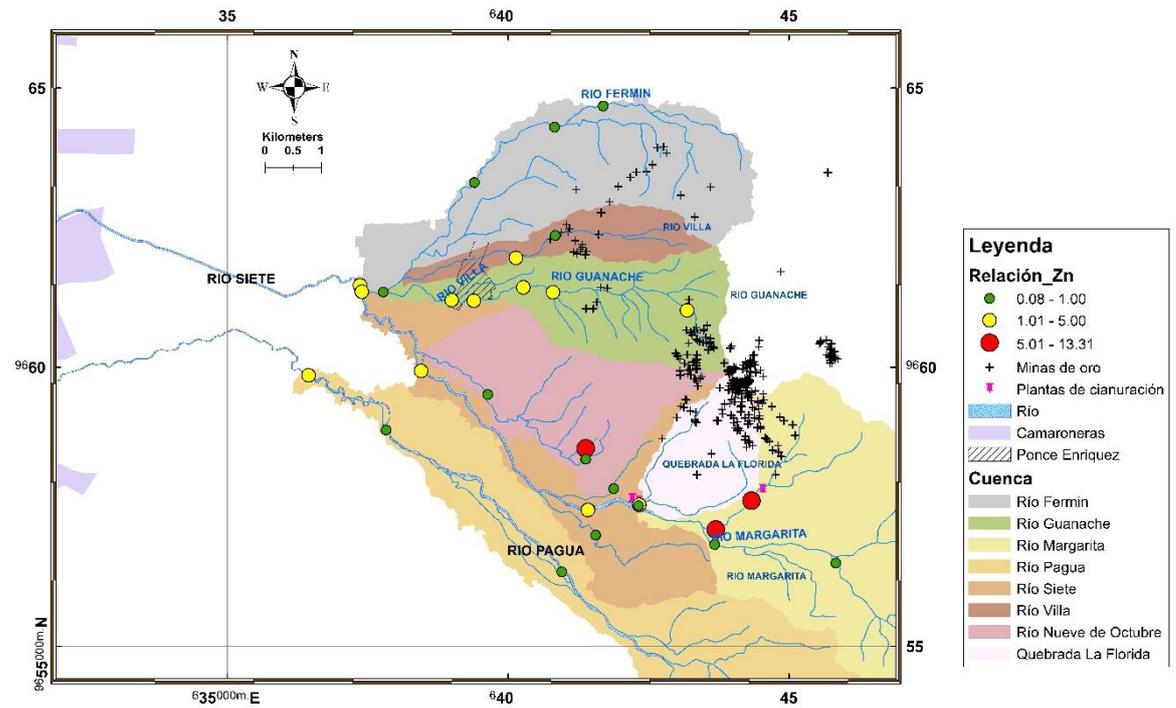


Figura 7-2.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de Zn y el límite permitido – época seca

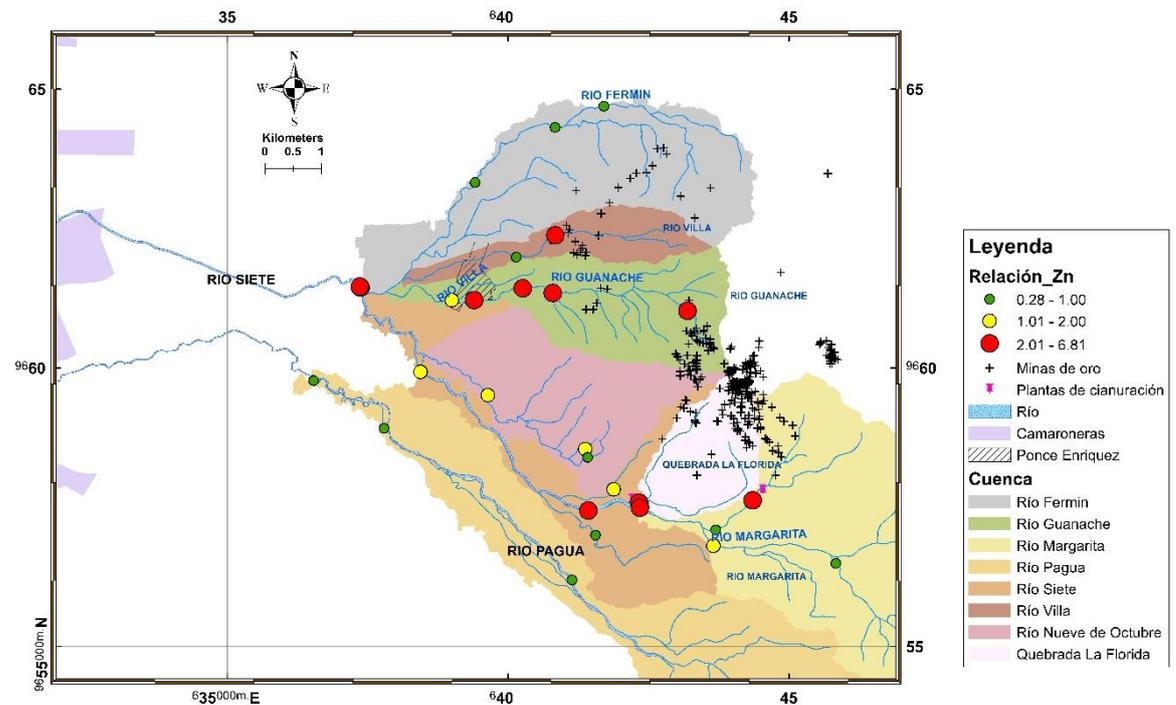


Figura 7-3.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de Se y el límite permitido – época húmeda

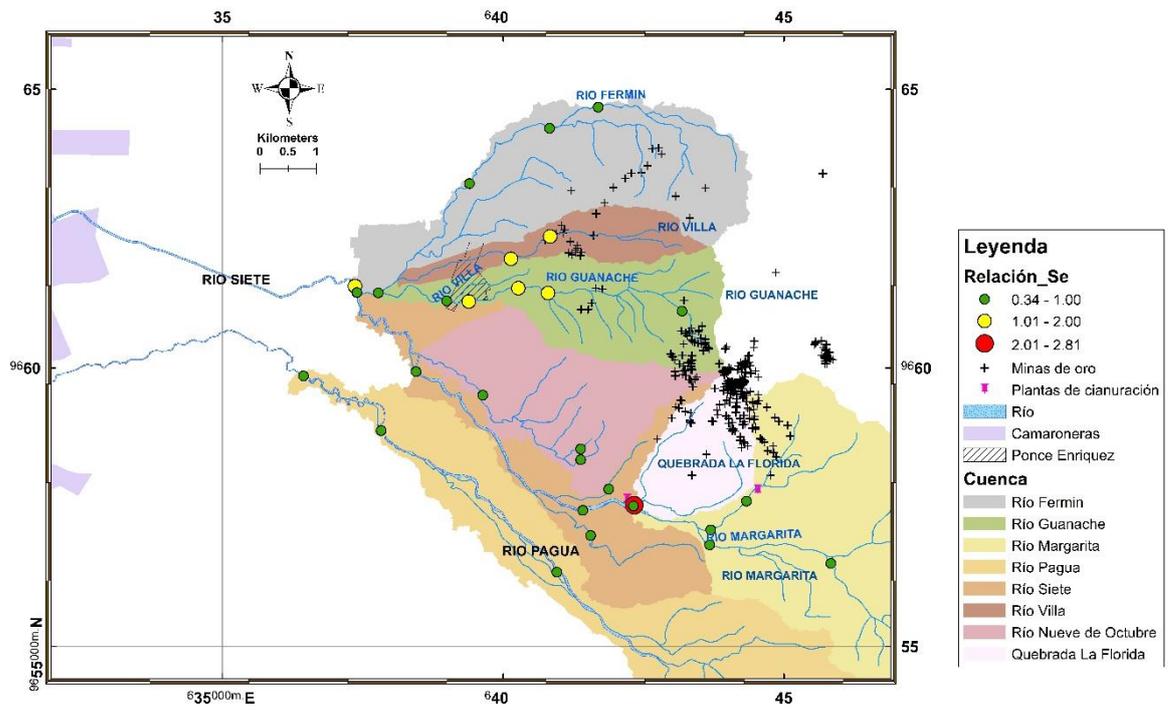


Figura 7-4.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de Se y el límite permitido – época seca

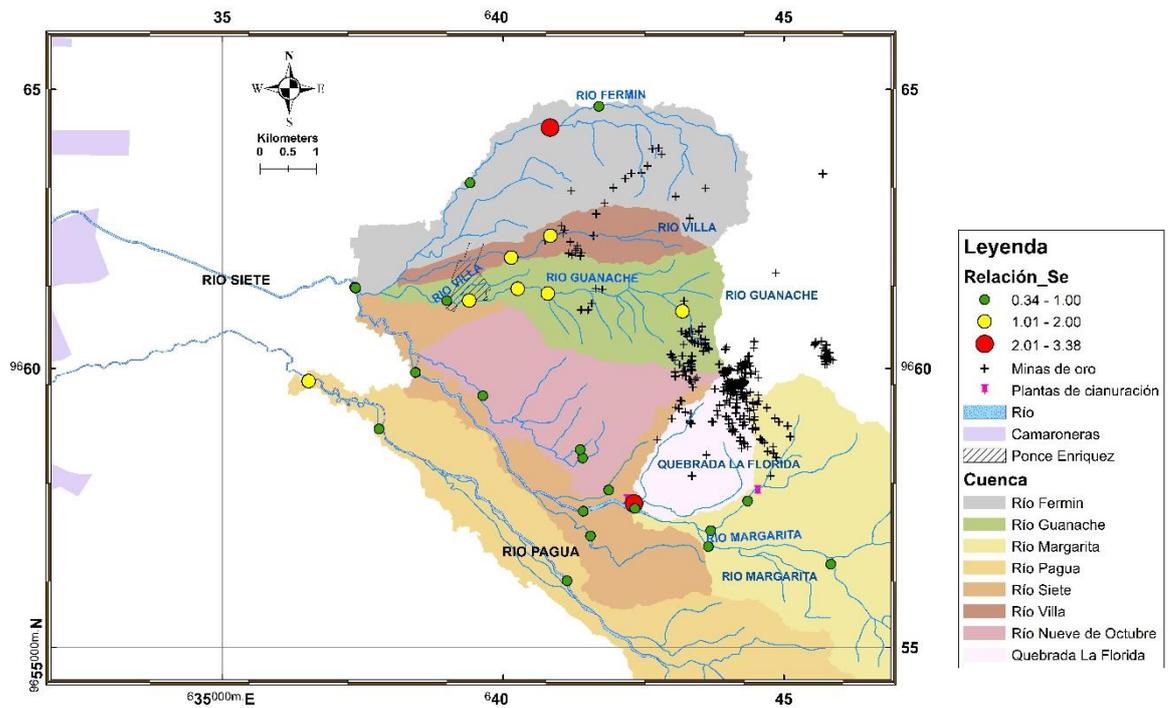


Figura 7-5.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de Ni y el límite permitido – época húmeda

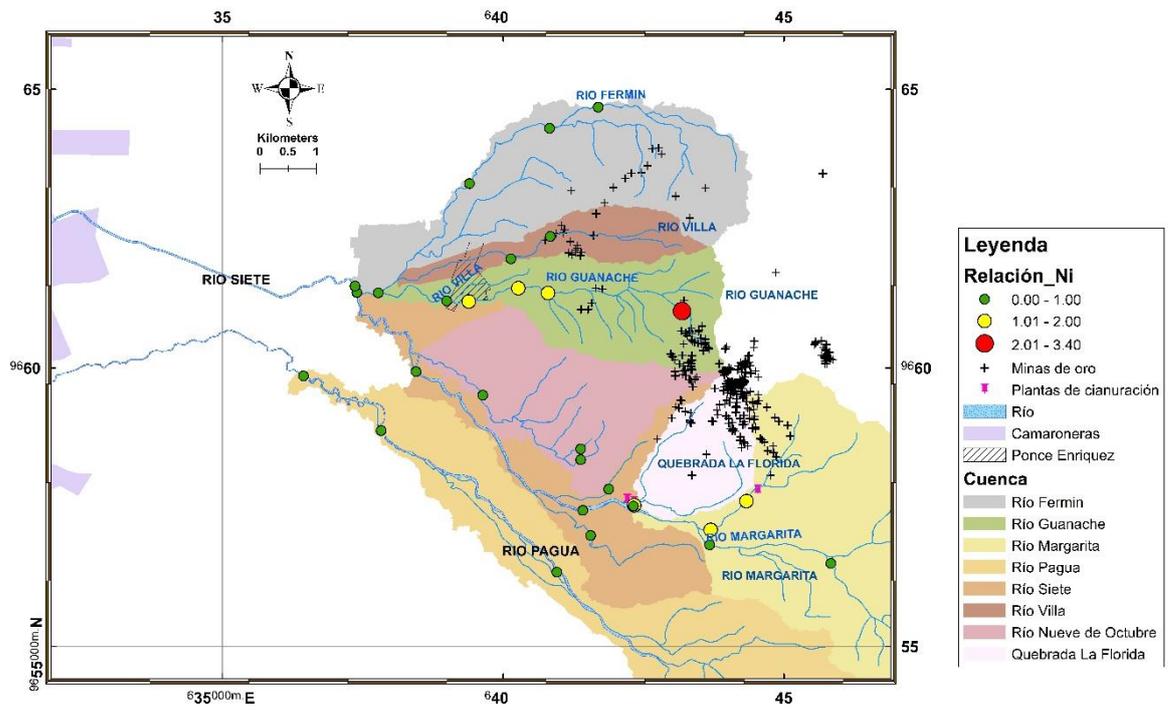


Figura 7-6.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de Ni y el límite permitido – época seca

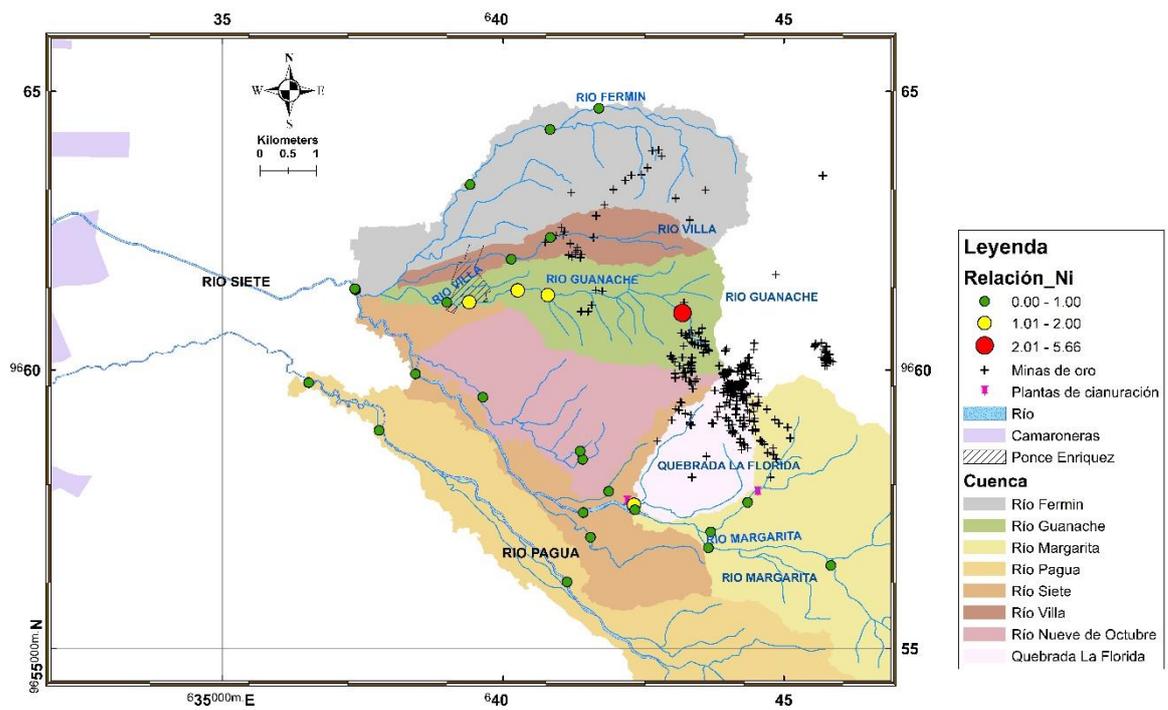


Figura 7-7.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de Mn y el límite permitido – época húmeda

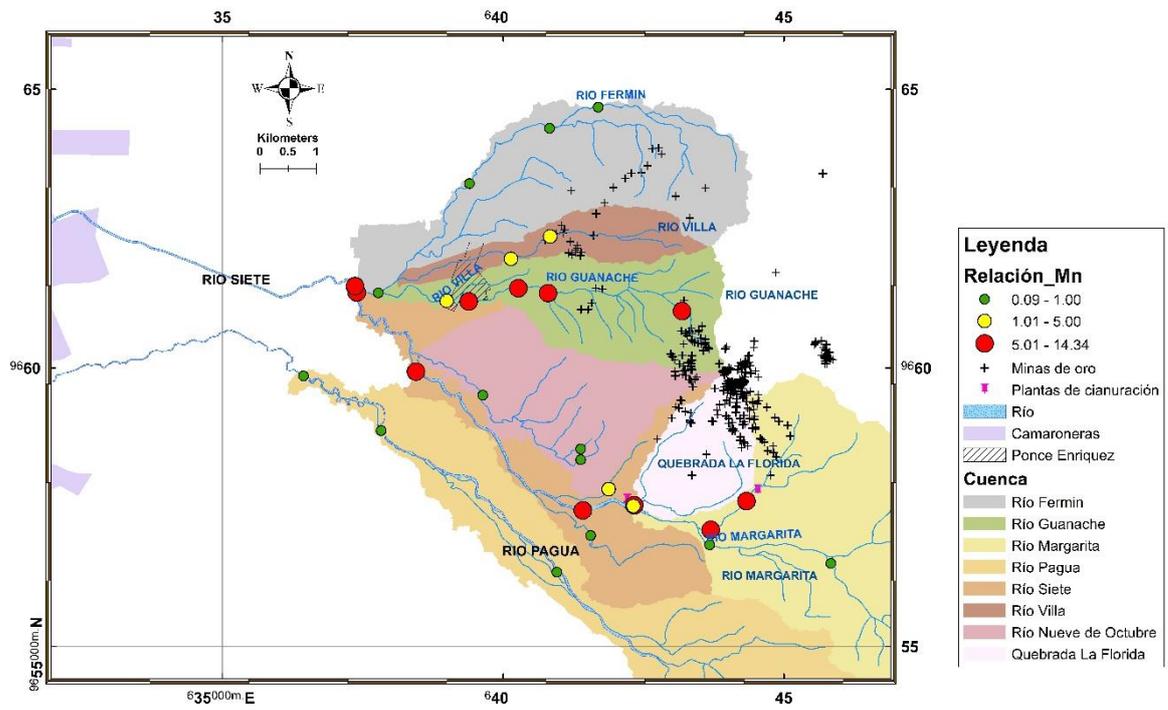


Figura 7-8.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de Mn y el límite permitido – época seca

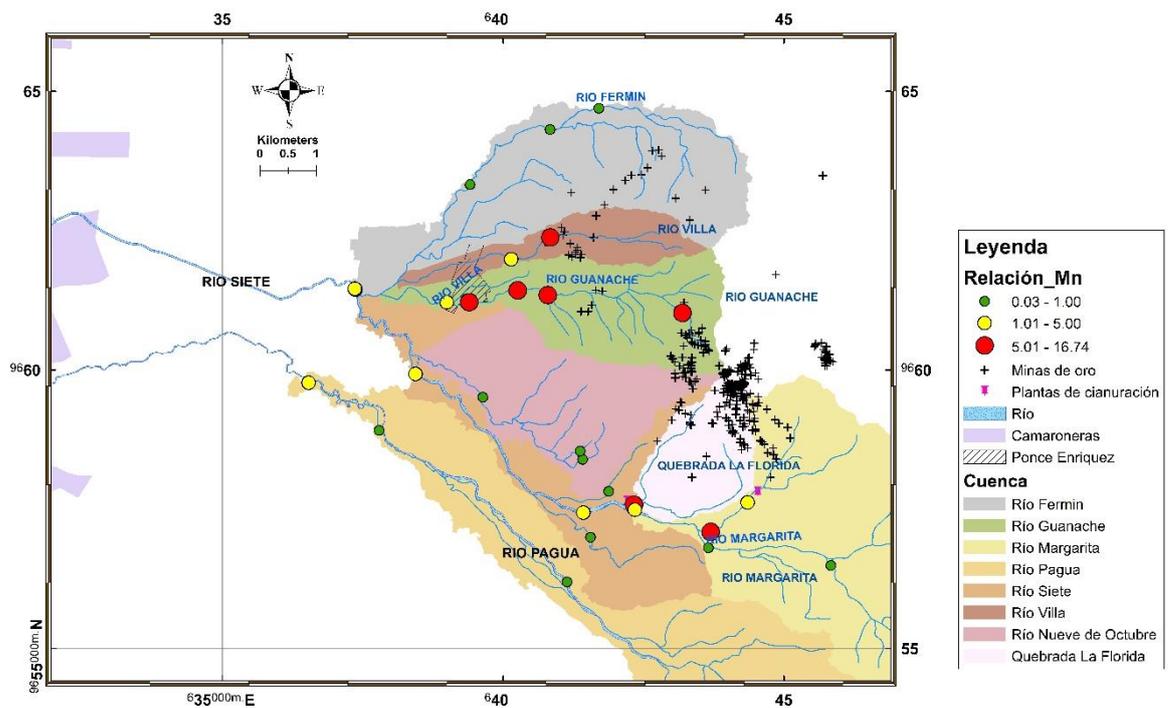


Figura 7-9.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de Fe y el límite permitido – época húmeda

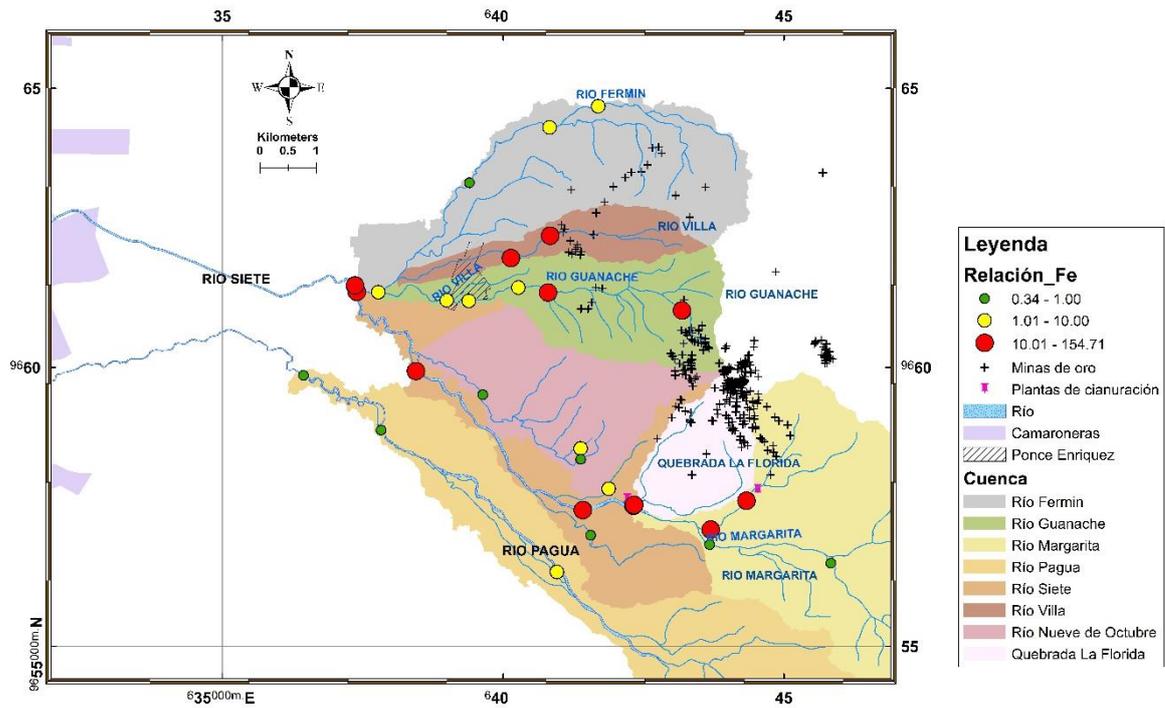


Figura 7-10.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de Fe y el límite permitido – época seca

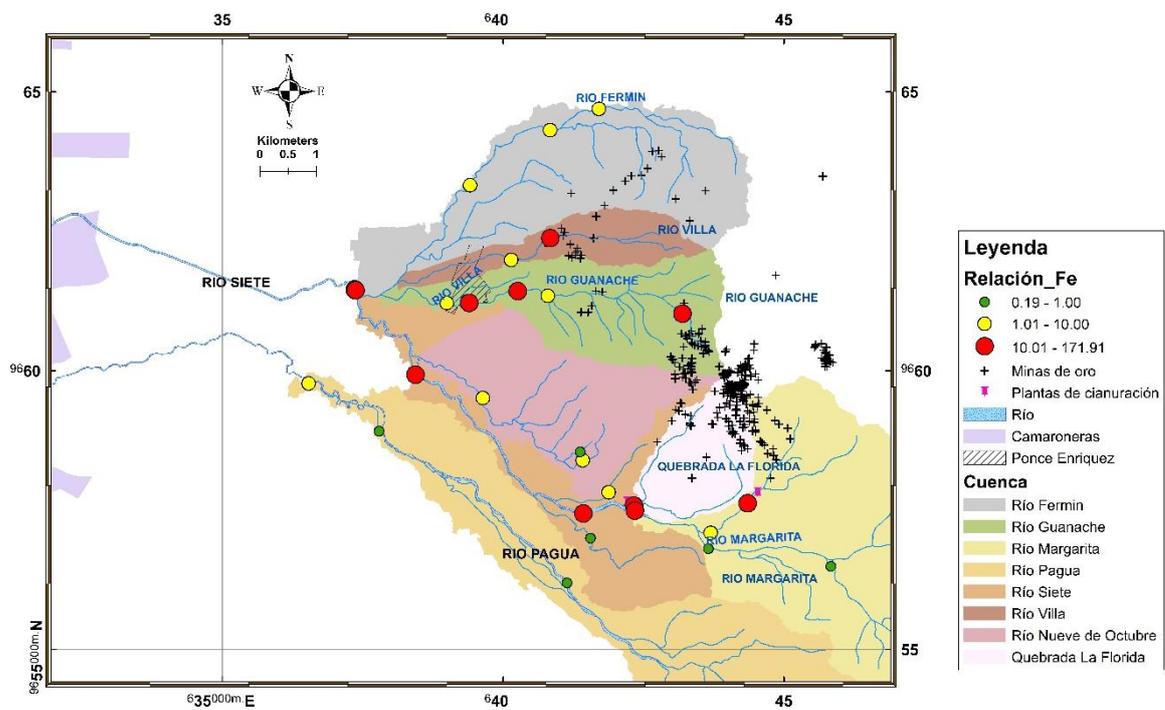


Figura 7-11.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de Cu y el límite permitido – época húmeda

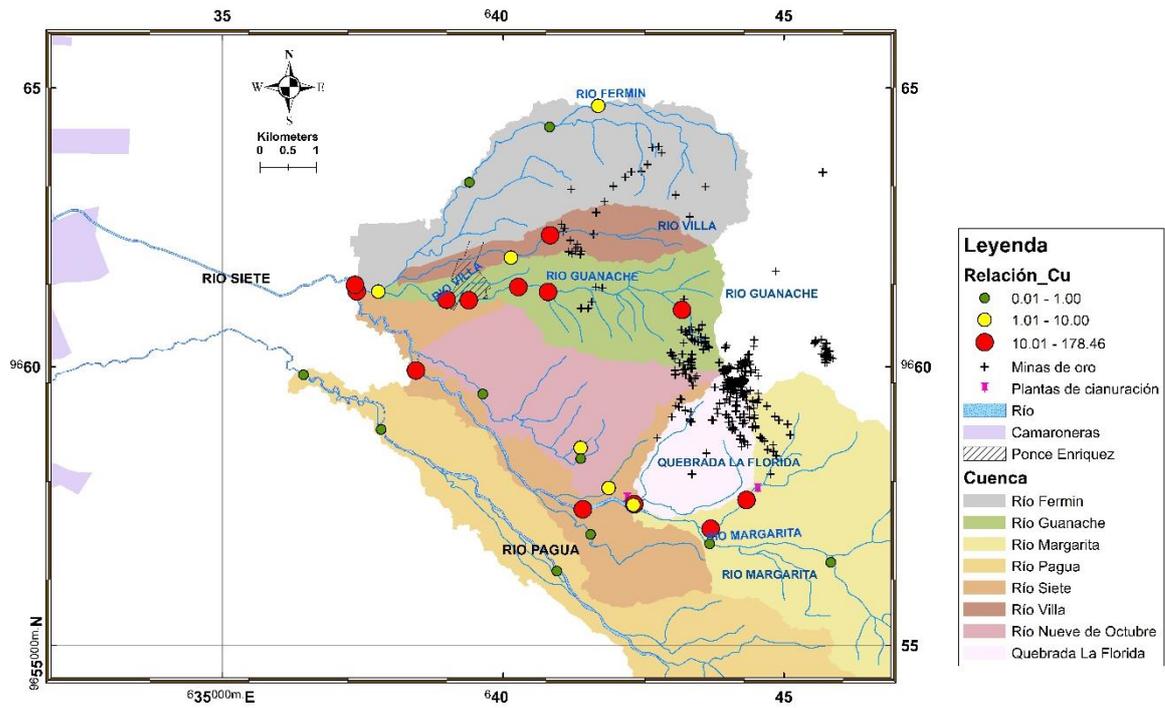


Figura 7-12.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de Cu y el límite permitido – época seca

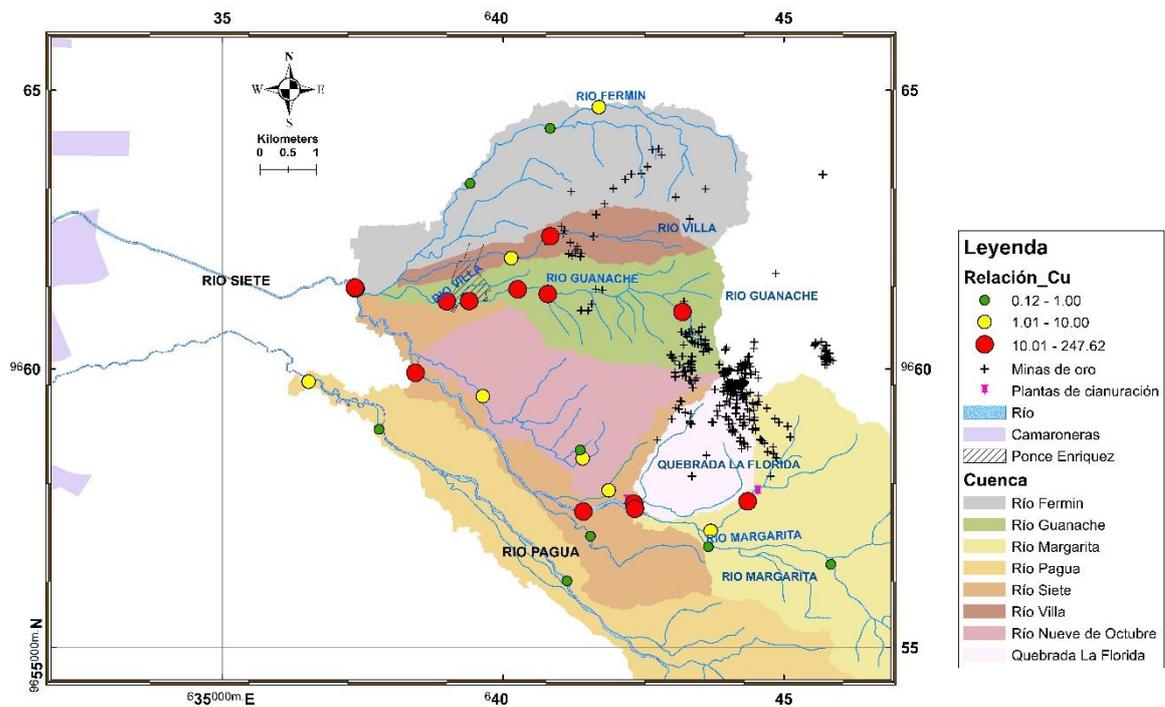


Figura 7-13.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de Cr y el límite permitido – época húmeda

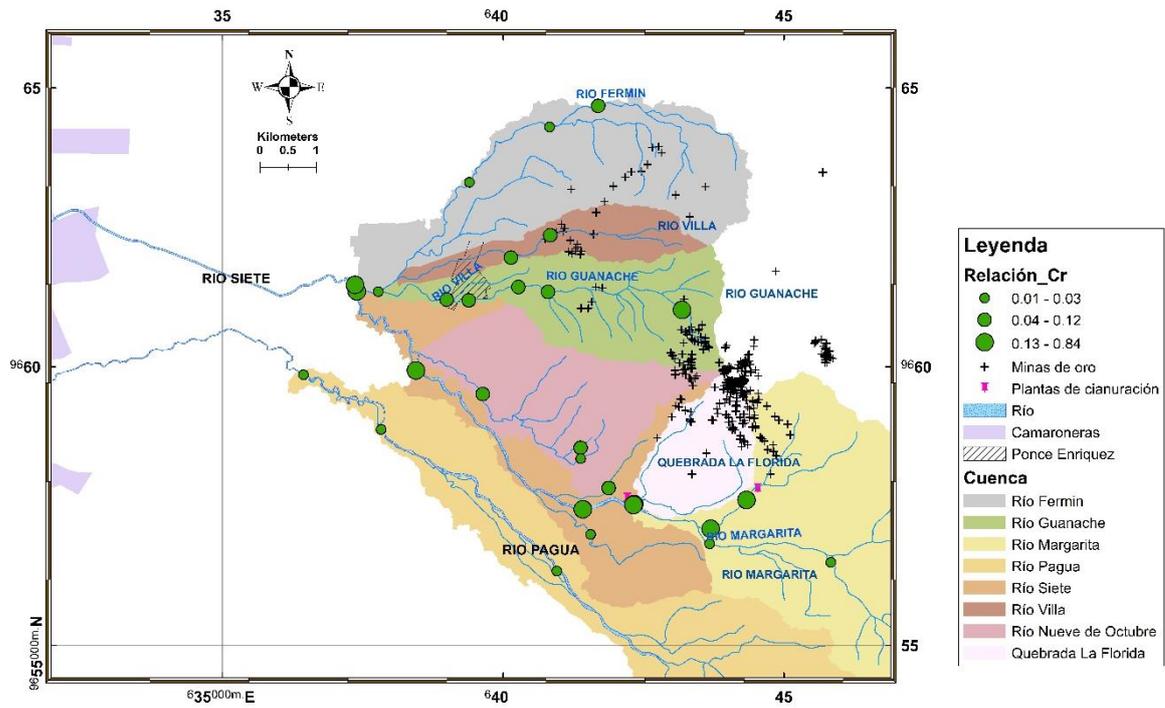


Figura 7-14.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de Cr y el límite permitido – época seca

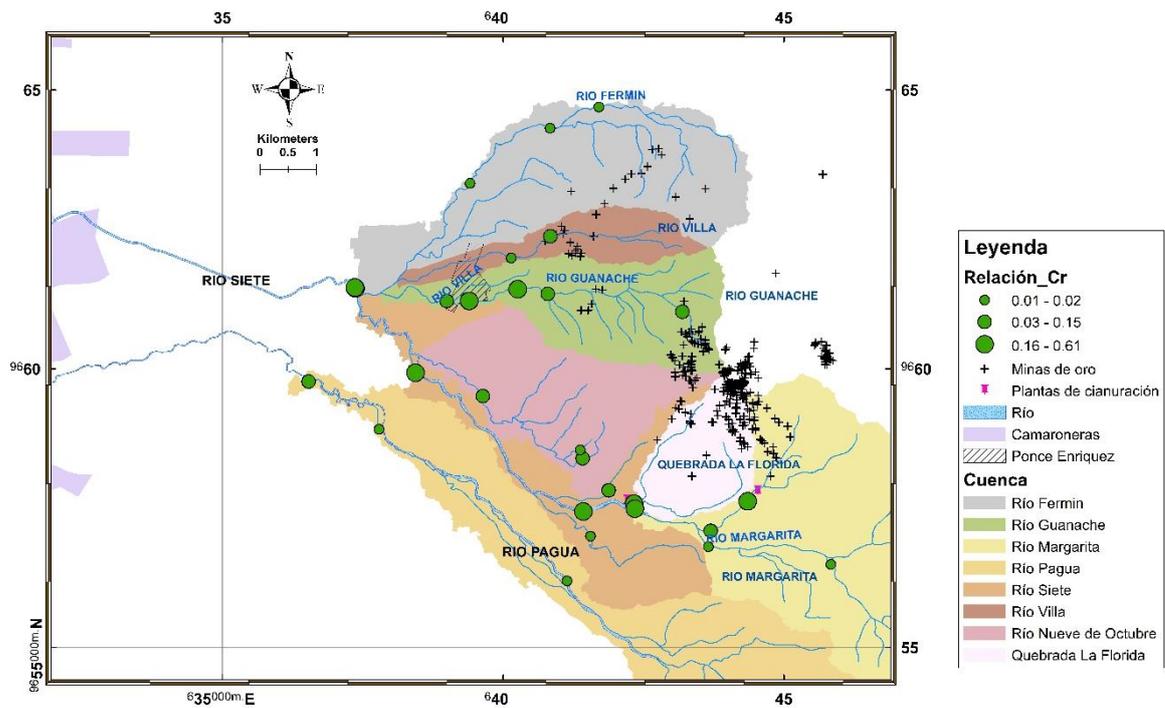


Figura 7-15.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de Cd y el límite permitido – época húmeda

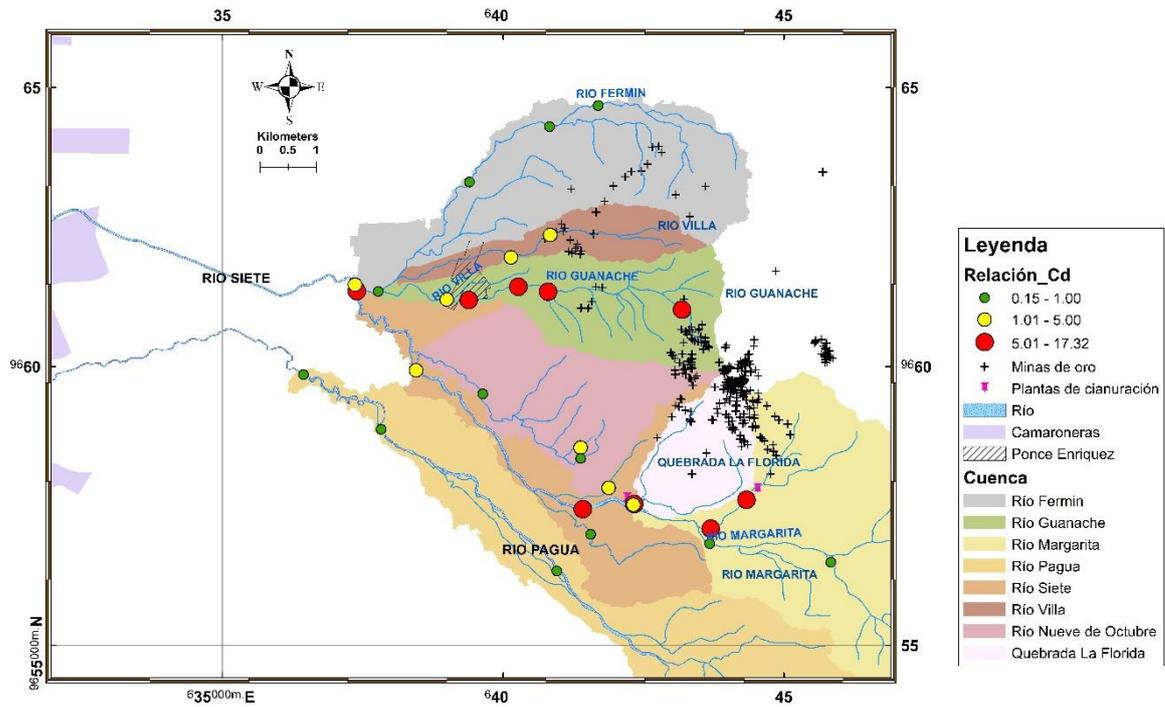


Figura 7-16.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de Cd y el límite permitido – época seca

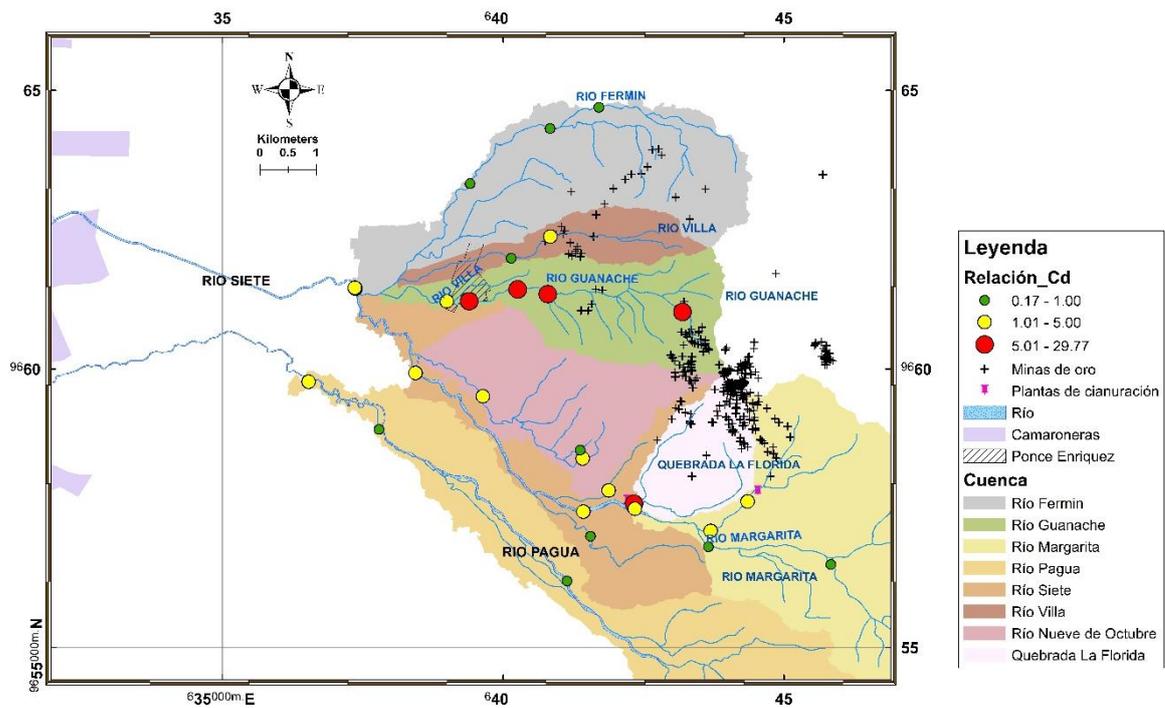


Figura 7-17.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de Al y el límite permitido – época húmeda

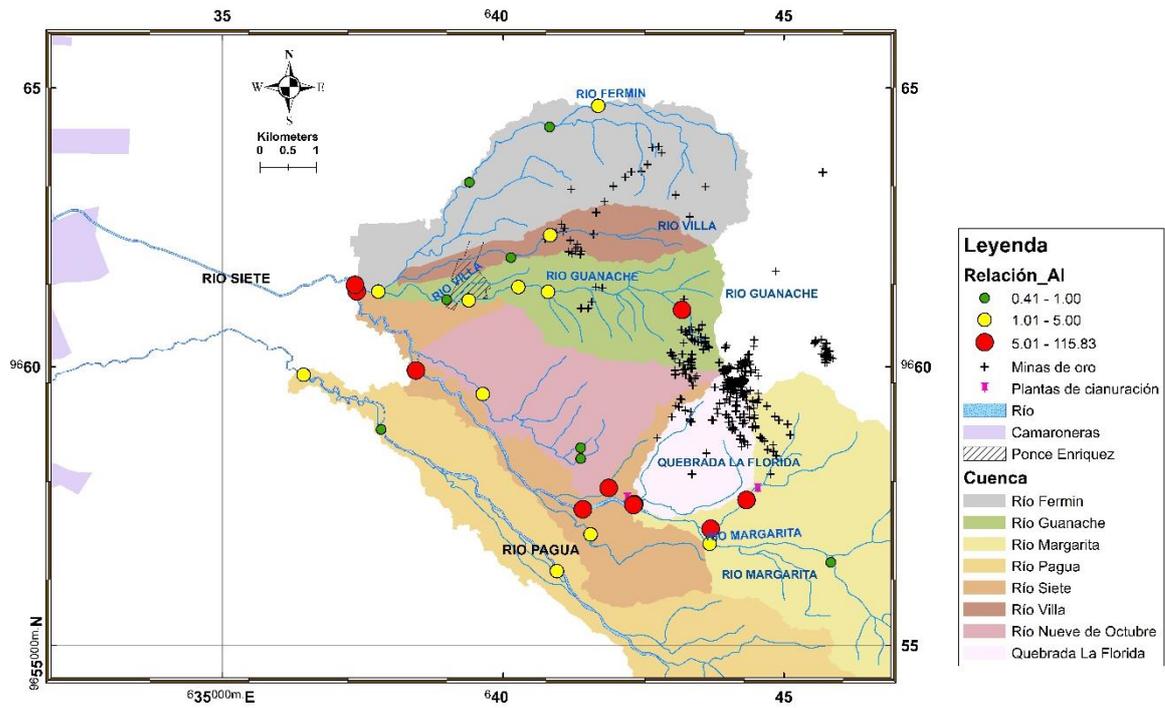


Figura 7-18.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de Al y el límite permitido – época seca

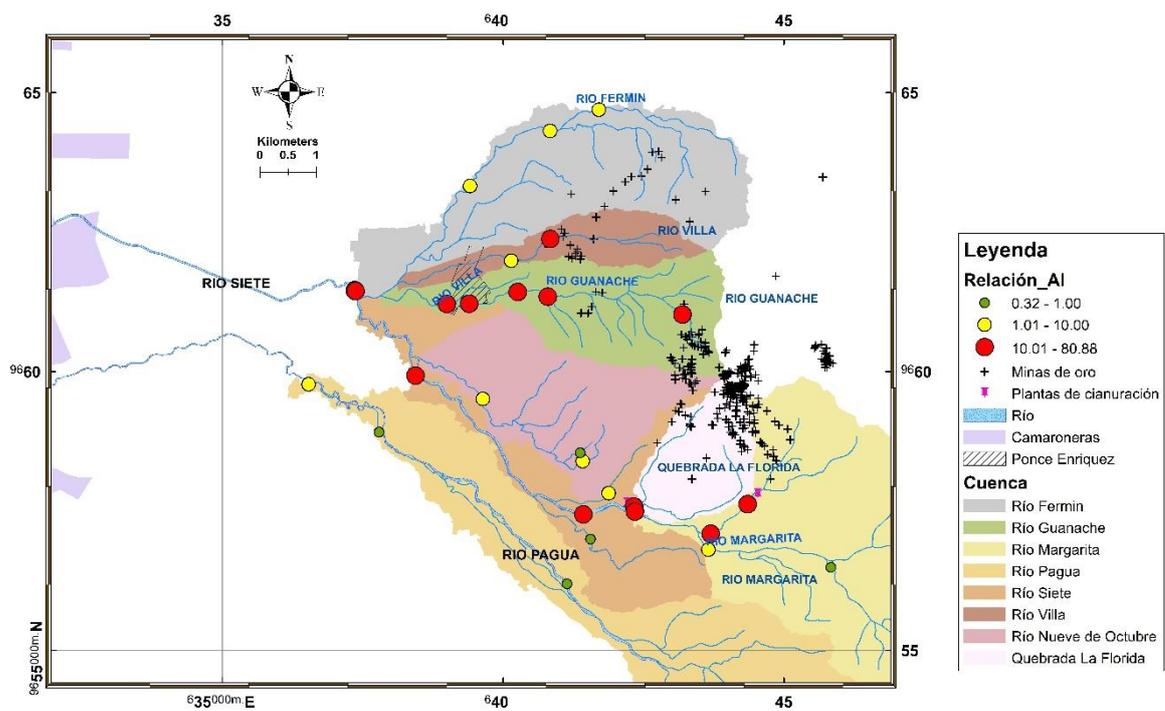


Figura 7-19.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de Pb y el límite permitido – época húmeda

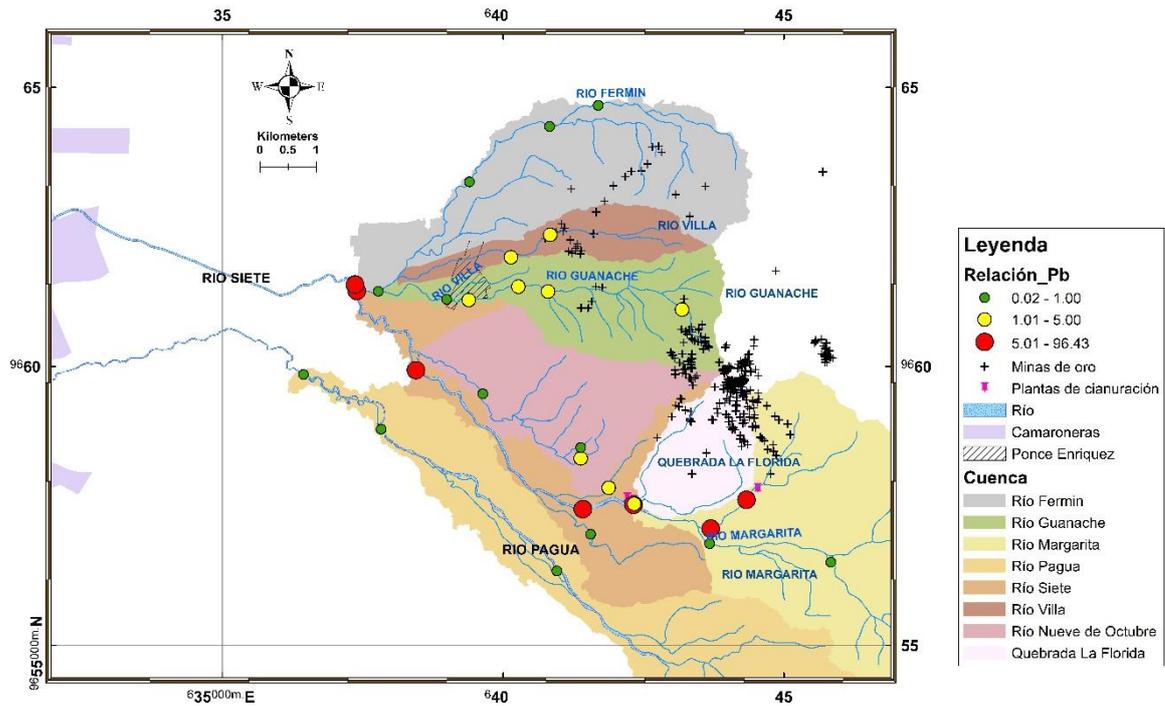


Figura 7-20.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de Pb y el límite permitido – época seca

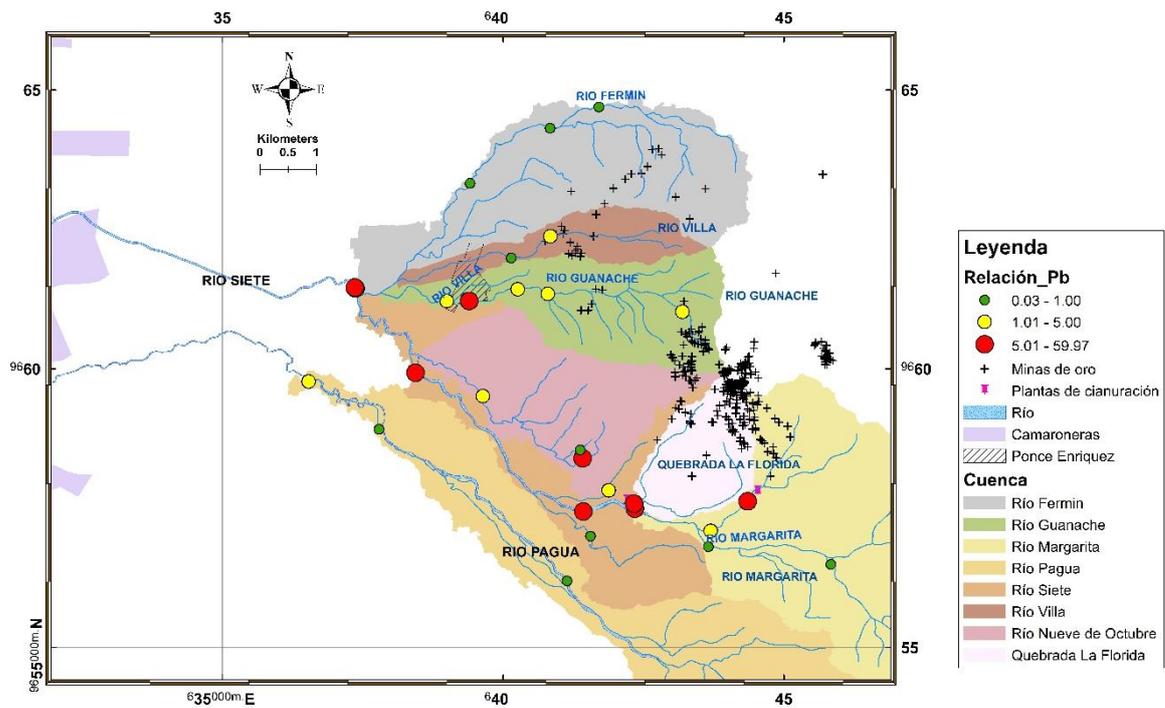


Figura 7-21.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de As y el límite permitido – época húmeda

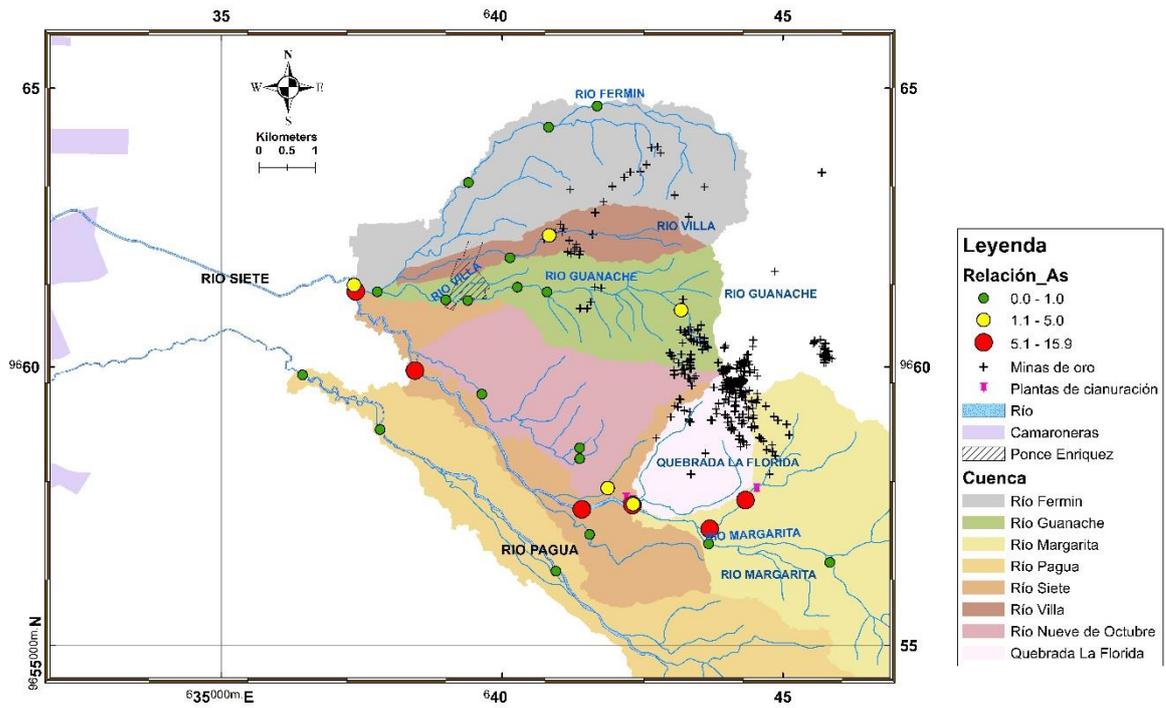


Figura 7-22.- Variación espacial de la relación entre la concentración medida de As y el límite permitido – época seca

