

Trabajo Fin de Máster
***EFFECTOS DE LA MINERÍA
AURÍFERA SOBRE LA CALIDAD DEL
AGUA Y LAS COMUNIDADES DE
MACROINVERTEBRADOS EN LOS
RÍOS DEL NORTE DE ECUADOR***

**Intensificación: ORDENACIÓN, RESTAURACIÓN Y
GESTIÓN DE CUENCAS**

Autor:

PAU RODRÍGUEZ MARTÍNEZ

Tutor:

DR. FRANCISCO MARTINEZ-CAPEL

Cotutor:

DR. JON MOLINERO ORTIZ

SEPTIEMBRE, 2018



**UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA**

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma

RESUMEN

Las comunidades humanas que habitan en la cuenca del río Cayapas del norte de la provincia de Esmeraldas (Ecuador) basan su estilo de vida en la interacción con los ríos (higiene, pesca, transporte, etc.). La conservación de la calidad del agua de los ríos que fluyen hacia el océano Pacífico se encuentra amenazada por la proliferación de explotaciones mineras no reguladas. La minería aurífera ilegal aporta beneficios económicos a un pequeño sector de la población en detrimento de la calidad ambiental y de la calidad de vida de los habitantes de la zona. En este trabajo se estudió la calidad del agua en 17 puntos de muestreo repartidos en 8 cuencas hidrográficas, diferenciando un conjunto de puntos donde hay constancia de actividad minera y otros donde no la hay. La medición de variables físico-químicas, la presencia de metales pesados y el estudio de las comunidades de macroinvertebrados bentónicos nos permitió identificar cuáles son los parámetros más sensibles a las actividades mineras que se llevan a cabo. Además, se determinaron cuáles son los puntos o cuencas más perjudicadas, de modo que este trabajo sirva como base para la toma de decisiones y para priorizar las actuaciones que las administraciones consideren oportunas para recuperar el estado de calidad de las aguas. Este trabajo se considera esencial para la conservación de la biodiversidad en un entorno tropical de alta riqueza, así como para contribuir a la sostenibilidad de la actividad minera en una región remota y subdesarrollada de Ecuador, donde las dificultades de acceso a las zonas de muestreo, la toma de datos y la obtención de información oficial marcaron todo el proyecto.

PALABRAS CLAVE

Biodiversidad; minería aurífera; macroinvertebrados; calidad del agua; BMWP

RESUM

Les comunitats humanes que habiten la conca del riu Cayapas al nord de la província d'Esmeraldas (Equador) basen el seu estil de vida en la interacció amb els rius (higiene, pesca, transport, etc.). La conservació de la qualitat de l'aigua dels rius que discorren cap a l'oceà Pacífic es troben amenaçades per la proliferació d'explotacions mineres no regulades. La mineria aurífera il·legal aporta beneficis econòmics a una xicoteta part de la població en detriment de la qualitat ambiental i la qualitat de vida de les persones que habiten la zona. En aquest treball es va estudiar la qualitat de l'aigua en 17 punts de mostreig repartits en 8 conques hidrogràfiques, diferenciant un conjunt de punts on hi ha constància d'activitat minera i altres on no n'hi ha. La mesura de les variables fisicoquímiques, la presència de metalls pesants i l'estudi de les comunitats de macroinvertebrats bentònics ens va permetre identificar quins són els paràmetres més sensibles a les activitats mineres que s'hi produeixen. A més, es van determinar quins són els punts o conques més perjudicades, de manera que aquest treball servisca com a ferramenta en la presa de decisions i a l'hora de prioritzar les actuacions que les administracions consideren adients per recuperar l'estat de qualitat de les aigües. Aquest treball es considera essencial per a la conservació de la biodiversitat en un entorn tropical d'alta riquesa, així com per a contribuir a la sostenibilitat de l'activitat minera en una regió remota i subdesenvolupada de l'Equador, on les dificultats d'accés a les zones de mostreig, la presa de dades i l'obtenció d'informació van marcar tot el projecte.

PARAULES CLAU

Biodiversitat; mineria aurífera; macroinvertebrats; qualitat de l'aigua; BMWP

ABSTRACT

Human communities that live in the Cayapas' river basin, north of Esmeraldas province (Ecuador) have a lifestyle based on the interaction with rivers (hygiene, fishing, shipping, etc.). The conservation of water quality in the river is threatened by the emergence of non-regulated mining. Illegal gold mining brings economic benefits to a small percentage of population, while the rest suffers a loss of environmental quality and, therefore, a loss of life quality. This work studied the water quality in 17 sampling points located in 8 hydrographic basins, making a distinction between those samplings with evidences of gold mining from those without them. The measurements of physico-chemical variables, metals concentration and macroinvertebrate communities composition, allowed us to identify those parameters which are more affected by the mining activity in the zone. Moreover, the points and basins adversely affected by mining were identified, which can help the public administration to make decisions when restoration of water quality and environmental actions can start. This work is essential for biodiversity conservation in a highly rich tropical area, as well as to contribute to the sustainable development of mining activities in a remote and underdeveloped region of Ecuador, where the entire work was defined by difficulties to access to sampling points, data collection difficulties and problems to obtain official data.

KEYWORDS

Biodiversity, gold mining; macroinvertebrates; water quality; BMWP

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría dar las gracias a todas las personas que de un modo u otro han hecho posible que este trabajo saliera adelante. En primer lugar, me gustaría reconocer la gran ayuda que me han brindado Paco y Jon como tutores para encarar correctamente este trabajo. También el trabajo realizado en campo por Jon, Eduardo, Pedro, Jesús y Arcadi, con los que descubrí los rincones más recónditos del norte de Esmeraldas. A las nuevas amistades que me acompañaron durante mi estadía en la PUCESE y con las que disfruté y aprendí mucho tanto en este como en otros proyectos. Al resto de amigas y amigos de fuera de la universidad, por mostrarme la mejor cara de Esmeraldas y de Ecuador. A mi familia y amigos por su apoyo incondicional durante toda esta experiencia. A María, Anna, Txeto y Craig por sus consejos, ayudas y mejoras en el trabajo. Y de manera especial, a Arcadi, que podría ser nombrado en cada apartado anterior, ya que ha sido un gran apoyo antes, durante y después de esta aventura. Gracias, gràcies.

Por último, agradecer al Centro de Cooperación al Desarrollo (CCD) de la UPV por concederme una de las becas de cooperación del programa MERIDIES, ya que ha hecho posible que empezara esta magnífica y recomendable experiencia y que saliera adelante este proyecto.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
1.1.	<i>OBJETIVOS</i>	3
2.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	5
2.1.	<i>ÁREA DE ESTUDIO</i>	5
2.2.	<i>USOS DEL SUELO</i>	9
2.3.	<i>PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS</i>	10
2.4.	<i>CONCENTRACIÓN DE METALES</i>	12
2.5.	<i>MUESTREO DE MACROINVERTEBRADOS</i>	13
2.6.	<i>ANÁLISIS DE COMPARATIVA TEMPORAL</i>	15
2.7.	<i>ANÁLISIS DE COMPARATIVA ESPACIAL</i>	16
2.8.	<i>ANÁLISIS MULTIVARIANTE DE VARIABLES DE HABITAT Y BIOLÓGICAS</i>	18
2.8.1.	Pretratamiento de datos.....	18
2.8.2.	Análisis multivariante de correspondencias.....	19
3.	RESULTADOS.....	20
3.1.	<i>USOS DEL SUELO</i>	20
3.2.	<i>PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS</i>	21
3.3.	<i>CONCENTRACIÓN DE METALES</i>	23
3.4.	<i>MUESTREO DE MACROINVERTEBRADOS</i>	27
3.5.	<i>ANÁLISIS DE COMPARATIVA TEMPORAL</i>	31
3.5.1.	Parámetros físico-químicos.....	31
3.5.2.	Concentración de metales.....	33
3.5.3.	Macroinvertebrados.....	34
3.6.	<i>ANÁLISIS DE COMPARATIVA ESPACIAL</i>	36
3.6.1.	Parámetros físico-químicos.....	36
3.6.2.	Concentración de metales.....	37
3.6.3.	Macroinvertebrados.....	39
3.7.	<i>ANÁLISIS MULTIVARIANTE ENTRE VARIABLES DE HABITAT Y BIOLÓGICAS</i>	41
4.	DISCUSIÓN.....	49
4.1.	<i>ANÁLISIS DE COMPARATIVA TEMPORAL</i>	51
4.2.	<i>ANÁLISIS DE COMPARATIVA ESPACIAL</i>	52
4.3.	<i>ANÁLISIS MULTIVARIANTE ENTRE VARIABLES DE HABITAT Y BIOLÓGICAS</i>	54
5.	CONCLUSIONES.....	56
6.	PRÓXIMOS PASOS EN LA INVESTIGACIÓN.....	58
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Iconos de promoción de los Objetivos de Desarrollo Sostenible relativos a la calidad de las aguas. Fuente: Naciones Unidas.	2
Figura 2. Imagen aérea de uno de los tramos del río Tululví, donde se observan las minas que han quedado al descubierto y sin ningún tipo de restauración. Fuente: ESRI Satellite.....	3
Figura 3. Plano de situación de las cuencas objeto de estudio, con los nombres de los ríos.	5
Figura 4. Climodiagrama de la zona de estudio. Fuente: Morales et al., 2013.	6
Figura 5. Distribución de los puntos de muestreo en las cuencas objeto de estudio. En verde y de mayor tamaño aparecen los puntos utilizados de control, y de color azul el resto de puntos de muestreo.....	7
Figura 6. Fotografías de la campaña de 2017 en las que se muestran algunos obstáculos a superar para llegar a algunos puntos de muestreo.	8
Figura 7. Fotografías tomadas durante la campaña de 2017 donde se puede observar maquinaria minera, bidones abandonados, y en la imagen inferior derecha el paisaje que deja la actividad minera a su paso.	9
Figura 8. Medición de parámetros en campo con el equipo Milwaukee MW801.....	11
Figura 9. Toma de muestras de agua para realizar posteriormente las mediciones de turbidez y STD. De estas botellas se tomaron las alícuotas de donde se determinaron las concentraciones de metales.	11
Figura 10. Estero Durango en el punto P14, en el momento del muestreo con una turbidez muy elevada (09/10/17).....	11
Figura 11. Trabajo de laboratorio. Preparación de las muestras de agua para enviar a analizar a la UPV-EHU.....	13
Figura 12. Muestra de agua del punto P14 antes y después del filtrado.	13
Figura 13. Utilización de la red de patada (kick net) para realizar el muestreo de macroinvertebrados bentónicos.....	14
Figura 14. Limpieza del material recolectado, fijado con alcohol y etiquetado para posterior identificación en el laboratorio.	14
Figura 15. Equipo de identificación en el laboratorio: guía, ordenador, lupa electrónica para tomar fotografías y lámpara.	15
Figura 16. Imagen aérea de una de las cuencas de estudio, en la que se aprecian dos tipos de imagen diferente. En la imagen central, con menor resolución, no se llegan a apreciar bien los frentes mineros. En las imágenes laterales aparecen áreas	

irregulares amarillas que se corresponden con los frentes mineros cartografiados “a mano”. Fuente: ESRI Satellite.	17
Figura 17. Diagrama de cajas y bigotes de los diferentes parámetros físico-químicos medidos, donde destacan los valores fuera de rango de la turbidez (TURB). El eje Y tiene escala logarítmica, y las unidades son diferentes para cada variable: Temperatura (TEMP; °C), Conductividad (COND; µS/cm), Oxígeno Disuelto (DO; mg/L), pH (-), Turbidez (TURB; Unidades de Atenuación de Formacina, FAU) y Sólidos Disueltos Totales (STD; mg/L).	23
Figura 18. Fotografías de las 7 familias más abundantes en los muestreos. Numeradas por orden de izquierda a derecha y de arriba abajo.	27
Figura 19. Abundancias de macroinvertebrados total, según su tipo de respiración principal.	31
Figura 20. Abundancias de macroinvertebrados según su tipo de respiración principal (aérea, por branquias y por tegumentos) y en función de los puntos de muestreo.	31
Figura 21. Comparación de los parámetros físico-químicos medidos en los dos periodos de muestreo. Conductividad en µS/cm; Turbidez en Unidades de Atenuación de Formacina, FAU; Temperatura en °C; Oxígeno disuelto (OD) en mg/L.	32
Figura 22. Comparación de las concentraciones de los metales con concentraciones mayores (ppm). Se presentan las concentraciones en escala logarítmica para mejorar la visibilidad de los valores más bajos.	33
Figura 23. Comparación de las concentraciones de los metales con concentraciones menores (ppb). Se presentan las concentraciones en escala logarítmica para mejorar la visibilidad de los valores más bajos.	34
Figura 24. Diagrama de cajas y bigotes de los parámetros físico-químicos medidos, y diferencia entre los de puntos de control y los de zonas mineras. Los parámetros son conductividad (COND, µS/cm) y turbidez (TURB, FAU).	37
Figura 25. Comparación de los valores de concentraciones (ppm) entre los puntos de control y los puntos con minería.	38
Figura 26. Comparación de los valores de concentraciones (ppb) entre los puntos de control y los puntos con minería.	38
Figura 27. Comparación de la abundancia de familias de macroinvertebrados entre puntos de control y puntos con minería.	39
Figura 28. Comparación de los valores del índice BMWP-Col entre puntos de control y puntos con minería.	40

Figura 29. Mapa con los valores del índice BMWP correspondientes a cada punto de muestreo y año. Los cuadrados representan los puntos de 2016 y los círculos los de 2017.....	40
Figura 30. Promedio del nº de ejemplares por punto de muestreo, separados por tipo de respiración principal y diferenciando entre los puntos con minería y los puntos de control.....	41
Figura 31. Resultado del CCA realizado entre las variables abióticas y los diferentes índices biológicos, donde aparecen con puntos azules el índice BMWP-Col (BMWP), el índice EPT% (EPT), el índice OCHD% (OCHD) y la abundancia de familias en cada punto (Abundancia Familias). Los vectores representan las variables abióticas (met1, met2, met3, Zn, 1fq, 2fq, TURB, usos1 y usos2; todas definidas en el inicio de este apartado), en negro los puntos de muestreo con minería, y en verde los puntos de muestreo de control.....	43
Figura 32. Resultado del CCA realizado entre las variables abióticas y los tipos de respiración principal. En azul los puntos representantes de las variables bióticas (Aérea, Branquias y Tegumentos), con los vectores las variables abióticas (met1, met2, met3, Zn, 1fq, 2fq, TURB, usos1 y usos2; todas definidas en el inicio de este apartado), en negro los puntos de muestreo con minería, y en verde los puntos de muestreo de control.....	44
Figura 33. Resultado del DCA que relaciona las variables abióticas con los índices biológicos (BMWP-Col, EPT%, OCHD%, Abundancia de Familias). En azul el conjunto de variables bióticas y abióticas (todas definidas en el inicio de este apartado), en negro los puntos de muestreo con minería y en verde los puntos de control.	45
Figura 34. Posición de los puntos de muestreo respecto al eje 1 de DCA hecho con los índices biológicos, diferenciando entre puntos de control y mineros.....	45
Figura 35. Resultado del DCA entre las variables abióticas y los diferentes tipos de respiración (Aérea, Branquias y Tegumentos). En azul el conjunto de variables bióticas y abióticas, en negro los puntos de muestreo con minería y en verde los puntos de control.....	46
Figura 36. Posición de los puntos de muestreo respecto al eje 1 del DCA hecho con los tipos de respiración, diferenciando entre puntos de control y mineros.....	47
Figura 37. Valores de correlación de cada variable con los ejes de los dos análisis de correspondencias canónicas (CCA).....	47
Figura 38. Valores de correlación de cada variable con los ejes de los dos análisis de correspondencias sin tendencia (DCA).....	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Información sobre los puntos de muestreo. Las coordenadas UTM pertenecen a la zona 17S. En el año 2016 se tomaron muestras en las 10 primeras estaciones, y en 2017 se tomaron muestras en las 17.....	7
Tabla 2 Superficie (ha) cubierta por cada tipo de uso, para las cuencas de drenaje de cada punto de muestreo.	20
Tabla 3. Resultado de las mediciones de los parámetros físico-químicos en la campaña de noviembre de 2016. Los nombres de las variables corresponden a temperatura (TEMP), conductividad (COND), concentración de oxígeno disuelto (DO), porcentaje de oxígeno disuelto (DO%), valor de pH (PH), turbidez (TURB) y sólidos totales disueltos (STD).....	21
Tabla 4. Resultado de las mediciones de los parámetros físico-químicos en la campaña de octubre de 2017. Los nombres de las variables corresponden a temperatura (TEMP), conductividad (COND), concentración de oxígeno disuelto (DO), porcentaje de oxígeno disuelto (DO%), valor de pH (PH), turbidez (TURB) y sólidos totales disueltos (STD).....	22
Tabla 5. Concentraciones de metales en los puntos de muestreo de la campaña de noviembre de 2016. Los valores con color superan los límites legales según la legislación ambiental del Ecuador para uno o más usos (ver leyenda de colores).	24
Tabla 6. Concentraciones de metales en los puntos de muestreo en la campaña de octubre de 2017. Los valores con color superan los límites legales según la legislación ambiental del Ecuador para uno o más usos (ver leyenda de colores).....	26
Tabla 7. Listado y clasificación taxonómica de todas las familias identificadas en el conjunto de muestras analizadas. En la columna de la derecha aparecen las abreviaciones que se usan en las tablas y gráficas.....	28
Tabla 8. Resultado de la aplicación del índice BMWP-Col adaptado a la zona de estudio, para los muestreos de macroinvertebrados realizados en 2016 y 2017. Debajo aparecen los colores utilizados para la clasificación BMWP, relacionados con el estado de calidad al que se refieren.	30
Tabla 9. Resultado del análisis SIMPER y que, mediante el test de distancia Bray-Curtis, nos aporta información relativa a la composición de la comunidad de macroinvertebrados, así como a las variaciones entre los dos años de muestreo.	35

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La importancia de la conservación de los ecosistemas y hábitats radica en la importancia de la conservación de la biodiversidad que los compone. Es bien conocida la necesidad de preservar la biodiversidad y los recursos naturales del planeta. Existen una serie de *hotspots* (puntos clave) de biodiversidad que se distribuyen por todo el planeta, entre los que se incluye la zona de costa del Ecuador, conocido como “Corredor de Conservación Chocó-Manabí” (MAE, 2005). Destacan los ecosistemas de manglar que podemos encontrar en los primeros kilómetros de tierra en las desembocaduras de algunos ríos.

En la cuenca donde se desarrolla este trabajo, destaca la desembocadura del río Cayapas (NE Ecuador), donde se encuentra la Reserva Ecológica Manglares Cayapas-Mataje.

Los manglares son formaciones arbóreas compuestas por especies palustres tolerantes a la salinidad, que se inundan con agua marina de acuerdo con las mareas. Entre los beneficios que aporta este ecosistema, cabe destacar la gran biodiversidad que alberga y que se concibe como un potencial recurso ambiental y turístico, la producción de bienes económicos directos para las comunidades que en ellos habitan y la protección frente a tormentas, erosión e inundaciones que otorga a la zona costera (Gómez-Pais, 2007). La conservación de los manglares depende en gran medida de la calidad de las aguas de las cuencas drenantes que van a parar a ellos, y por tanto las alteraciones que se producen en la cuenca tienen su repercusión sobre la biodiversidad del ecosistema de bosque tropical y del propio manglar.

Tanto es así, que en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para cumplimiento antes de 2030, aparecen los objetivos 6 (Agua Limpia y Saneamiento) y 14 (Vida Submarina, Figura 1), que persiguen también los objetivos relativos al buen estado de las masas de agua (UN, 2015) y que se abordan también en este trabajo.



Figura 1. Iconos de promoción de los Objetivos de Desarrollo Sostenible relativos a la calidad de las aguas. Fuente: Naciones Unidas.

A pesar de su importancia, no hay muchos estudios relativos al estado de conservación de las cuencas vertientes, por motivos como la lejanía a zonas urbanas y el difícil acceso (mal estado de caminos rodados y en ocasiones acceso único por vía fluvial), pero principalmente problemas de seguridad. Se trata de una zona fronteriza con el sur de Colombia, que además cuenta con numerosas minas de oro ilegales a cielo abierto. Los trabajos de minería se llevan a cabo cerca de cauces fluviales o dentro de los mismos, con maquinaria pesada que es decomisada y destruida por las fuerzas de seguridad cuando son descubiertas (Correa *et al.*, 2015).

El procedimiento habitual de trabajo en este tipo de minas consiste en deforestar una zona aledaña al río, excavar para extraer la tierra rica en oro y lavar todo el material con agua del propio río para separar las piezas de oro. Una vez deja de ser rentable, se avanza a otra parcela y se repite el procedimiento. Este modo de actuación sin control alguno por la administración provoca la contaminación de los ríos por material particulado en suspensión y deja un paisaje sin restaurar, de zonas deforestadas y piscinas abandonadas (PUCESE, 2012; Figura 2).

En las zonas de minería aurífera es habitual encontrar altas concentraciones de mercurio o cianuro, que normalmente se utilizan para separar el oro del resto de partículas a las que está agregado en la naturaleza. Además, el oro siempre va acompañado de otros elementos traza que durante el proceso de extracción pueden liberarse al ambiente. Por lo tanto es evidente el perjuicio a los habitantes de la zona, que ven contaminada el agua en la que se bañan, lavan y pescan.

Una dificultad peculiar de este trabajo es que, al tratarse de una zona militarizada, la disponibilidad de información cartográfica se ve muy restringida, y no hay datos

disponibles de las estaciones meteorológicas e hidrológicas que existen en la zona, por lo que no se pudieron utilizar datos hidrológicos para este estudio.



Figura 2. Imagen aérea de uno de los tramos del río Tululví, donde se observan las minas que han quedado al descubierto y sin ningún tipo de restauración. Fuente: *ESRI Satellite*.

Bajo estas limitaciones técnicas se desarrolla este Trabajo de Fin de Máster, en colaboración con la Escuela de Gestión Ambiental de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador - Sede Esmeraldas (PUCESE), y que ha tenido el apoyo económico del Centro de Cooperación al Desarrollo de la UPV, mediante una beca del programa MERIDIES.

1.1. OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo ha sido caracterizar las aguas de la cuenca del río Cayapas mediante parámetros físico-químicos y biológicos, con el deseo de servir como apoyo para la administración a la hora de priorizar futuras actuaciones dirigidas a conservar la biodiversidad de dicho ecosistema tropical.

Los objetivos específicos que persigue este trabajo son (1) caracterizar el estado de la calidad de las aguas y los parámetros que reflejan mayor alteración; (2) comparar

temporalmente los parámetros físico-químicos y biológicos en el marco temporal de información disponible; (3) comparar espacialmente los parámetros físico-químicos y biológicos, dirigidos a la identificación de los puntos más afectados por la actividad minera; y (4) relacionar las variables fundamentales físico-químicas y de usos del suelo con las diferencias observadas en la comunidad de macroinvertebrados, como posible respuesta a la alteración humana.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. ÁREA DE ESTUDIO

El área objeto de estudio se encuentra en la zona de la costa de Ecuador, en el norte de la provincia de Esmeraldas (entre las coordenadas 10134740 N, 10089112 S, 773513 E y 725861 O, WGS84 - UTM zona 17S, Figura 3). La superficie del conjunto de 8 subcuencas trabajadas es de 1121,9 km², y todas ellas son afluentes del río Cayapas. Este río descarga sus aguas en el océano Pacífico a través de la reserva ecológica Manglares Cayapas - Mataje.

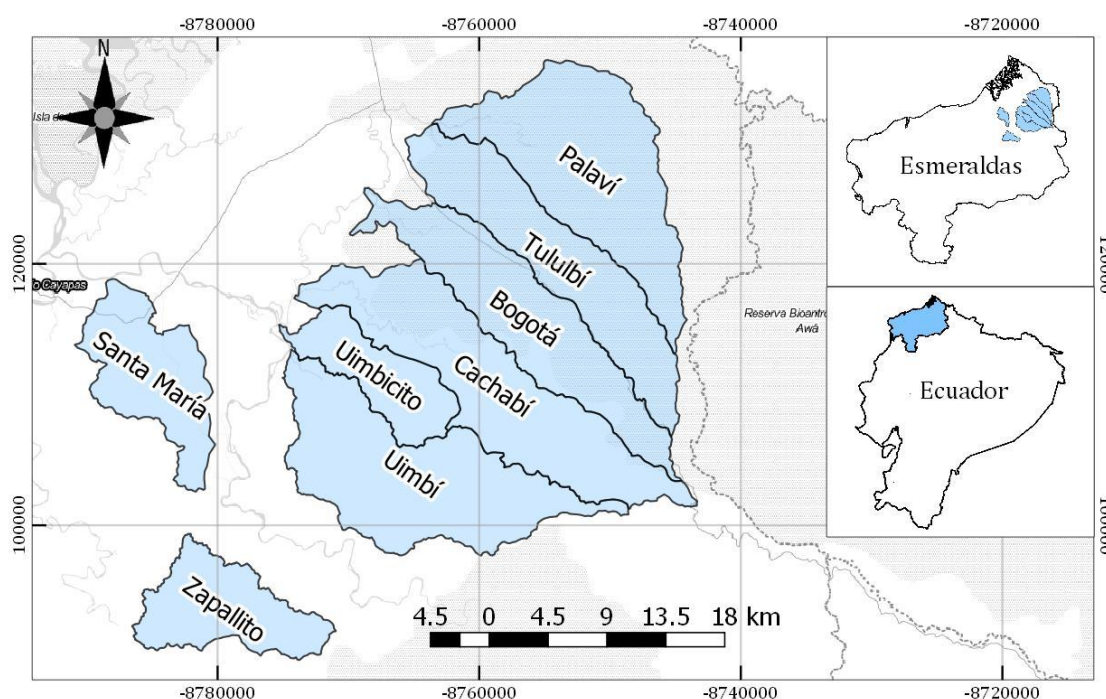


Figura 3. Plano de situación de las cuencas objeto de estudio, con los nombres de los ríos.

La zona de estudio corresponde a la clasificación del ecosistema de bosque siempreverde de tierras bajas del Chocó Ecuatorial. Presenta una precipitación anual media de 5000 mm, acumulada principalmente en la estación húmeda (diciembre - junio) y quedando mayormente libre de lluvias la estación seca (julio - noviembre), y con una temperatura media de alrededor de 26°C (Figura 4). La estructura de la vegetación presenta un dosel generalmente cerrado de hasta 30m de altura y especies emergentes como *Humiriastrum procerum* y *Virola dixonii* que pueden llegar a 40m. En el sotobosque predominan las familias Rubiaceae,

Melastomataceae y Arecaceae (Morales *et al.*, 2013). Referente a la geología de la zona, se compone de arcillas marinas y sedimentos aluviales en las zonas cercanas a los ríos, y en el resto del territorio se distinguen arenas, conglomerados y arcillas, así como areniscas tobáceas (DINAGE, 2001).

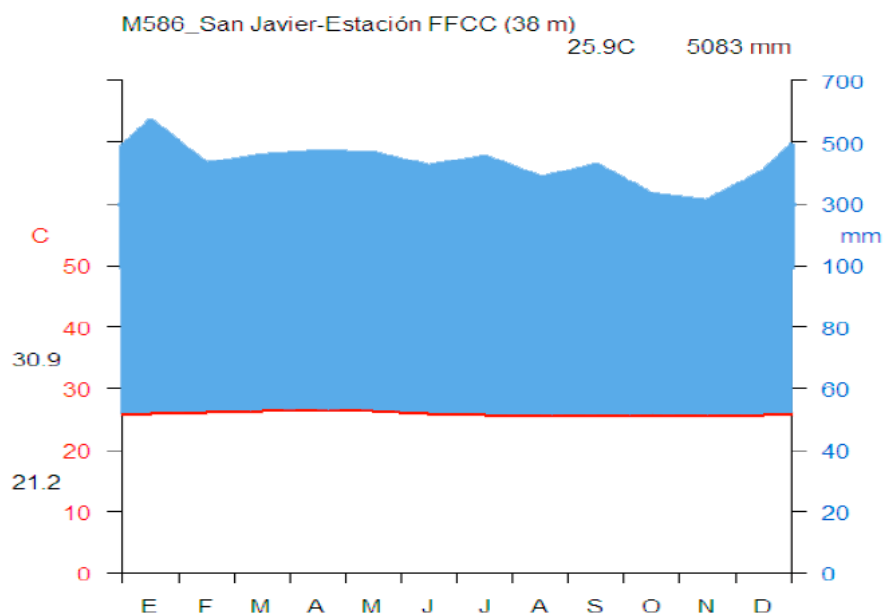


Figura 4. Climodiagrama de la zona de estudio. Fuente: Morales *et al.*, 2013.

Se eligieron un total de 17 puntos de muestreo, 10 de los cuales fueron visitados en 2016 y 2017, y los 7 restantes fueron muestreados sólo en 2017. De esos puntos, únicamente hay 4 en los que se constata que nunca ha habido actividad minera, y son la estación del río Palaví (P1), el estero El Parto (P9), el estero Comba (P12) y el estero San José (P13); estos fueron los que tomamos de control para el análisis espacial. La selección de la ubicación de los puntos de muestreo estuvo condicionada en gran medida por la facilidad de acceso con vehículo rodado a los mismos, así como por la seguridad de trabajo de la que contaba el equipo investigador.

Los trabajos de campo de 2016 se realizaron entre el 10 y el 13 de noviembre, y los de 2017 entre el 9 y el 12 de octubre. Las labores de muestreo del 2017 fueron llevadas a cabo por el autor de este trabajo junto con el equipo de la Escuela de Gestión Ambiental de la PUCESE, mientras que los datos correspondientes al año 2016 fueron facilitados por la misma Escuela de Gestión Ambiental. En la Tabla 1 aparece representada información relativa a cada punto de muestreo, en la que se incluyen las coordenadas UTM de cada punto de muestreo, el nombre del río, la

localidad cerca de la cual se realizó el muestreo y el código por el que nos referiremos a dicho punto a lo largo de este trabajo.

Tabla 1. Información sobre los puntos de muestreo. Las coordenadas UTM pertenecen a la zona 17S. En el año 2016 se tomaron muestras en las 10 primeras estaciones, y en 2017 se tomaron muestras en las 17.

UTMX	UTMY	Tipo	Río	Estación	Punto
753160	10129867	Control	Palaví	Palaví en Ricaute	P1
753131	10129751	Minería	Tululbí	Tululbí en Ricaute	P2
754420	10120969	Minería	Bogota	Bogotá en Peña Lisa	P3
747068	10117863	Minería	Cachabí	Cachabí en San Javier	P4
748007	10105815	Minería	Uimbí	Uimbí	P5
763135	10119936	Minería	Tululbí	Tululbí en Minas Viejas	P6
748406	10111956	Minería	Uimbicito	Uimbicito en Uimbicito	P7
731186	10115311	Minería	María Bajo	San Agustín	P8
736690	10092928	Control	Estero El Parto	El Parto en Aquí me quedo	P9
736658	10092870	Minería	Zapallito	Zapallito en Aquí me quedo	P10
735535	10103031	Minería	María Alto		P11
757920	10111840	Control	Estero Comba		P12
761525	10119347	Control	Estero San Jose	San Jose en Durango	P13
759795	10118545	Minería	Estero Durango		P14
741705	10114379	Minería	Uimbicito	Uimbicito en Concepción	P15
757635	10115423	Minería	Bogotá	Bogotá en Valle de la Virgen	P16
757647	10109282	Minería	Cachabí	Cachabí en San José	P17

En la Figura 5 aparecen georreferenciados cada uno de los puntos de muestreo. La distribución espacial de las estaciones de muestreo se vió condicionada por la proximidad a poblaciones y vías de acceso.

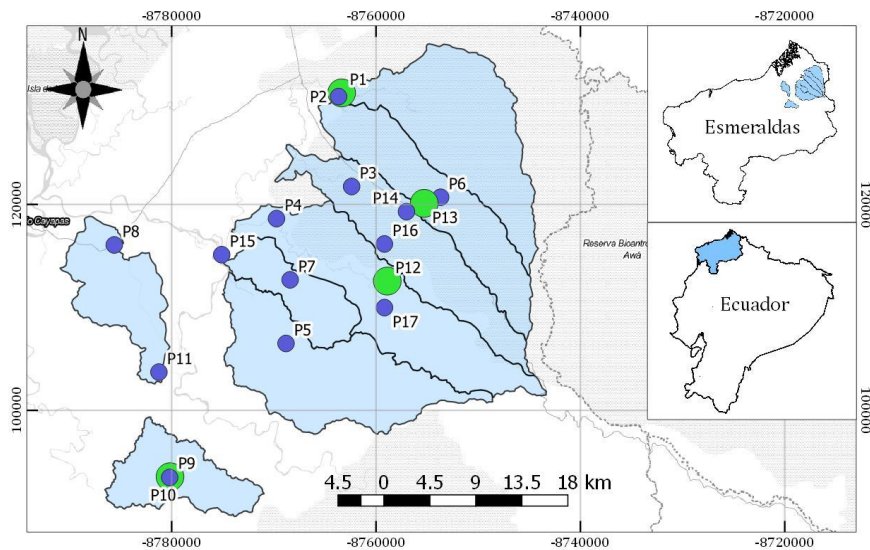


Figura 5. Distribución de los puntos de muestreo en las cuencas objeto de estudio. En verde y de mayor tamaño aparecen los puntos utilizados de control, y de color azul el resto de puntos de muestreo.

Los desplazamientos se hacían en un vehículo todoterreno facilitado por la universidad, que permitía el acceso por caminos en mal estado, ríos y badenes de poca profundidad. Los contratiempos como árboles caídos en el camino y pequeños puentes en mal estado, sumados al tiempo necesario para llegar a cada punto de muestreo marcaron el ritmo del trabajo (Figura 6).



Figura 6. Fotografías de la campaña de 2017 en las que se muestran algunos obstáculos a superar para llegar a algunos puntos de muestreo.

Durante el muestreo de 2017 pudimos encontrar maquinaria en funcionamiento, maquinaria abandonada y bidones utilizados para transporte de combustible. La última foto muestra el aspecto que presentan las piscinas que han terminado de ser explotadas.



Figura 7. Fotografías tomadas durante la campaña de 2017 donde se puede observar maquinaria minera, bidones abandonados, y en la imagen inferior derecha el paisaje que deja la actividad minera a su paso.

2.2. USOS DEL SUELO

Estas variables se analizaron para observar las posibles relaciones existentes entre la cobertura de la cuenca drenante a cada punto de muestreo y las variables biológicas y físico-químicas medidas en cada punto. Para ello se empleó la información cartográfica disponible en la web del Sistema Nacional de Información (SNI) del Ecuador. Se empleó la cartografía de Usos del Suelo de la Provincia de Esmeraldas, realizada entre 2013 y 2014 (MAG, 2016). Mediante el uso del programa QGIS® (versión 3.0.2-Girona, Open Source Geospatial Foundation Project) se delimitaron las subcuencas vertientes a cada punto de muestreo, para a continuación obtener las superficies de cada tipo de uso en cada subcuenca. Se

asume que los usos del suelo no han cambiado significativamente desde la fecha de publicación de esta capa hasta el momento en el que se realizó el trabajo de campo.

Para realizar los análisis multivariantes entre variables de hábitat y biológicas, se necesitaba reducir en gran medida el número de variables, ya que el número de réplicas era reducido. Para ello se decidió aplicar una reducción de variables mediante un Análisis de Componentes Principales (PCA) a los usos del suelo, las variables físico-químicas y las concentraciones de metales.

Los PCAs son análisis que agrupan la variabilidad que poseen un grupo de variables en unos pocos componentes principales, de modo que se reduce el número de variables sin una reducción significativa de la información que estas contienen.

Para los usos del suelo se tomaron los valores en hectáreas (ha) de cada uso en las cuencas de drenaje. Primero se eliminaron los usos con poca superficie y a continuación se estandarizó mediante *MinMax Scaler*. Finalmente se realizó el PCA utilizando el programa Statgraphics Centurion XVII® (versión 17.2.00, StatPoint Technologies Inc., The Plains, Virginia).

2.3. PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

En campo se realizaron en cada punto de muestreo las mediciones de pH, temperatura, oxígeno disuelto y conductividad utilizando los equipos Milwaukee MW801 y MW600 (Figura 8), introduciendo ambas sondas en los primeros 10 cm de profundidad. Para las mediciones de turbidez y sólidos totales disueltos (STD) se tomaron muestras de agua de cada punto de muestreo, a una profundidad igual a la mitad del calado total de cada punto y enjuagando varias veces los botes antes de tomar la muestra (Figura 9).



Figura 8. Medición de parámetros en campo con el equipo Milwaukee MW801



Figura 9. Toma de muestras de agua para realizar posteriormente las mediciones de turbidez y STD. De estas botellas se tomaron las alícuotas de donde se determinaron las concentraciones de metales.

Se realizó la medición de turbidez y STD en el laboratorio de la Escuela de Gestión Ambiental de la PUCESE, utilizando un colorímetro HACH DR900, aunque en campo ya se veían cuáles eran los puntos que obtendrían mayores valores de turbidez (Figura 10). Las mediciones en campo y los muestreos se realizaron entre las 8:00h y las 15:00h de la mañana durante 4 días consecutivos. No fue posible realizar las mediciones y muestreos en la misma franja horaria debido a que los puntos se encontraban a distancias de entre 40 minutos y 2:30 horas entre puntos y desde el alojamiento en la ciudad más cercana. Además, los horarios y días de muestreo venían fijados por el desarrollo del proyecto y por la PUCESE.



Figura 10. Estero Durango en el punto P14, en el momento del muestreo con una turbidez muy elevada (09/10/17).

Se decidió realizar el PCA también con las variables físico-químicas con el fin de reducir el número de variables. Para ello, se realizó un análisis de correlaciones cruzadas con el programa Statgraphics Centurion XVII® (versión 17.2.00, StatPoint Technologies Inc., The Plains, Virginia). Sobre el resultado de aquellos grupos de variables estrechamente correlacionadas (Spearsman's $r > 0.8$; Vimos *et al.*, 2017) se eliminaron las que aportaban menos información. Con los valores resultantes estandarizados entre 0 y 1 (*MinMax Scaler*, Fórmula 1) en Microsoft Excel, se procedió a realizar el PCA con los parámetros físico-químicos.

$$X_{normalizada} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

Fórmula 1. Normalización de los valores mediante su escalado entre 0 y 1.

2.4. CONCENTRACIÓN DE METALES

Además de las variables físico-químicas más comunes, también se analizaron los cationes más comunes (Na, K, Ca, Mg) y elementos traza (B, As, Sb, Se, Al, Ca, Fe, Mg, Ti, V, Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, Sr, Cd, Ba, Pb, Mo, Ag, Hg), dado que estos pueden estar presentes en mayor cantidad por efecto de la actividad minera. Para ello, se tomaron muestras de agua de 100 ml a una profundidad igual a la mitad del calado total de cada punto, y se filtraron a través de filtros de fibra de vidrio de 0.45 μm (Figura 11 y Figura 12). Posteriormente, 50 ml de muestra filtrada se fijaron con 1ml ácido nítrico concentrado y fueron enviadas a la Universidad del País Vasco, donde fueron analizadas por el Servicio Central de Análisis de Bizkaia. Las técnicas de análisis utilizadas fueron la Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-MS), con rango dinámico lineal de 8 órdenes de magnitud (ng/L - mg/L) y Espectrometría de Emisión Atómica de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-AES) para los elementos con concentraciones de mg/L.



Figura 11. Trabajo de laboratorio. Preparación de las muestras de agua para enviar a analizar a la UPV-EHU.



Figura 12. Muestra de agua del punto P14 antes y después del filtrado.

Para comparar las concentraciones resultantes con los límites legales para Ecuador, se recurrió al Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA, 2015), donde aparecen los valores máximos permitidos para algunos metales en función del tipo de uso.

Para realizar los análisis multivariantes correctamente fue necesario reducir el número de variables de los metales mediante PCA. Se realizó el mismo proceso que para los parámetros físico-químicos: eliminación de variables con información redundante (Spearsman's $r > 0.8$), estandarización de los valores y realización del PCA.

2.5. MUESTREO DE MACROINVERTEBRADOS

Las comunidades de macroinvertebrados bentónicos han sido muy utilizadas para la determinación de la calidad de las aguas (Alba-Tercedor, 1996; Muñoz-Riveaux *et al.*, 2004; Sánchez, 2005; Rodríguez *et al.*, 2009). Esto se debe a diversos factores, destacando: (1) su presencia en prácticamente todos los sistemas acuáticos; (2) su naturaleza sedentaria, que permite registrar perturbaciones en rangos de tiempo más amplios que con otros métodos; (3) el bajo coste en cuanto a material necesario, análisis, equipos y procesos de muestreo; y (4) la disponibilidad de índices y metodología para el análisis de datos (Pérez-Pompa *et al.*, 2012).

La toma de muestras de macroinvertebrados se realizó siguiendo el protocolo establecido por Jáimez-Cuéllar *et al.* (2002). En cada punto se removía el sustrato con los pies y las manos, de espaldas a la corriente y delante de una red tipo "red de

patada" (*kick net*) con una superficie de abertura de 20x30cm y con un paso de malla de 500 μ m, de modo que el material puesto en suspensión quedara retenido en la red (Figura 13). La operación se realizaba 5 veces siguiendo el protocolo de "multihábitat", priorizando en los mesohábitats más representativos del tramo de río.



Figura 13. Utilización de la red de patada (*kick net*) para realizar el muestreo de macroinvertebrados bentónicos.

A continuación, se eliminaban piedras y material vegetal de gran tamaño, y se guardaba el resto del contenido de la red, lavándolo cuidadosamente para recoger el máximo de individuos posible (Figura 14). En las 5 primeras estaciones (de P1 a P5), se realizó el muestreo por triplicado para medir la variabilidad dentro de un mismo punto. Las muestras eran conservadas en alcohol al 80 % y refrigeradas para su determinación en el laboratorio.



Figura 14. Limpieza del material recolectado, fijado con alcohol y etiquetado para posterior identificación en el laboratorio.

Las muestras fueron identificadas hasta el nivel de familias (Figura 15, Martínez-Sanz, 2013) para posteriormente realizar las clasificaciones en función del tipo de respiración principal para estudiar las afectaciones por grupos de familias.



Figura 15. Equipo de identificación en el laboratorio: guía, ordenador, lupa electrónica para tomar fotografías y lámpara.

Para analizar el estado de calidad de las aguas se aplicaron 4 índices: el BMWP-Col, el EPT, el OCHD y la abundancia de familias. El índice BMWP-Col (*Biological Monitoring Working Party* para Colombia; Zamora, 1999) fue adaptado a Ecuador mediante el uso puntual de valores procedentes de otras zonas próximas (Cuba, Costa Rica, etc.). Este índice asigna un valor de requerimiento de calidad del agua para cada familia (10 puntos máximo y 1 mínimo; MAAME, 2013). El índice EPT es el porcentaje de la abundancia de ejemplares de familias pertenecientes a los órdenes Ephemeroptera, Plecoptera y Trichoptera, respecto a la abundancia total (Carrera & Fierro, 2001). El índice OCHD es el porcentaje de la abundancia de ejemplares de familias pertenecientes a los órdenes Odonata, Coleoptera, Heteroptera y Diptera, respecto a la abundancia total (Belmar *et al.*, 2012, Vander-Vorste *et al.*, 2016). Y por último la abundancia de familias identificadas en cada estación, que fue utilizada ella misma como un valor.

2.6. ANÁLISIS DE COMPARATIVA TEMPORAL

Para estudiar los cambios de parámetros físico-químicos y de las concentraciones de metales entre los dos años de muestreo, se utilizó el programa IBM SPSS Statistics® (versión 25, New York, USA). Con él se realizaron unos gráficos de cajas y bigotes para el análisis comparativo entre los valores de 2016 (10 valores) y los 10 primeros puntos de 2017.

El diagrama de cajas y bigotes es un gráfico que sirve para visualizar la distribución de un conjunto de datos de manera sencilla. Está dividido en una caja rectangular

que acumula el 50% de los datos, con una línea central que indica la mediana de los valores, y cuyos extremos representan los cuartiles 25% y 75%. Los bigotes se extienden hasta los valores mínimos de los datos o hasta 1,5 veces el rango intercuartílico; y los valores que quedan fuera se conocen como atípicos o valores fuera de rango.

El hecho de utilizar sólo los 10 primeros puntos de muestreo se debe a que son de los que se dispone de datos para ambos años. Este tipo de análisis es importante para comprobar si hay valores raros o extremos cambiantes a lo largo del tiempo, para así poder comparar correctamente los valores de las estaciones de control con las mineras.

Para comparar la abundancia de familias de macroinvertebrados, se realizó un análisis SIMPER (Similarity of Percentages) que sirve para identificar los taxones con mayor contribución en las diferencias que se observan entre los dos años, con el índice Bray-Curtis. Esto se realizó con el software PAST Paleontological Statistics® (Versión 3.20 Øyvind Hammer, University of Oslo, Noruega).

2.7. ANÁLISIS DE COMPARATIVA ESPACIAL

Para estudiar las diferencias a nivel físico, químico y biológico que puedan darse entre zonas con minería y zonas sin esta, se procedió a clasificar cuáles son los puntos con impacto por minería y cuáles son los de control. Para realizar esta clasificación se han utilizado ortofotos de la zona con suficiente resolución, y también a partir de la información recogida en estudios anteriores (PUCESE, 2012). Con fotos aéreas de buena calidad como la de la Figura 2 se pueden identificar puntos con actividad minera que, junto a la cartografía de las cuencas hidrográficas, nos permite detectar qué puntos de muestreo estarán afectados por la minería.

No se puede realizar una cartografía completa de las zonas mineras por dos razones. La primera es que los frentes mineros avanzan, cambian y se mueven a una velocidad tal, que las fotografías de satélite nunca son suficientemente actuales. Y la segunda es que depende mucho de la resolución de la fotografía. Como vemos en la Figura 16, se distinguen dos tipos de ortofoto: la central, con baja resolución y donde no es posible identificar frentes mineros, y las laterales, con mayor resolución,

donde sí es posible cartografiar parte de las minas. Pero incluso estas fotos con mayor resolución no son completamente fiables, pues hay gran cantidad de nubes que ocultan el suelo e impiden identificar si hay minas o no.

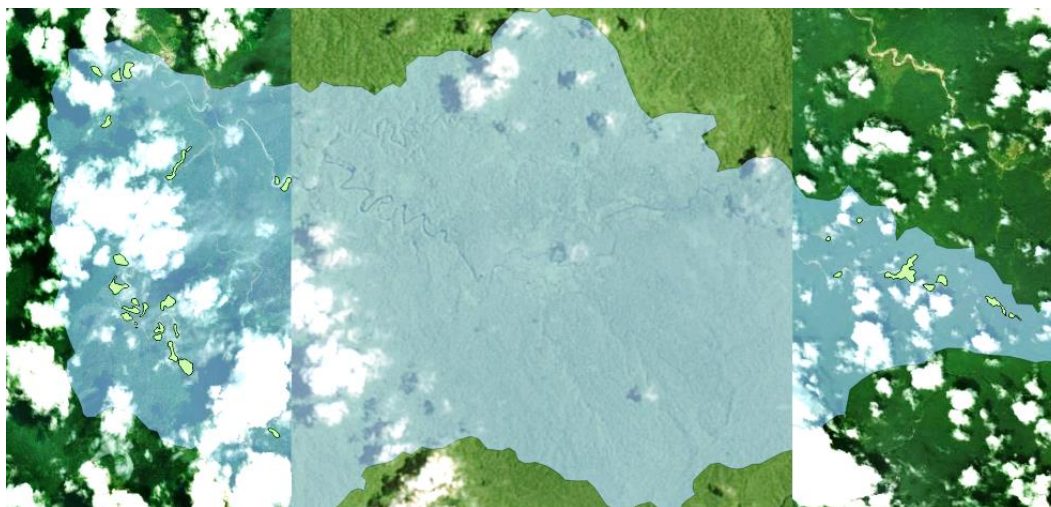


Figura 16. Imagen aérea de una de las cuencas de estudio, en la que se aprecian dos tipos de imagen diferente. En la imagen central, con menor resolución, no se llegan a apreciar bien los frentes mineros. En las imágenes laterales aparecen áreas irregulares amarillas que se corresponden con los frentes mineros cartografiados “a mano”. Fuente: *ESRI Satellite*.

Para comprobar si existen diferencias significativas entre la calidad de las aguas de ríos con actividad minera y ríos sin minería, se realizó un gráfico de cajas y bigotes con los valores de cada variable y diferenciando dos sub-grupos de datos, los que procedían de estaciones con minería (establecidos en el paso anterior) y los de puntos de control. Para ello se utilizó el programa estadístico IBM SPSS Statistics® (versión 25, New York, USA). Para establecer si las diferencias observadas entre los grupos son significativas, se aplicó el análisis de varianza (ANOVA) también con IBM SPSS Statistics® (versión 25, New York, USA). El análisis ANOVA indica si la diferencia entre valores de una misma variable divididos en dos grupos es significativa o no.

Pese a contar con puntos de estudio pertenecientes a diferentes subcuencas, asumimos que se pueden agrupar para compararlos con el resto de puntos debido a las características que son comunes para todos ellos, como la composición geológica y la litología (DINAGE, 2001), la climatología y precipitaciones medias (Moralet *et al.*, 2013), los usos del suelo, la pendiente media y la altura media. La unión de estos puntos en un mismo análisis es fundamental en trabajos con escasez de datos, donde

la información es costosa de conseguir y los puntos tienen difícil acceso; así pues, un estudio representativo requiere agrupar datos en estas subcuencas, cuya problemática es la misma.

2.8. ANÁLISIS MULTIVARIANTE DE VARIABLES DE HABITAT Y BIOLÓGICAS

2.8.1. Pretratamiento de datos

Como ya hemos comentado, para realizar los análisis multivariantes entre variables físicas, químicas y biológicas, primero se hizo un pretratamiento de los datos físico-químicos y los metales. Dado el escaso número de muestras en comparación con el número de variables, se comenzó realizando un análisis de correlaciones cruzadas con el programa Statgraphics Centurion XVII® (versión 17.2.00, StatPoint Technologies Inc., The Plains, Virginia), en el que se eliminaron las variables estrechamente correlacionadas entre sí. Se consideraron las variables con una correlación mayor a 0.8 entre sí como estrechamente relacionadas (Spearsman's $r > 0.8$, Vimos *et al.*, 2017) y se eliminó una de ellas con el objetivo de reducir el número de variables.

A continuación, las variables retenidas se estandarizaron mediante su escalado entre 0 y 1 (*MinMax Scaler*) con Microsoft Excel® y se realizó un PCA para cada grupo de variables tal y como hemos visto anteriormente, separando: variables de usos de suelo, variables de parámetros físico-químicos y variables de concentraciones de metales.

Los resultados de los PCAs fueron estandarizados de nuevo con el mismo método para conseguir una homogeneización de los valores a introducir en los Análisis de Correspondencias (CA).

Para las variables bióticas se hicieron dos diferenciaciones. Por un lado, se utilizó como variable indicadora de calidad del agua el índice BMWP-Col para cada estación y campaña de muestreo, y otras 3 variables surgieron de la agrupación de las abundancias de cada orden en los grupos EPT y OCHD (Belmar *et al.*, 2012) y por último la abundancia de familias total en cada punto de muestreo.

Por otro lado, se clasificaron todas las familias según uno de sus rasgos principales (*traits*), el principal tipo de respiración (aérea, por branquias o por tegumentos, Viera *et al.*, 2006); usándose como variables la abundancia de individuos con cada tipo de respiración.

El uso de los rasgos es muy interesante y tiene mucho auge en ecología acuática porque han sido evidenciadas relaciones entre estos rasgos y las variables del hábitat (Bonada *et al.*, 2007), y permite una mayor extrapolación de estos estudios a otros ríos y regiones, donde los macroinvertebrados pueden mostrar los mismos o similares rasgos, o sufrir efectos similares según la contaminación.

2.8.2. Análisis multivariante de correspondencias

Con el fin de contrastar las posibles relaciones entre los parámetros físico-químicos del agua, usos del suelo, concentración de metales estudiados y la composición de las comunidades de macroinvertebrados, se optó por realizar dos tipos de análisis multivariantes dentro del Análisis de Correspondencias (CA). El CA es conceptualmente parecido al PCA, pero aplicado a datos categóricos o discretos más que a datos continuos (Hill, 1974). Primero se realizó un Análisis de Correspondencias Canónicas (CCA) y después un Análisis de Correspondencias sin Tendencia (DCA).

El CCA es una herramienta que sirve para dilucidar las relaciones que se dan entre conjuntos de datos biológicos y el entorno (ter Braak & Verdonschot, 1995). Ambos establecen relaciones entre variables abióticas y bióticas, pero el DCA suaviza la forma arqueada que pueden adquirir los puntos dibujados en el primero (Hill & Gauch, 1980). Es por ello que se opta por realizar ambos análisis para comprobar cuál permite una interpretación más clara de nuestro caso en concreto.

Para realizar los dos tipos de CA, se utilizaron como variables abióticas los componentes principales resultantes de los PCAs, y como variables bióticas el tipo de respiración principal y los distintos índices, por separado. El programa utilizado para hacer los CA fue PAST Paleontological Statistics® (Versión 3.20 Øyvind Hammer, University of Oslo, Noruega).

3. RESULTADOS

3.1. USOS DEL SUELO

El resultado de superficie de cada tipo de uso del suelo aparece representado en la Tabla 2. Los tipos de uso del suelo que se contemplan son los bosques naturales, pastizales de herbáceas, cultivos de especies frutales, cultivos de otras especies no definidas, cultivos de cacao y cultivos de palma africana. En todas las subcuencas estudiadas, predomina el bosque natural frente al resto de tipos de cobertura. Bajo el encabezado de “Otros” se agrupan las plantaciones forestales, las áreas pobladas, los cuerpos de agua y las zonas sin vegetación, que son las que presentan un menor peso (133.6 ha en conjunto, lo que representa un 0.12% de la superficie total), y por lo tanto, no se incluyeron en el PCA.

Tabla 2 Superficie (ha) cubierta por cada tipo de uso, para las cuencas de drenaje de cada punto de muestreo.

PUNTOS DE MUESTREO	Bosque Natural	Pastizal	Frutal	Indiferenciado	Cacao	Palma	Otros	TOTAL
P1	14660.4	604.1	1008.7	141.6	238.4	392.4	0	17045.6
P2	7248.9	1603.9	1882	381.6	327.8	1556.1	25.7	13026
P3	7784.1	1690.8	372.1	430.8	0	500.6	12.2	10790.6
P4	13881.4	1516.8	72.7	115.9	185.2	412.2	27.7	16211.9
P5	11851.3	403.5	23.2	214	0	0	15.5	12507.6
P6	3632.1	654.6	211.1	115.5	0	577.9	4.1	5195.3
P7	3201.8	218.4	38.3	0	0	195.1	6.5	3660
P8	3898.7	2117.8	115.7	698.3	86.3	0.8	0	6917.7
P9	488	11.3	0	0	0	0	0	499.3
P10	2371.8	212.1	75.8	0	0	0	21.8	2681.6
P11	89.7	69.6	28	1.9	0	0	0	189.2
P12	214.1	0	0	0	0	0	0	214.1
P13	797.4	220.3	0	176.3	0	264.4	0	1458.4
P14	1421.3	300.1	6.1	76.2	0	319	0	2122.6
P15	4518.3	601.3	52.6	11.9	407.1	373	14.4	5978.7
P16	4573.2	624	298.4	224.1	0	0	0	5719.7
P17	7071.5	774	42.5	80.6	0	0	5.6	7974.3
TOTAL	87704	11622.6	4227.1	2668.8	1244.8	4591.6	133.6	112192

Como resultado del PCA, se obtuvieron dos componentes principales que explicaban el 76.34% de la variabilidad del conjunto de datos. En el primer componente, que denominamos Usos1 (54.90% de la variabilidad acumulada) contribuyen las variables de cultivos (frutal, palma, cacao y pastizal) todas con un coeficiente de correlación con el eje 1 de entre 0.43 y 0.47. En el segundo componente, Usos2

(21.44% de variabilidad) contribuyen los cultivos indiferenciados (el resto de cultivos que no son ni frutales, ni palma, ni cacao) con un coeficiente de correlación con el eje 2 de 0.65.

3.2. PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

El resultado de las mediciones de los parámetros realizadas en campo (temperatura, oxígeno disuelto, conductividad y pH) y en laboratorio (turbidez y sólidos totales disueltos) se muestra en la Tabla 3 y Tabla 4, que corresponden a las campañas de 2016 y 2017 respectivamente. Destaca claramente el valor de la turbidez de 1081 FAU (Unidades de Atenuación de Formacina) registrado en el punto P14 en la campaña de 2017. El pH más bajo se presenta en P4 en ambos años (6.9 en 2016 y 5.94 en 2017).

Tabla 3. Resultado de las mediciones de los parámetros físico-químicos en la campaña de noviembre de 2016. Los nombres de las variables corresponden a temperatura (TEMP), conductividad (COND), concentración de oxígeno disuelto (DO), porcentaje de oxígeno disuelto (DO%), valor de pH (PH), turbidez (TURB) y sólidos totales disueltos (STD).

	°C	μS cm-1	mg l-1			FAU	mg l-1
CODIGO	TEMP	COND	DO	DO%	PH	TURB	STD
P1	25.9	39	7.5	92	7.5	7	21
P2	26.5	33	7.4	91	7.6	13	18
P3	22.2	34	7.6	94	7.5	12	18
P4	28	29	7.3	90	6.9	104	16
P5	25.3	24	7.1	89	7.3	3	13
P6	24.2	26	7.7	93	7.3	12	14
P7	26.8	16	8	103	7.9	8	29
P8	26.4	82	5.7	70	7.2	10	44
P9	25.4	44	7.8	97	7.3	7	24
P10	25.2	98	7.8	95	7.4	33	53

Las variables no incluidas en el PCA son la turbidez y la temperatura. La turbidez presenta valores fuera de rango (*outliers*, Figura 17) que dificultan la interpretación de los resultados, además de no tener apenas peso en ninguna de las componentes principales. Por su parte, los valores de temperatura tomados no se tuvieron en cuenta para este análisis dada la variabilidad de los valores que puede presentar a lo largo del día (hasta 2°C de diferencia entre las 8:00h y las 15:00h; Urrego & Ramírez-R., 2000), cosa que entorpece también la interpretación de los datos

(Membiela *et al.*, 1991). La variación del oxígeno disuelto en esta franja horaria es menor, aun así se estudiará su interacción con el resto de variables con cierta cautela.

Tabla 4. Resultado de las mediciones de los parámetros físico-químicos en la campaña de octubre de 2017. Los nombres de las variables corresponden a temperatura (TEMP), conductividad (COND), concentración de oxígeno disuelto (DO), porcentaje de oxígeno disuelto (DO%), valor de pH (PH), turbidez (TURB) y sólidos totales disueltos (STD).

	°C	μS cm-1	mg l-1			FAU	mg l-1
CODIGO	TEMP	COND	DO	DO%	PH	TURB	STD
P1	26.5	28	8.3	101	6.52	0	15
P2	27.2	32	7.9	91	6.74	8	17
P3	26.7	29	7.9	98	6.46	29	16
P4	27.1	6	7.9	98	5.94	105	3
P5	25.4	19	7.8	95	6.3	12	10
P6	27.3	34	7.8	97	6.84	2	17
P7	27.2	27	6.3	78	6.8	3	15
P8	26.6	79	5.8	70	6.96	4	42
P9	26.7	49	9.3	114	7.3	0	26
P10	26.3	90	8.6	106	6.92	0	50
P11	30.2	75	9.3	120	7.74	5	40
P12	25.3	24	7.8	95	6.5	2	13
P13	24.7	38	8	97	6.72	0	20
P14	25	27	7.7	95	6.19	1081	15
P15	26.1	20	8.2	102	6.58	6	11
P16	26.5	29	7.9	97	6.52	11	15
P17	25	20	7.9	97	6.44	71	11

Como resultado del PCA, se obtuvieron dos componentes principales que explicaba el 79.02% de la variabilidad del conjunto de datos. En el primer componente, que denominamos 1fq (45.21% de variabilidad acumulada) contribuyen las variables de conductividad y pH con un coeficiente de correlación con el eje 1 de 0.71 y 0.69 respectivamente. En el segundo componente, 2fq (33.81% de variabilidad) contribuye en gran medida el oxígeno disuelto con un coeficiente de correlación con el eje 2 de 0.96.

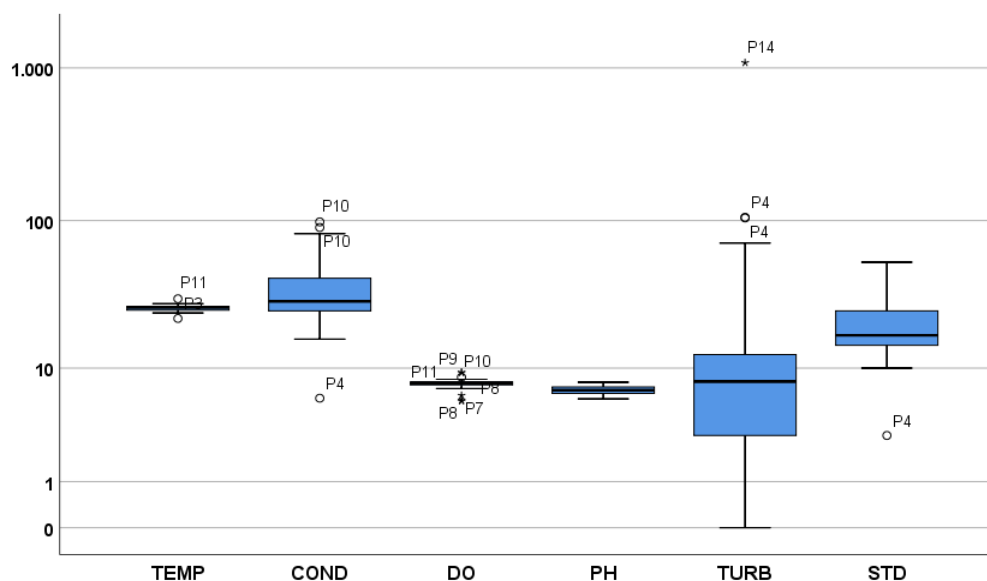


Figura 17. Diagrama de cajas y bigotes de los diferentes parámetros físico-químicos medidos, donde destacan los valores fuera de rango de la turbidez (TURB). El eje Y tiene escala logarítmica, y las unidades son diferentes para cada variable: Temperatura (TEMP; °C), Conductividad (COND; $\mu\text{S}/\text{cm}$), Oxígeno Disuelto (DO; mg/L), pH (-), Turbidez (TURB; Unidades de Atenuación de Formacina, FAU) y Sólidos Disueltos Totales (STD; mg/L).





3.3. CONCENTRACIÓN DE METALES

En los análisis se estudiaron hasta 20 elementos, de los cuales se detectaron 16 y descartaron los que no fueron detectados en las muestras. Fueron descartados selenio, molibdeno, plata y mercurio por presentar concentraciones por debajo del límite de detección en todas o casi todas las muestras. Estos límites son de <0.5 ppb (Se), <0.06 ppb (Mo), <0.04 ppb (Hg) y <0.02 ppb (Ag). Además, se incluye una leyenda de colores para identificar los valores de concentraciones que superan algún tipo de limitación legal en Ecuador, ya sea para consumo humano, para la preservación de la vida acuática o para uso agrícola (TULSMA, 2015).

En la Tabla 5 aparecen los resultados de la campaña de 2016. Como se observa en la tabla, todos los puntos superan las concentraciones máximas permitidas de aluminio para la vida acuática (>0.1 mg Al/L) y de cobre tanto para vida acuática (>5 μg Cu/L) como para consumo humano (>2 μg Cu/L). Además, otros siete puntos superan el límite para la vida acuática de plomo (>1 μg Pb/L), seis puntos el de hierro (>0.3 mg Fe/L) y cuatro puntos el de zinc (>30 μg Zn/L). Uno de los puntos supera además el límite de hierro para consumo humano (>1 mg Fe/L), y en otros dos se supera el límite legal de manganeso para riego agrícola (>20 mg Mn/L).

Tabla 5. Concentraciones de metales en los puntos de muestreo de la campaña de noviembre de 2016. Los valores con color superan los límites legales según la legislación ambiental del Ecuador para uno o más usos (ver leyenda de colores).

	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
CODIGO	Al	Ca	Fe	K	Mg	Na	B	Ti	V	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Cd	Sb	Ba	Pb
P1	0.19	3.02	0.21	0.84	1.61	2.59	17.9	10.6	2.09	1.93	4.68	6	6.31	18.4	0.14	32.7	0.17	0.04	18.1	2.26
P2	0.5	10.7	0.59	1.08	2.29	2.91	13.5	28.4	1.69	1.05	33.2	5.18	10.2	24.9	0.34	81.6	0.33	0.05	29.5	1.77
P3	0.45	3.06	0.38	0.88	1.34	2.32	6.17	13.5	2.6	1.38	6.93	9.54	8.16	23.3	0.13	26	0.25	0.05	13.9	2.79
P4	0.46	4.25	0.42	1.16	1.35	3.28	5.74	16.9	3.43	1.78	9.14	17.6	19.9	60.7	0.18	28.1	0.68	0.1	15.4	4.94
P5	1.72	13.2	0.8	1.2	1.33	4.19	7.36	49.8	7.85	3.36	10.2	20.8	17.8	83.6	0.31	30.2	0.88	0.15	22.8	6.36
P6	0.16	1.86	0.17	0.55	0.65	1.67	4.73	5.98	0.93	0.43	2.71	1.43	9.11	9.63	0.11	15.4	0.03	0.04	7.67	0.7
P7	0.23	2.24	0.17	0.53	1.04	1.56	4.68	8.77	1.71	0.7	4.28	2.07	5.16	11.8	0.1	18.7	0.04	0.02	10.5	0.86
P8	0.31	2.48	0.3	0.7	0.86	2.32	6.91	8.98	1.45	0.52	6.81	2.62	16.1	21.7	0.09	17.7	0.1	0.02	10.7	0.9
P9	0.59	9.71	1.18	2.43	2.82	5.96	12.2	28.1	2.88	1.97	22.7	12.9	9.68	63.8	0.42	69.2	0.46	0.09	44.3	4.09
P10	0.65	3.92	0.36	0.99	1.53	2.89	7.84	13.7	2.07	0.88	7	15.7	5.54	54.4	0.17	31.7	0.36	0.04	13	2.76

- | | | | |
|---|---|---|--------------------------------------|
|  | Supera el límite para la vida acuática |  | Supera el límite para consumo humano |
|  | Supera el límite para consumo humano y la vida acuática |  | Supera el límite para riego agrícola |

En la campaña de 2017 (Tabla 6) las concentraciones de aluminio y de zinc superan el límite legal de concentración para la vida acuática en 10 puntos cada uno (>0.1 mg Al/L y >30 μ g Zn/L). Las concentraciones de hierro y plomo también superan sus respectivos límites para la vida acuática en seis puntos cada uno (>0.3 mg Fe/L y >1 μ g Pb/L). En el caso de la concentración de cobre, esta supera el límite legal para consumo humano en 12 de los puntos (>2 μ g Cu/L), cuatro de los cuales superan además el límite para la vida acuática (>5 μ g Cu/L). La concentración de cadmio supera el límite para la vida acuática en dos puntos (> 1 μ g Cd/L) y por último, un punto supera la concentración de manganeso para uso agrícola (> 20 μ g Mn/L).

En los resultados también se observa que hay tres puntos que no superan el límite legal de concentración en agua de ningún metal (P9, P12 y P13), un punto que supera el límite para un metal (P7), dos puntos que lo supera para dos metales (P8 y P10). El resto de puntos superan los límites de entre tres y seis metales.



El resto de elementos que están recogidos en la legislación ecuatoriana para algún tipo de uso y que no han superado ningún límite legal en los análisis son el boro, el vanadio, el cromo, el níquel, el arsénico y el bario. El resto de elementos no aparecen recogidos en la legislación por no tener efectos conocidos sobre la salud o bien porque las concentraciones que pueden alcanzar en el medio natural no son relevantes para la salud de las personas y del ecosistema (TULSMA, 2015).



Se decidió no incluir en el PCA los elementos boro, calcio y zinc, ya que ninguno de ellos añade más información a los componentes principales obtenidos, además de empeorar el resultado del PCA. Como las concentraciones de zinc son elevadas y supera en varios puntos los límites de concentración legales, se añadió por separado en los CA (después de ser normalizada) para observar posibles relaciones con otros parámetros.

Por tanto, como resultado del PCA, se obtuvieron tres componentes principales que explicaba el 87.14% de la variabilidad del conjunto de datos. En el primer componente, que identificamos como 1met (47.29% de variabilidad acumulada) contribuyen las variables de concentración de hierro y potasio con coeficientes de correlación con el eje 1 de 0.49 y 0.43 respectivamente.

Tabla 6. Concentraciones de metales en los puntos de muestreo en la campaña de octubre de 2017. Los valores con color superan los límites legales según la legislación ambiental del Ecuador para uno o más usos (ver leyenda de colores).

	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L	µg/L
CODIGO	Al	Ca	Fe	K	Mg	Na	B	Ti	V	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Cd	Sb	Ba	Pb
P1	0.13	13.1	0.11	1.28	1.32	2.61	36.4	1.77	1.71	0.91	3.77	5.06	6.27	122	0.12	78.7	0.93	0.07	18.4	1.83
P2	0.14	2.98	0.17	0.7	1.38	2.1	9.76	2.28	1.92	0.54	2.41	1.49	2.01	42.8	0.09	27.9	0.38	0.04	14.1	0.77
P3	0.58	2.22	0.27	0.65	1.19	2.04	7.11	14	3.91	0.79	2.86	0.83	2.4	7.76	0.14	23	0.14	0.03	26.4	0.28
P4	1.76	1.71	0.77	0.55	0.82	1.69	8.19	21.2	9.16	1.56	9.52	1.23	8.9	8.86	0.24	16.2	0.13	0.03	43.3	0.8
P5	0.19	7.69	0.12	0.64	0.63	1.77	6.51	2.75	1.32	0.26	2.9	1.56	3.24	54.2	0.1	44.9	0.29	0.04	8.83	0.99
P6	0.16	8.85	0.11	0.8	1.36	2.18	5.37	2.52	1.98	0.52	3.43	3.43	3.34	154	0.11	53.5	0.8	0.05	12.2	5.56
P7	0.11	3.45	0.17	0.6	0.65	1.84	5.47	1.34	0.84	0.16	2.09	0.45	1.23	15.9	0.07	23.3	0.12	0.01	9.1	0.46
P8	0.1	6.1	0.67	2.04	2.86	5.05	10	1.84	1.16	0.24	3.44	0.47	1.71	9.37	0.36	62.5	2.99	0.02	39.2	0.24
P9	0.06	4.08	0.1	0.85	1.86	3.12	5.97	0.64	1.04	0.23	2.49	0.64	1.32	29.7	0.11	38.7	0.13	0.03	14.5	0.87
P10	0.09	12.4	0.29	1.04	2.28	2.94	10.5	1	0.7	0.23	1.65	1.81	2.33	65.9	0.26	89.2	0.18	0.04	36.3	0.4
P11	0.1	11.6	0.92	1.52	2.75	3.93	6.79	1.12	1.03	0.34	3.16	1.88	2.96	83.8	0.3	86.4	0.2	0.05	34.3	1.56
P12	0.1	2.89	0.17	0.67	0.86	1.75	3.62	0.87	0.89	0.39	2.07	0.43	1.12	12.1	0.09	26.6	0.07	0.01	18.1	0.31
P13	0.03	3.14	0.1	0.7	1.67	2.26	5.94	0.33	1.34	0.42	0.97	0.41	0.6	9.6	0.07	33.7	0.06	0.01	17.1	0.4
P14	1.1	5.24	0.49	0.61	1.21	4.34	8.4	13	5.53	1.91	89.5	2.41	4.85	68.1	0.17	34	0.18	0.01	44.8	1.07
P15	0.1	2.37	0.34	0.85	0.89	2.09	6.23	1.48	0.96	0.3	2.15	2.28	5.8	61	0.15	20.1	1.72	0.03	13.7	1.76
P16	0.43	3.11	0.22	0.66	1.13	1.87	3.13	14.4	3.26	0.69	1.93	1.44	2.65	80.9	0.12	26.3	0.09	0.02	21.1	0.55
P17	0.94	7.85	0.36	0.62	0.82	1.87	6.04	17	5.43	1.24	5.93	1.93	7.44	98.8	0.18	46.3	0.2	0.03	33.9	1.11

 Supera el límite para la vida acuática
 Supera el límite para consumo humano y la vida acuática

 Supera el límite para consumo humano
 Supera el límite para riego agrícola

En el segundo componente, 2met (20.88% de variabilidad) contribuyen el cadmio y de manera negativa el níquel con coeficientes de correlación con el eje 2 de 0.46 y -0.47 respectivamente. Por último, en el tercer componente, 3met (18.97% de variabilidad) contribuyen de manera negativa el bario y el aluminio con coeficientes de correlación con el eje 3 de -0.53 y -0.51 respectivamente.

3.4. MUESTREO DE MACROINVERTEBRADOS

Se registraron un total de 6205 individuos entre las dos campañas (3170 en 2016 y 3035 en 2017) pertenecientes a 43 familias distintas. La mayor abundancia de individuos registrados fue del orden Ephemeroptera. Las familias con mayor abundancia fueron, por número de individuos: Leptophlebiidae (1435), Baetidae (1380), Leptohyphidae (1036), Hydropsychidae (726), Elmidae (388), Philopotamidae (352) y Chironomidae (288); cuyas fotografías aparecen en la Figura 18. El listado de familias encontradas, así como la clasificación taxonómica de todas ellas aparece en la Tabla 7.

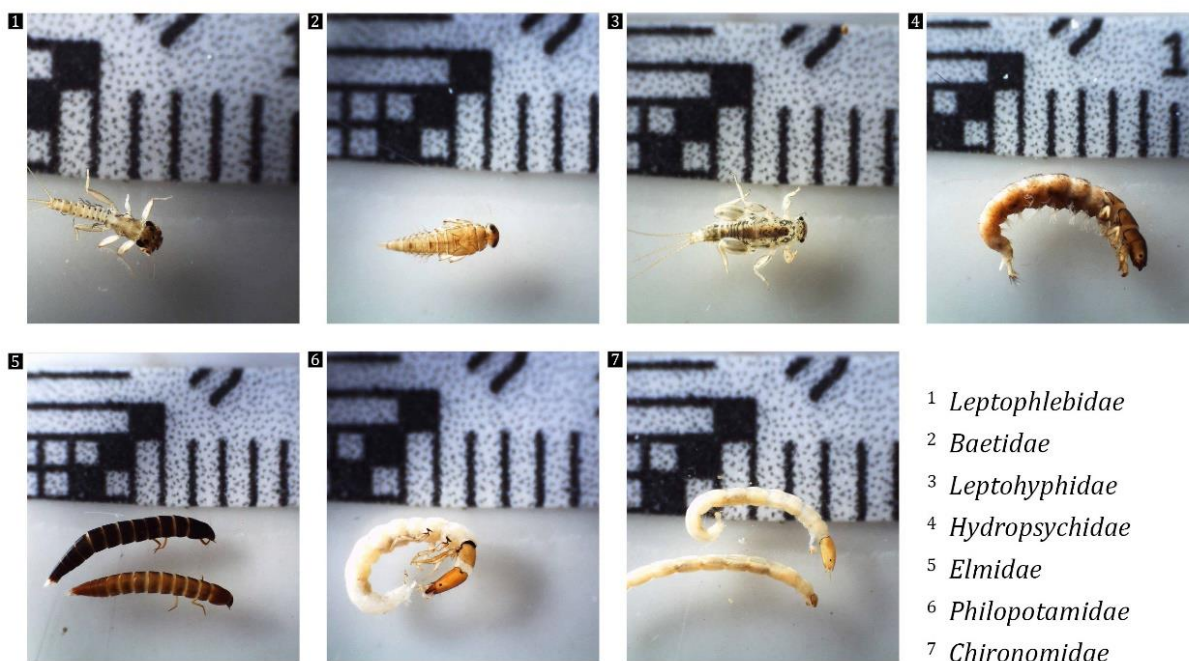


Figura 18. Fotografías de las 7 familias más abundantes en los muestreos. Numeradas por orden de izquierda a derecha y de arriba abajo.

Tabla 7. Listado y clasificación taxonómica de todas las familias identificadas en el conjunto de muestras analizadas. En la columna de la derecha aparecen las abreviaciones que se usan en las tablas y gráficas.

PHYLUM	CLASE	ORDEN	FAMILIA	Código		
Annelida	Hirunidea	-	-	HIRU		
	Oligochaeta	-	-	OLIG		
Arthropoda	Insecta	Coleoptera	Dryopidae	DRYO		
			Elmidae	ELMI		
			Hydrophilidae	HYPH		
			Psephenidae	PSEP		
			Staphylinidae	STAP		
		Diptera	Ceratopogonidae	CERA		
			Chironomidae	CHIR		
			Culicidae	CULI		
			Dolichopodidae	DOLI		
			Empididae	EMPI		
			Limoniidae	LIMO		
			Simuliidae	SIMU		
			Tipulidae	TIPU		
		Ephemeroptera	Baetidae	BAET		
			Caenidae	CAEN		
			Ephemeridae	EPHE		
			Leptohiphidae	LEHY		
			Leptophlebiidae	LEPH		
		Heteroptera	Corixidae	CORI		
			Mesoveliidae	MESO		
			Naucoridae	NAUC		
			Veliidae	VELI		
		Lepidoptera	Pyralidae	PYRA		
		Megaloptera	Corydalidae	CORY		
		Odonata	Calopterigydae	CALO		
			Coenagrionidae	COEN		
			Gomphidae	GOMP		
			Libellulidae	LIBE		
			Platystictidae	PLAS		
		Plecoptera	Perlidae	PERL		
		Trichoptera	Glossosomatidae	GLSO		
			Hydropsychidae	HYPS		
			Hydroptilidae	HYPT		
			Leptoceridae	LECE		
			Philopotamidae	PHIL		
		Malacostraca	Decapoda	Palaemonidae	PALA	
		Mollusca	Bivalvia	Veneroida	Corbiculidae	CORB
			Gasteropoda	-	Hydrobiidae	HYBI
				-	Planorbidae	PLAN
				-	Thiaridae	THIA
Platyhelminthes	Turbellaria	Tricladida	Dugesidae	DUGE		

Las estaciones que presentaron mayor abundancia de individuos identificados fueron los punto P11 en 2017 (573 ejemplares, 17 familias), P13 en 2017 (443 ejemplares, 18 familias) y P10 en 2017 (340 ejemplares, 16 familias). En el otro extremo se encuentra el punto P4 en 2017 (2.7 ejemplares, 6 familias), el punto P7 en 2016 (9 ejemplares, 4 familias), el punto P7 en 2017 (11 ejemplares, 5 familias) y el punto P4 en 2016 (18.3 ejemplares, 6 familias).

En relación a los índices biológicos analizados, los resultados se encuentran en la Tabla 8, cuya variación entre los dos años de muestreo aparece en el apartado de análisis de comparativa temporal.

Según el índice BMWP-Col, en 2016 se dieron 4 puntos con calidad muy buena (≥ 121 puntos), un punto con calidad buena (101-120 puntos), dos puntos con calidad aceptable (61-100 puntos), un punto con calidad dudosa (36-60 puntos) y un punto con calidad crítica (16-35 puntos). Dos de los puntos con mejor estado según el índice BMWP se corresponden con los dos puntos de control (P1 y P9). En 2017, de los 17 puntos muestreados solo tres obtuvieron la calificación de calidad del agua muy buena, cuatro puntos la de calidad buena, ocho puntos la de calidad aceptable, un punto con calidad dudosa y otro punto con calidad crítica. Cabe destacar que los puntos con calidad dudosa y crítica en 2017 fueron los mismos que en la campaña anterior.

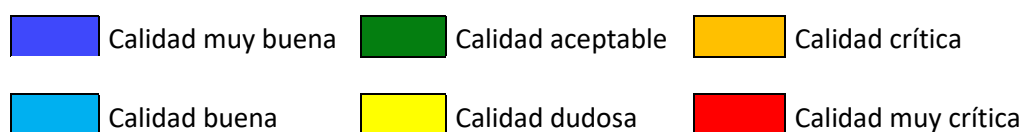
En cuanto a la abundancia de taxones, en 2016 hubo tres puntos con una abundancia de familias igual o superior a 20 taxones, dos puntos con más de 15 taxones y el resto quedaron por debajo de esta cifra. En 2017, seis de los puntos registraron entre 15 y 19 taxones, siete puntos registraron entre 10 y 14 familias, y en el resto se contabilizaron menos de 10 familias.

En relación al grupo de abundancia EPT en 2016, siete de los 10 puntos contaban con calidad muy buena ($>75\%$), dos con calidad buena (74%-50%) y uno con calidad regular (49%-25%). En 2017, 12 de las 17 estaciones contaban con calidad muy buena, cuatro con calidad buena y una con calidad regular.

El índice de abundancia OCHD por su parte, presenta valores generalmente bajos, destacando los mayores porcentajes de 2016 (47% de abundancia en P10) y de 2017 (57% de abundancia en P4 y 33% en P2). En el resto de puntos, el valor de este índice es inferior al 30%.

Tabla 8. Resultado de la aplicación del índice BMWP-Col adaptado a la zona de estudio, para los muestreos de macroinvertebrados realizados en 2016 y 2017. Debajo aparecen los colores utilizados para la clasificación BMWP, relacionados con el estado de calidad al que se refieren.

CODIGO	Índice BMWP-Col		Riqueza de familias		%EPT		%OCHD	
	2016	2017	2016	2017	2016	2017	2016	2017
P1	145	65	20	10	73%	91%	26%	8%
P2	123	109	17	15	91%	66%	8%	33%
P3	163	98	22	13	87%	84%	12%	15%
P4	41	39	6	6	75%	29%	7%	57%
P5	112	89	16	13	80%	82%	19%	17%
P6	82	67	11	9	81%	89%	19%	10%
P7	32	34	4	5	89%	73%	11%	9%
P8	65	130	10	18	69%	68%	25%	24%
P9	141	104	20	14	75%	77%	19%	22%
P10	81	114	12	16	32%	88%	47%	12%
P11		114		17		78%		19%
P12		135		19		80%		18%
P13		123		18		71%		28%
P14		79		10		92%		7%
P15		79		11		88%		11%
P16		86		11		94%		5%
P17		61		8		79%		14%



En referencia al tipo de respiración principal de los macroinvertebrados, el grupo mayoritario fueron aquellos cuya respiración se produce a través de branquias (3100 individuos), seguidos de los que tienen respiración por tegumentos (624 individuos) y por último aquellos que respiran oxígeno atmosférico (298 individuos, Figura 19). En cuanto a la distribución entre los puntos de muestreo, en todos predominó la presencia de ejemplares de familias con respiración branquial. Por su parte, el punto con mayor abundancia de ejemplares con respiración por tegumentos fue P11 (251 ejemplares), y el de mayor abundancia de ejemplares con respiración aérea fue P13 (109 ejemplares).

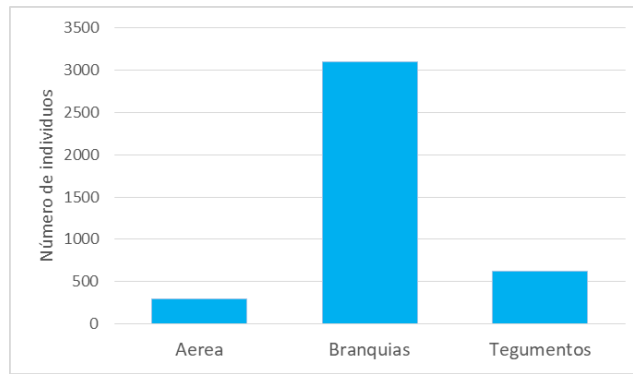


Figura 19. Abundancias de macroinvertebrados total, según su tipo de respiración principal.

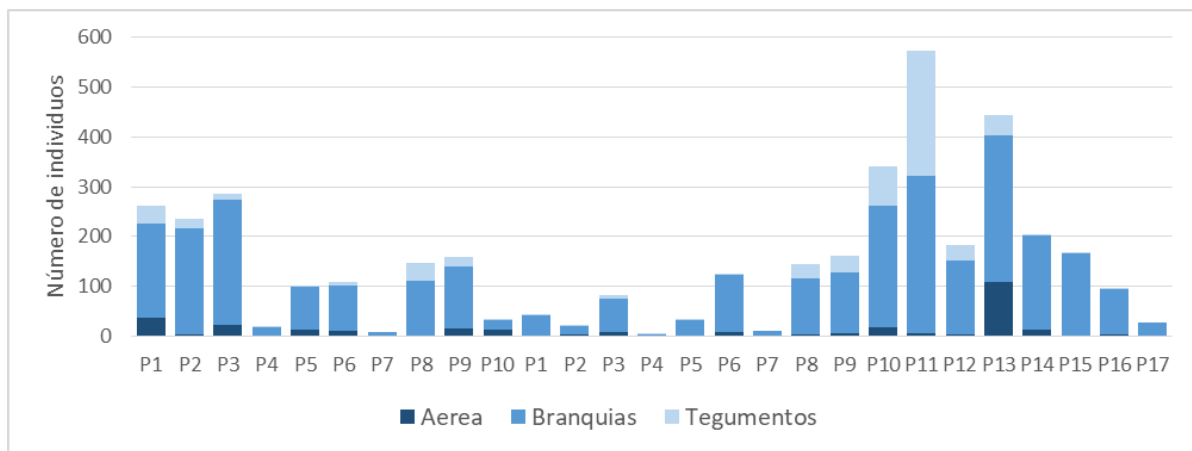


Figura 20. Abundancias de macroinvertebrados según su tipo de respiración principal (aérea, por branquias y por tegumentos) y en función de los puntos de muestreo.

3.5. ANÁLISIS DE COMPARATIVA TEMPORAL

Se presenta primero la comparación de los valores de las variables abióticas, y a continuación el resultado del análisis SIMPER que compara las abundancias de los taxones entre los dos muestreos.

3.5.1. Parámetros físico-químicos

La evolución de los valores de los parámetros físico-químicos entre los dos periodos de medición se muestra en la Figura 21. Se ha decidido eliminar algunas variables con información duplicada con el fin de facilitar la interpretación de los resultados. Estas variables son el porcentaje de oxígeno disuelto (OD%, con rango de valores entre 70% y 120%) que ya está representada mediante la variable concentración de oxígeno disuelto (OD, $R^2=0.9638$) y los sólidos totales disueltos (STD, con rango de

valores entre 3 y 53 mg/L) que están representados en la variable tomada en campo conductividad (COND, $R^2=0.9985$). También se ha omitido el valor extremo de turbidez del punto P14 (1081 FAU) para que no deteriore el gráfico y se puedan visualizar correctamente los valores de las demás variables.

En la Figura 21 observamos los gráficos de cajas y bigotes con los valores de los diferentes parámetros en las campañas de muestreo de 2016 y 2017. Se aprecia que hay ligeras variaciones al alza en la temperatura del agua en los momentos de muestreo, así como una acidificación del pH en las aguas del conjunto de ríos. El oxígeno disuelto parece experimentar un pequeño aumento, aun conservando puntos con valores bajos (P8). La turbidez y la conductividad se mantienen en valores similares, con algunos picos de valores provocados por los mismos puntos tanto en la conductividad (P10 y P8) como en la turbidez (P4).

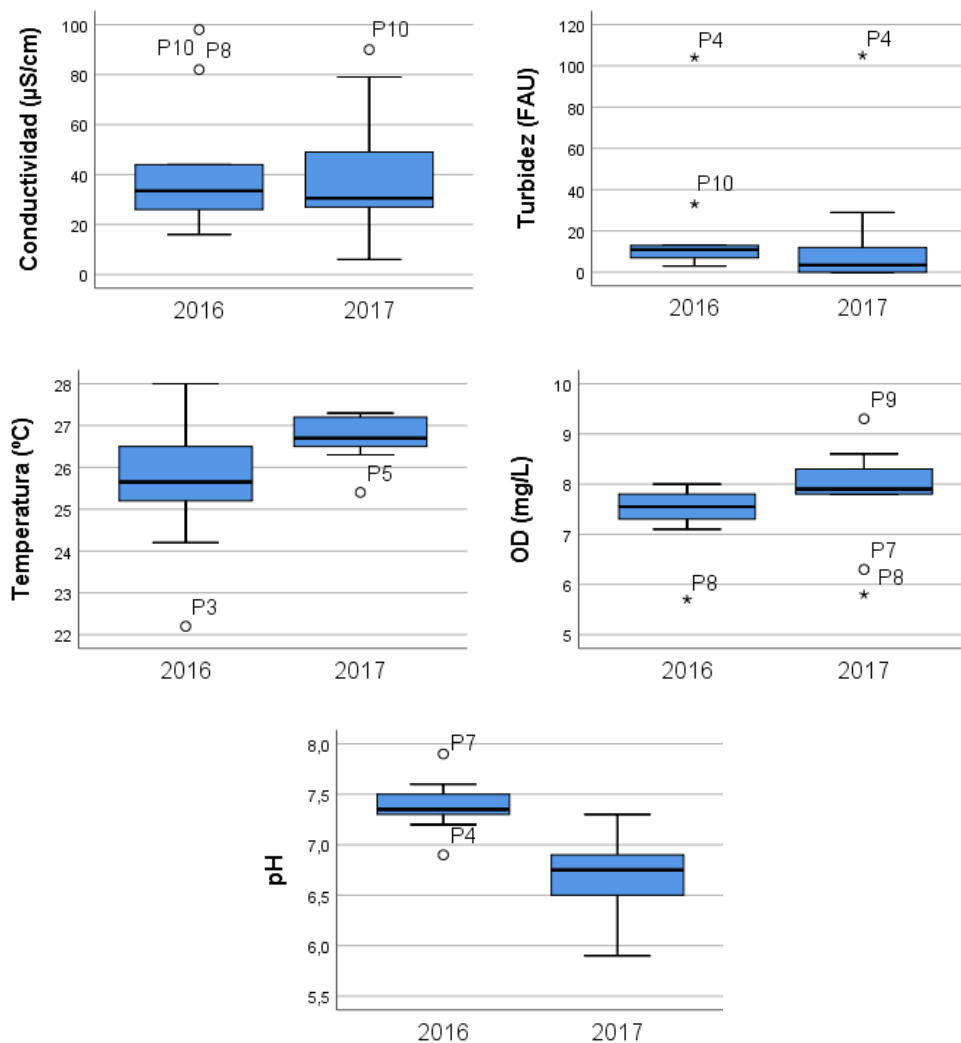


Figura 21. Comparación de los parámetros físico-químicos medidos en los dos periodos de muestreo. Conductividad en $\mu\text{S}/\text{cm}$; Turbidez en Unidades de Atenuación de Formacina, FAU; Temperatura en $^{\circ}\text{C}$; Oxígeno disuelto (OD) en mg/L .

3.5.2. Concentración de metales

En cuanto a la variación de las concentraciones de metales, observamos una ligera disminución en las concentraciones entre los dos años, para aluminio y hierro (Figura 22) así como de níquel, manganeso, titanio, plomo y cobre (Figura 23). Por otra parte, hay otros metales que amplían el rango de los valores en 2017 respecto a 2016, como son magnesio, zinc y cadmio. La variación de las concentraciones del resto de metales es muy baja. En cuanto a valores extremos, se mantiene el máximo de aluminio en el punto P4, de potasio en el P8, y de Manganeso en el P1.

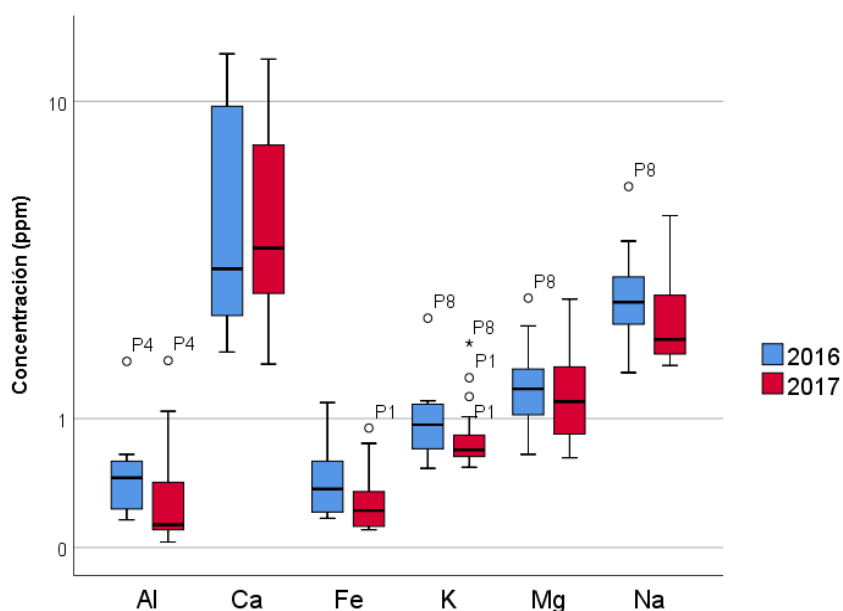


Figura 22. Comparación de las concentraciones de los metales con concentraciones mayores (ppm). Se presentan las concentraciones en escala logarítmica para mejorar la visibilidad de los valores más bajos.

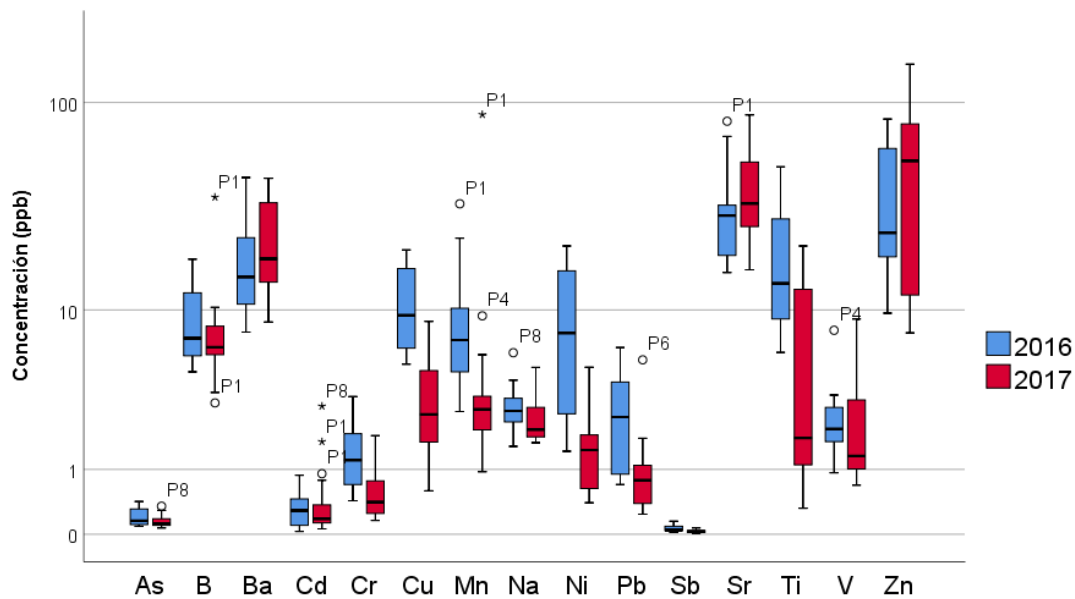


Figura 23. Comparación de las concentraciones de los metales con concentraciones menores (ppb). Se presentan las concentraciones en escala logarítmica para mejorar la visibilidad de los valores más bajos.

3.5.3. Macroinvertebrados

Remitiéndonos a la Tabla 8 sobre los diferentes índices calculados y medidos en los dos años de muestreo y, en relación al índice BMWP en el año 2016, se observa que cuatro de las 10 estaciones de muestreo presentaban una calidad muy buena del agua, mientras en 2017 solo uno de estos 10 puntos presentaba una calidad muy buena.

En cambio las proporciones de sitios de calidad resultaron distintas según el porcentaje de riqueza EPT. Éste muestra que siete de las 10 estaciones muestreadas en 2016 cuentan con calidad muy buena (>75%), dos con calidad buena (74%-50%), y una con calidad regular (49%-25%). Las estaciones muestreadas en 2017 contaban con calidad muy buena en seis de las 10 estaciones, tres con calidad buena y una con calidad regular. Por lo tanto según los taxones EPT, más relacionados con hábitats de corriente (que en algunos ríos resultan los hábitats más escasos y relevantes para la biodiversidad de macroinvertebrados), solo en uno de los 10 sitios la calidad fue regular tanto en 2016 como en 2017, pero en el resto fue buena o muy buena.

La variación del porcentaje de riqueza OCHD es dispar en los diferentes puntos. Los puntos P1 y P10 han sufrido un gran descenso (-18% y -35% respectivamente), mientras que los puntos P2 y P4 han experimentado un aumento considerable (+25% y +50% respectivamente). El resto de los puntos han experimentado variaciones menores en relación al porcentaje de riqueza OCHD.

En relación con la abundancia de familias, P4 no varía (6 familias) y solo aumenta en P8, P10 y P7 (+8, +4 y +1 familias respectivamente). En el resto de los puntos se observa una disminución.

Podemos observar en la Tabla 9 el resultado del análisis SIMPER, donde vemos que 3 familias del orden Ephemeroptera (Baetidae, Leptophlebiidae, Leptoxyphidae) acumulan un 62% de contribución sobre las diferencias de las comunidades de macroinvertebrados entre los dos años (22.21%, 20.13% y 19.55% respectivamente). Los cambios más significativos son la reducción de la media de abundancia de Leptoxyphidae (-22.8 individuos), de Elmidae (-6.5 individuos) y de Hydropsychidae (-5.1 individuos). Por otro lado, destaca el aumento de la media de abundancia de Philopotamidae (+5.16 individuos), seguida por el aumento de Glossosomatidae (+1.89 individuos). Aunque la tendencia general de estos y otros taxones con menor peso en el análisis SIMPER es decreciente, o de pequeñas variaciones positivas, dependiendo de las familias.

Tabla 9. Resultado del análisis SIMPER y que, mediante el test de distancia Bray-Curtis, nos aporta información relativa a la composición de la comunidad de macroinvertebrados, así como a las variaciones entre los dos años de muestreo.

Taxones	Desemejanzas medias	Contribución %	Contribución acumulativa %	Media 2016	Media 2017
Baetidae	15.65	22.21	22.21	30.6	26.7
Leptophlebiidae	14.18	20.13	42.34	27.7	24.6
Leptoxyphidae	13.78	19.55	61.89	33.5	10.7
Hydropsychidae	7.44	10.56	72.45	12.4	7.3
Elmidae	5.057	7.177	79.63	10.5	4
Chironomidae	4.39	6.231	85.86	8.47	4.6
Philopotamidae	2.3	3.264	89.12	1.54	6.7
Palaemonidae	1.44	2.044	91.17	1.53	0.7
Coenagrionidae	1.422	2.018	93.19	2.4	2.9
Glossosomatidae	0.7484	1.062	94.25	0.61	2.5

3.6. ANÁLISIS DE COMPARATIVA ESPACIAL

3.6.1. Parámetros físico-químicos

En la Figura 24 se presenta el gráfico de cajas y bigotes de los parámetros físico-químicos analizados, divididos entre los puntos de control y los impactados por minería. Sólo se han representado los parámetros conductividad y turbidez porque son los que presentaban una desviación estándar de los datos mayor (TURB 206.6 y COND 24.1). El resto de los parámetros (temperatura, oxígeno disuelto y pH) presentaban desviaciones estándar menores (1.4, 0.8 y 0.5 respectivamente) y estas diferencias no se aprecian en los gráficos de cajas con las dimensiones de los valores de los otros dos parámetros.

Se aprecia que la mediana de los valores de conductividad es ligeramente inferior en los puntos con minería, aunque estos presentan también valores extremos que duplican incluso los valores de los puntos de control. En cuanto a la turbidez, se ha omitido el valor extremo de turbidez de 1081 FAU (Unidades de Atenuación de Formacina), con el fin de poder representar la gráfica de manera más clara. Aun así, la mediana de los valores de los puntos con minería es mayor a la de los puntos de control, y cuenta también con valores atípicos y extremos por encima de los 100 FAU. Como se observa en la gráfica, tanto en la conductividad como en la turbidez, hay 3 puntos de muestreo que presentan valores extremos similares en las dos campañas de muestreo, y que corresponden al P4 en conductividad, y al P8 y P10 en turbidez.

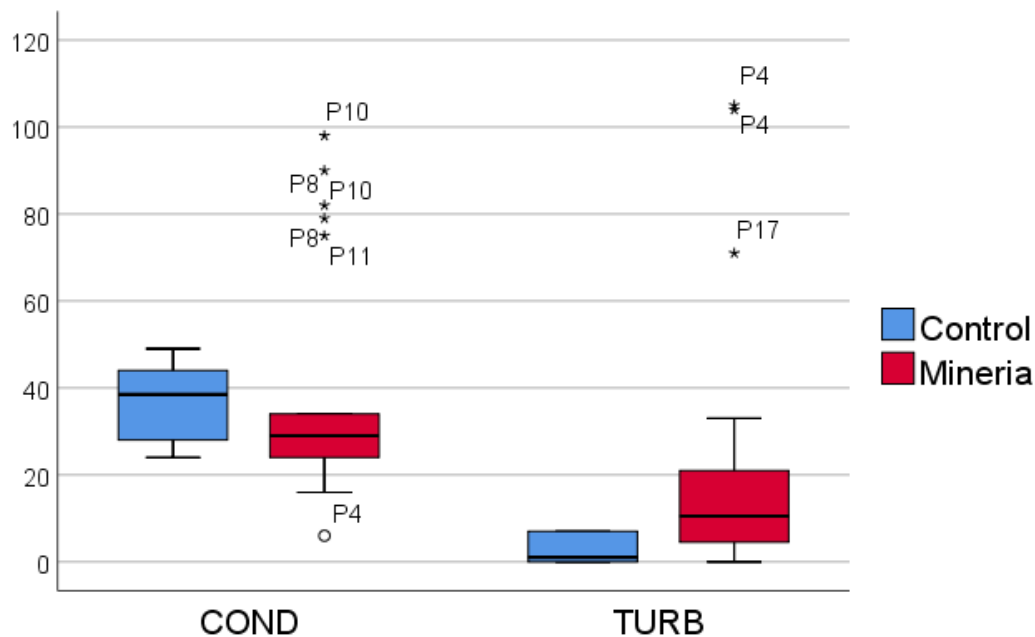


Figura 24. Diagrama de cajas y bigotes de los parámetros físico-químicos medidos, y diferencia entre los de puntos de control y los de zonas mineras. Los parámetros son conductividad (COND, $\mu\text{S}/\text{cm}$) y turbidez (TURB, FAU).

En cuanto a los resultados del test ANOVA, estos indican que las diferencias entre los puntos de control y las zonas mineras no son significativas para ninguno de los parámetros ($P > 0,05$)

3.6.2. Concentración de metales

Si comparamos las concentraciones entre los puntos con minería y los puntos sin esta (Figura 25 y Figura 26) se observa que los rangos de valores son mayores en los puntos con minería, tanto en valores máximos como valores mínimos. Por otro lado, se observa que las medianas de los valores de zonas con minería y sin ella no distan mucho en la mayoría de metales, a excepción del cobre, titanio y zinc. También llaman la atención los puntos P4, P8 y P3, que presentan valores extremos para más de un metal. En el grupo de puntos de control, el punto P1 muestra algunos valores extremos para calcio y estroncio, en comparación con el resto de los puntos de control.

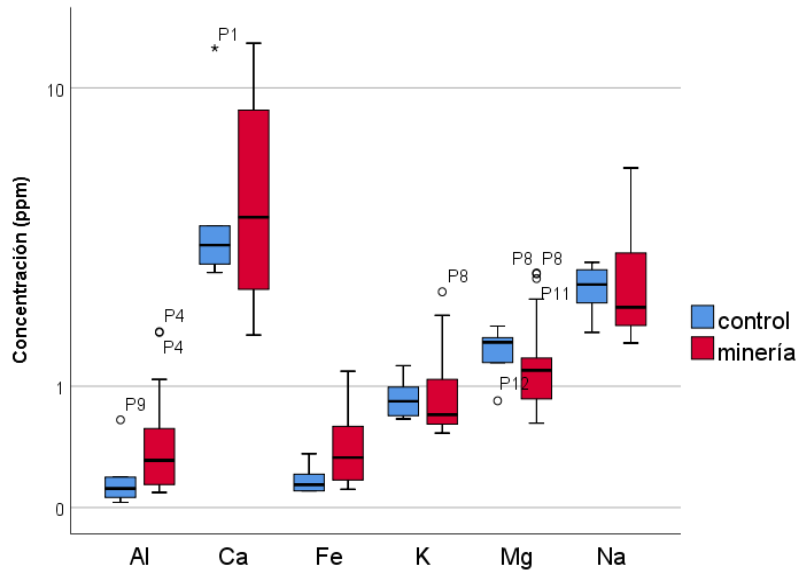


Figura 25. Comparación de los valores de concentraciones (ppm) entre los puntos de control y los puntos con minería.

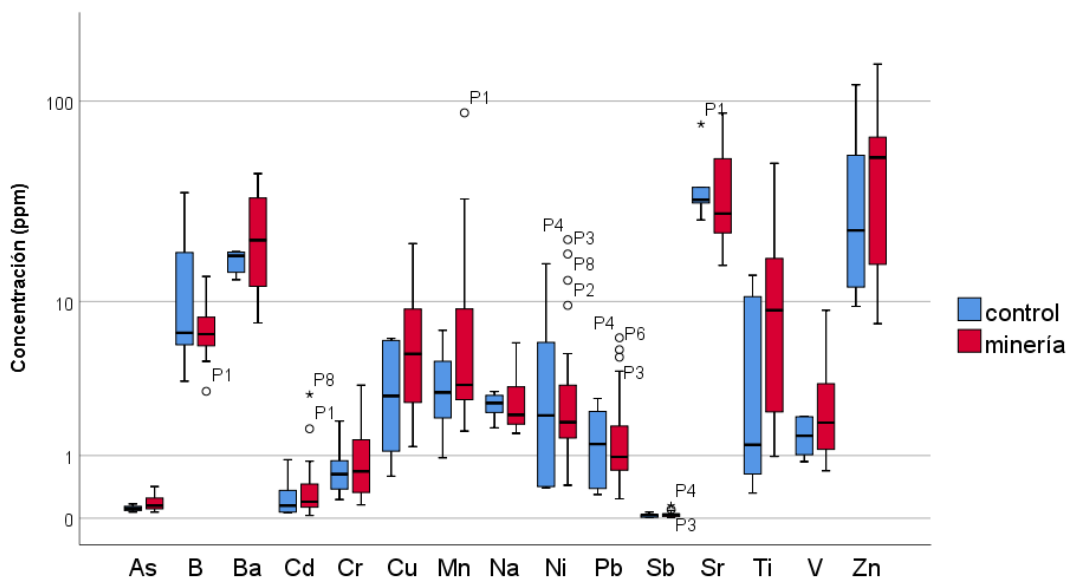


Figura 26. Comparación de los valores de concentraciones (ppb) entre los puntos de control y los puntos con minería.

Los resultados del test ANOVA indican que las diferencias entre las concentraciones de metales en puntos con minería y puntos de control no es significativa ($p > 0,05$).

3.6.3. Macroinvertebrados

Para evaluar las diferencias entre las estaciones con minería y sin ella en lo que respecta a los macroinvertebrados, se han hecho dos gráficos de cajas y bigotes, uno con la abundancia de familias presentes en cada punto (Figura 27) y otro con los valores del índice BMWP-Col (Figura 28). Los índices EPT y OCHD no tienen diferencias apreciables en los gráficos de cajas y bigotes, así que se procederá a analizarlos solo mediante el test ANOVA.

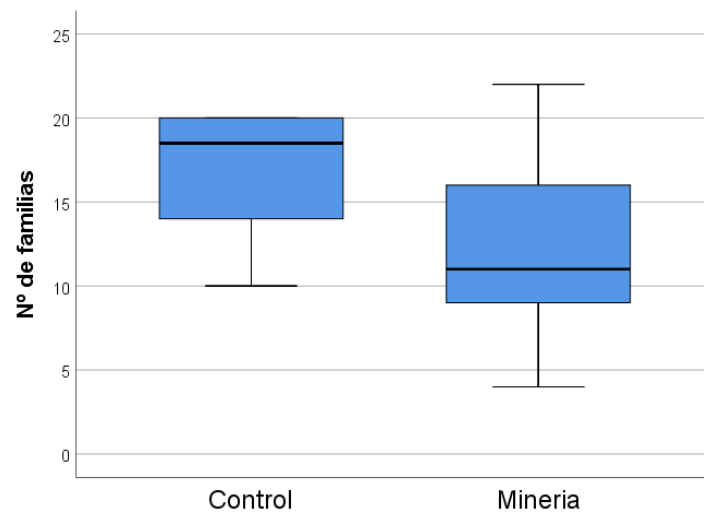


Figura 27. Comparación de la abundancia de familias de macroinvertebrados entre puntos de control y puntos con minería.

Se observa claramente que los puntos de control acumulan un mayor número de familias por punto, así como valores del índice BMWP-Col generalmente más altos que el grueso de los puntos con actividad minera. Aunque se observan valores máximos tanto en número de familias (22) como en valor del índice BMWP-Col (163) en un punto con minería (P3), esto solo supone una excepción dentro de la tendencia de los puntos con minería.

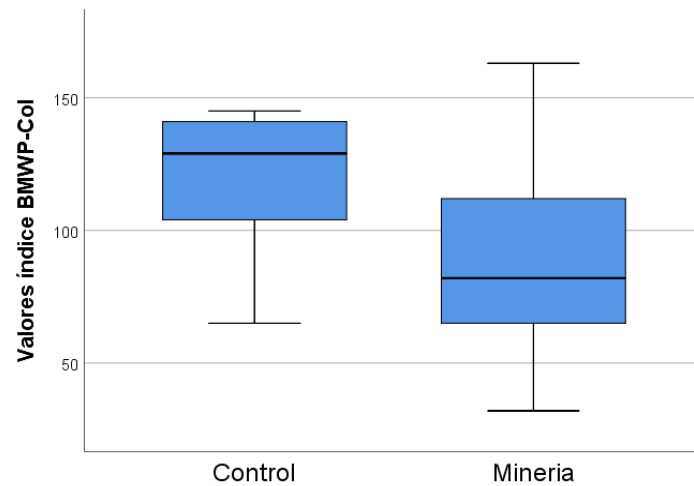


Figura 28. Comparación de los valores del índice BMWP-Col entre puntos de control y puntos con minería.

En el siguiente mapa (Figura 29) se aprecian los cambios de valores del índice BMWP en los diferentes puntos de muestreo a partir de los colores de las figuras. Los cuadrados representan los puntos de 2016 y los círculos los de 2017. El color indica la calidad del agua según la leyenda que hay debajo de la figura.

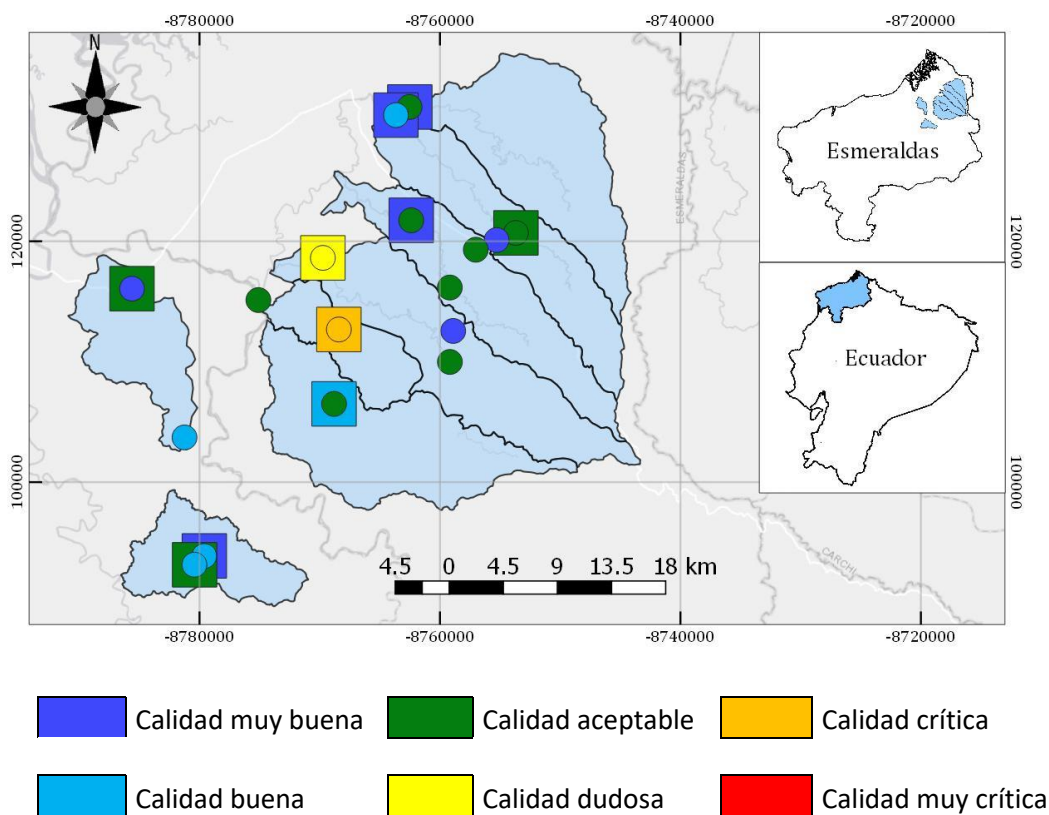


Figura 29. Mapa con los valores del índice BMWP correspondientes a cada punto de muestreo y año. Los cuadrados representan los puntos de 2016 y los círculos los de 2017.

El resultado del test ANOVA indican que sólo los índices BMWP-Col y la Abundancia de Familias presentan diferencias significativas entre los puntos de control y los de minería ($p=0,042$ y $p=0,029$ respectivamente), mientras que los índices EPT y OCHD no presentan diferencias significativas en este análisis ($p>0,05$).

En relación a la abundancia de ejemplares según su tipo de respiración, en la Figura 30 se observa que hay una abundancia mayor de ejemplares con respiración aérea, branquial y por tegumentos en las zonas de control. Sin embargo, el resultado del test ANOVA indica que solo la diferencia de los ejemplares con respiración aérea es significativa ($p=0,023$), mientras que para los otros tipos de respiración no es significativa esta diferencia ($p>0,05$).

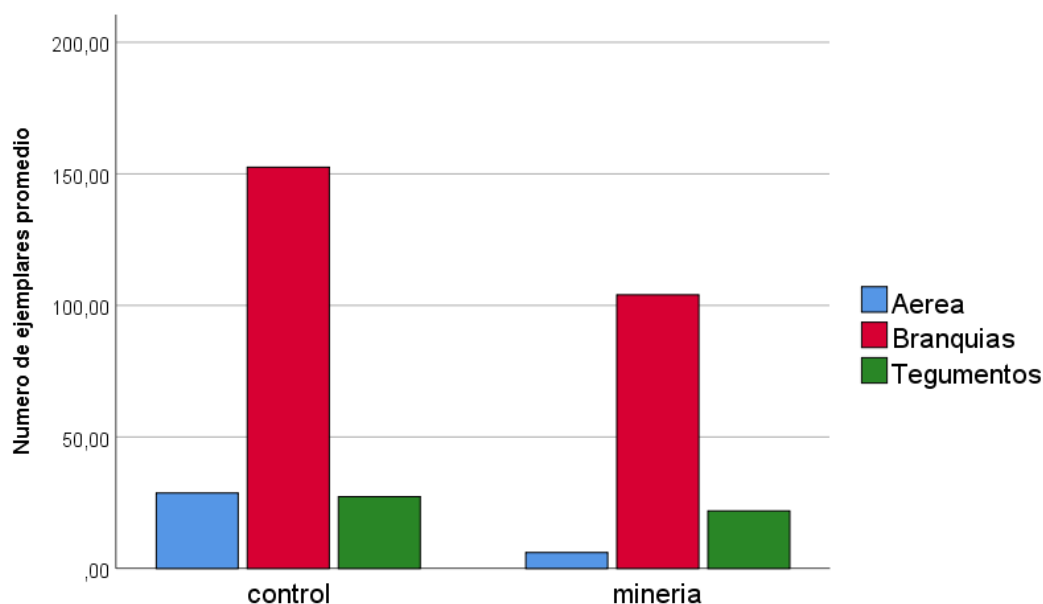


Figura 30. Promedio del n° de ejemplares por punto de muestreo, separados por tipo de respiración principal y diferenciando entre los puntos con minería y los puntos de control.

3.7. ANÁLISIS MULTIVARIANTE ENTRE VARIABLES DE HABITAT Y BIOLÓGICAS

La parte de las variables abióticas que se utilizaron para realizar los CA, la conforman los siete componentes principales resultantes de los PCAs. Las tres componentes de concentraciones de metales están correlacionadas positivamente con el hierro y el potasio (1met), positivamente con el cadmio y negativamente con

el níquel (2met) y negativamente con el aluminio y el bario (3met); y todas ellas acumulan el 87.14% de la variabilidad. Las componentes de los parámetros físico-químicos que acumulan el 79.02% de la variabilidad, están positivamente correlacionadas con la conductividad y el pH (1fq) y con el oxígeno disuelto (2fq). Los componentes de usos del suelo que acumulan el 76.34% de la variabilidad están positivamente correlacionados con los principales cultivos (pastizal, frutales, palma y cacao; usos1) y con el resto de cultivos indiferenciados en el segundo componente (usos2). Además, se añadió como variable la turbidez (TURB) y la concentración de zinc (Zn), que no fueron incluidas en los respectivos PCAs porque sus valores extremos dificultaban la reducción de las componentes principales de cada grupo de variables, pero que juegan un papel relevante en las posibles interrelaciones entre las comunidades de macroinvertebrados y los problemas derivados de la minería, por lo que deben estar representadas en los análisis.

En el primer CCA se relacionan las variables abióticas con los índices BMWP-Col, EPT% y OCHD%, además de la abundancia de familias en cada punto de muestreo (Figura 31). En él se observa que los puntos de control (en verde) se agrupan en su mayoría alrededor del centro del eje 1 (horizontal), y en la parte negativa del eje 2 (vertical). Los índices BMWP y Abundancia de familias aparecen relacionados positivamente con el primer componente de variables físico-químicas (1fq), pero alejados de cualquier punto de muestreo. Dicho componente 1fq se relaciona de forma directa con la conductividad y el pH. EPT por su parte, parece estar relacionado con los puntos P7 y un P4, mientras que OCHD está más próximo del otro P4, y con una ligera tendencia del tercer componente de los metales (3met; relacionado de forma negativa con el aluminio y el bario) hacia él. Por su parte, la turbidez (TURB) se encuentra en una posición ligeramente opuesta a los índices BMWP y Abundancia de familias. El zinc (Zn) se encuentra correlacionado negativamente con el primer eje del CCA, pero no se observa una relación negativa clara con las variables biológicas (como cabría esperar), aunque el vector apunta en una dirección muy distinta a los índices de calidad del agua (BMWP y Abundancia de Familias).

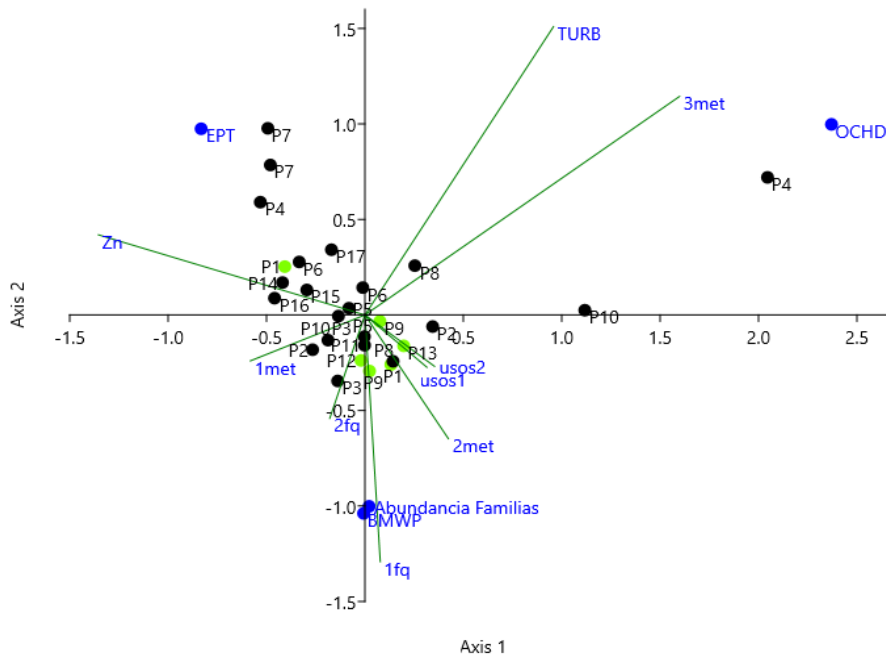


Figura 31. Resultado del CCA realizado entre las variables abióticas y los diferentes índices biológicos, donde aparecen con puntos azules el índice BMWP-Col (BMWP), el índice EPT% (EPT), el índice OCHD% (OCHD) y la abundancia de familias en cada punto (Abundancia Familias). Los vectores representan las variables abióticas (met1, met2, met3, Zn, 1fq, 2fq, TURB, usos1 y usos2; todas definidas en el inicio de este apartado), en negro los puntos de muestreo con minería, y en verde los puntos de muestreo de control.

En el 2º CCA se relacionaron todos estos factores abióticos con las abundancias de cada grupo de respiración principal (aérea, por branquias y por tegumentos) dando como resultado el que vemos en la Figura 32. En él podemos ver una clara relación entre respiración aérea y la componente 3met, correlacionada a su vez negativamente con el aluminio y el bario. La respiración por tegumentos aparece aislada del resto de variables y puntos, mientras que la respiración por branquias aparece muy relacionada con los puntos P7, P17 y P15, en el extremo negativo del eje 2, y cercano al centro del eje 1. La concentración de zinc por su parte, aparece totalmente opuesta a la abundancia de taxones con respiración aérea.

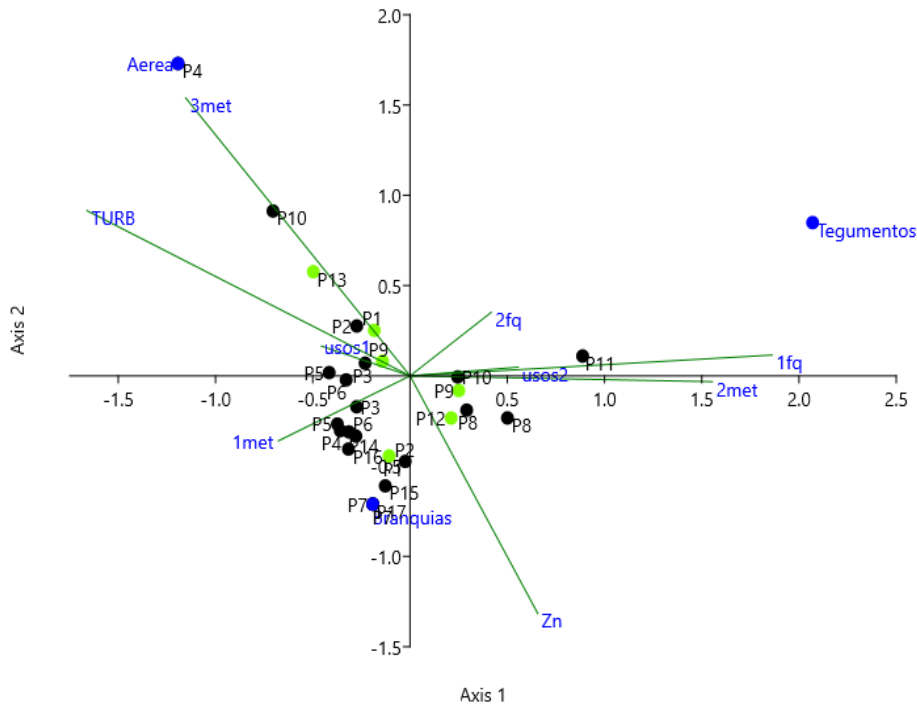


Figura 32. Resultado del CCA realizado entre las variables abióticas y los tipos de respiración principal. En azul los puntos representantes de las variables bióticas (Aérea, Branquias y Tegumentos), con los vectores las variables abióticas (met1, met2, met3, Zn, 1fq, 2fq, TURB, usos1 y usos2; todas definidas en el inicio de este apartado), en negro los puntos de muestreo con minería, y en verde los puntos de muestreo de control.

En cuanto a los resultados del DCA, en el primero de ellos se relacionan las variables abióticas con los diferentes índices biológicos (BMWP-Col, EPT%, OCHD% y Abundancia de familias; Figura 33). Las variables de usos del suelo se agrupan en el mismo cuadrante que OCHD, aproximadamente en la misma dirección. En este análisis, la turbidez (TURB) aparece negativamente relacionada (totalmente opuesta) a los índices BMWP y Abundancia de Familias. En la parte negativa del eje 1 encontramos las variables BMWP-Col y Abundancia de Familias. Las componentes 1fq (conductividad y pH) y 2met (correlacionada principalmente con el cadmio y negativamente con el níquel) no tienen gran peso en el análisis y se encuentran cerca del eje de coordenadas. Por su parte, EPT se encuentra casi alineada en el mismo cuadrante con la componente 2fq (oxígeno disuelto) y con el zinc.

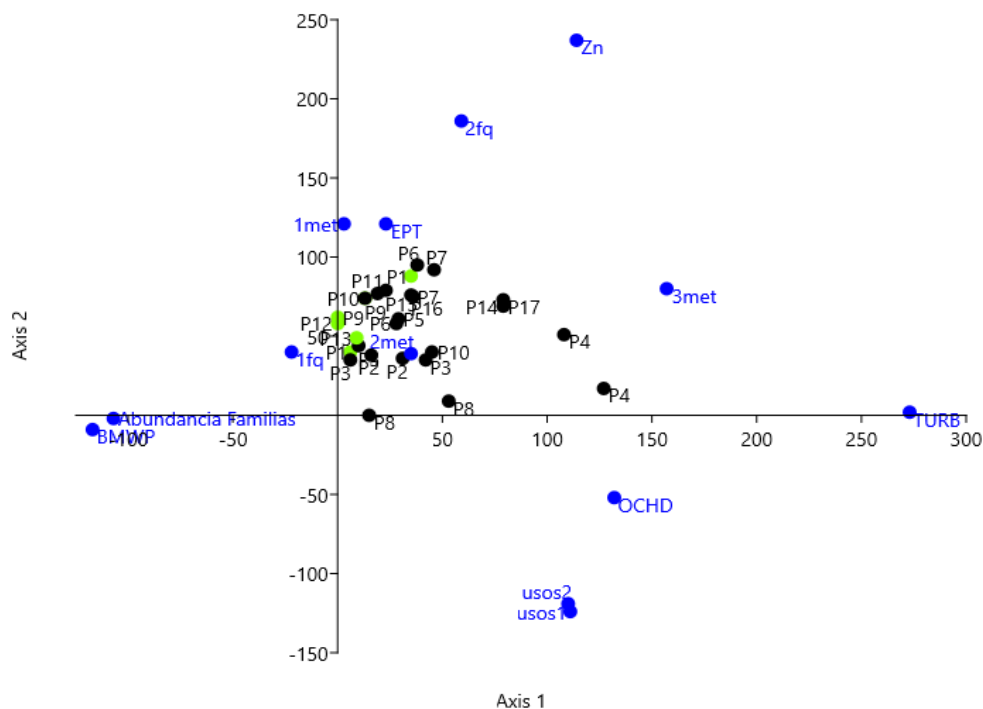


Figura 33. Resultado del DCA que relaciona las variables abióticas con los índices biológicos (BMWP-Col, EPT%, OCHD%, Abundancia de Familias). En azul el conjunto de variables bióticas y abióticas (todas definidas en el inicio de este apartado), en negro los puntos de muestreo con minería y en verde los puntos de control.

Si analizamos la posición de los puntos de muestreo respecto al eje principal de la resultante del DCA, observamos en el siguiente gráfico de cajas y bigotes (Figura 34) que los puntos de control se agrupan cerca del inicio del eje 1, mientras que el resto de puntos se encuentran más dispersos.

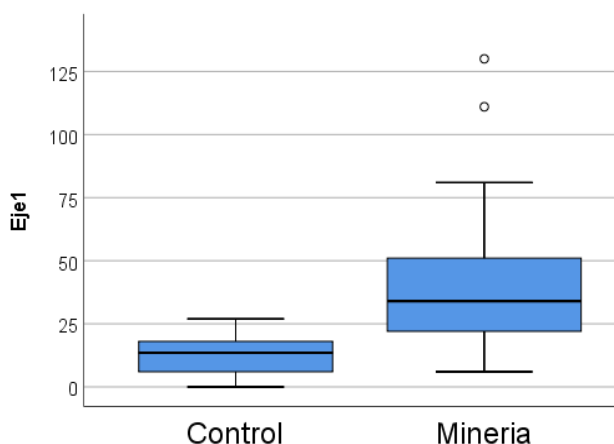


Figura 34. Posición de los puntos de muestreo respecto al eje 1 de DCA hecho con los índices biológicos, diferenciando entre puntos de control y mineros.

En el segundo DCA se relacionan las variables abióticas con los tipos de respiración (Figura 35). La turbidez se encuentra opuesta a la respiración por tegumentos y a la respiración aérea, a diferencia de lo que mostraba el CCA (Figura 32). Del mismo modo, usos1 (correlacionada con diferentes usos agrícolas) y turbidez se encuentran ligeramente opuestos a los tipos de respiración aérea y por tegumentos. Por otro lado branquias se encuentra opuesto a usos2 (frutales indiferenciados), y 3met (correlacionado de manera negativa con el aluminio y el bario) se encuentra en una posición intermedia y contrapuesto a la respiración por branquias y por tegumentos.

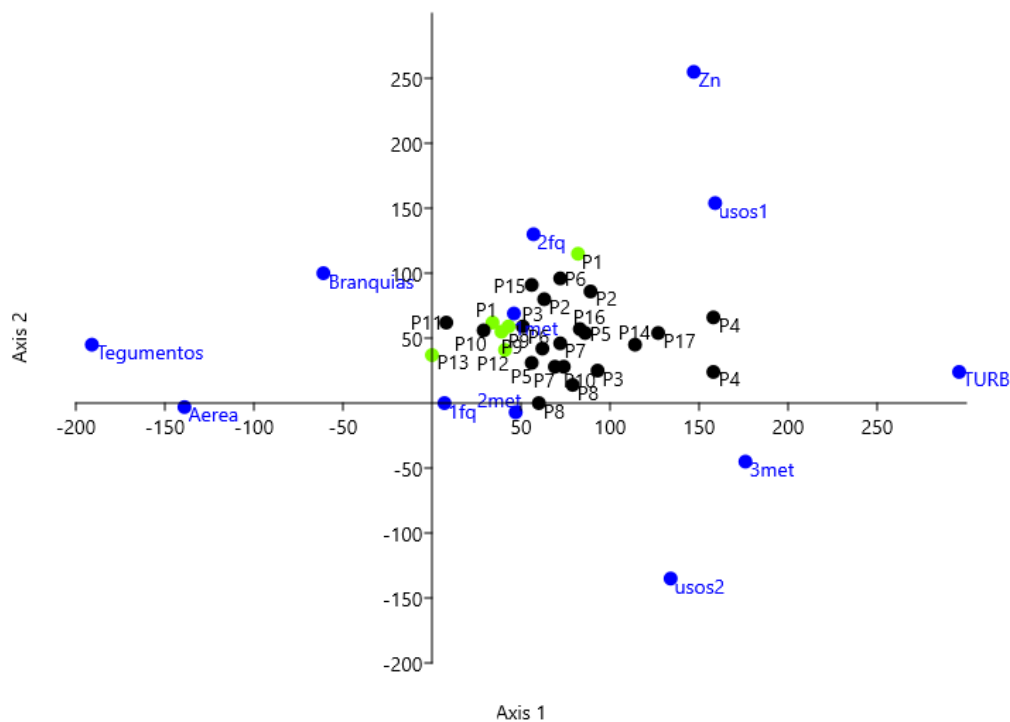


Figura 35. Resultado del DCA entre las variables abióticas y los diferentes tipos de respiración (Aérea, Branquias y Tegumentos). En azul el conjunto de variables bióticas y abióticas, en negro los puntos de muestreo con minería y en verde los puntos de control.

De nuevo se observa en este DCA una agrupación de los valores de correlación de los puntos de control con el eje 1 (Figura 36) y una diferenciación clara respecto al resto de puntos.

Índices Biológicos

Tipos de Respiración

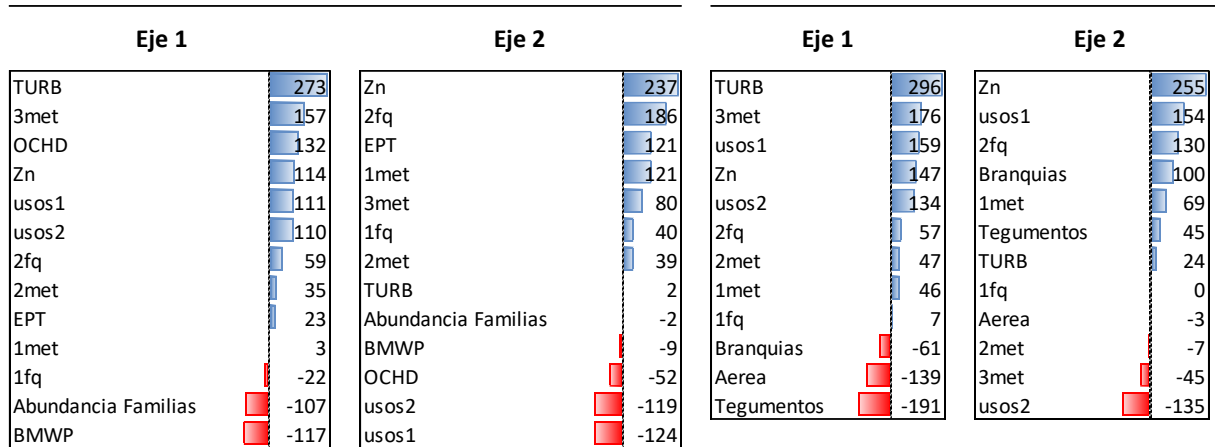


Figura 38. Valores de correlación de cada variable con los ejes de los dos análisis de correspondencias sin tendencia (DCA).

4. DISCUSIÓN

En relación a los usos del suelo, los datos obtenidos con herramientas cartográficas nos muestran que el tamaño de cuenca no es necesariamente determinante a la hora de evaluar el estado de calidad del agua en algunos de sus puntos. Aunque varios puntos de control tienen cuencas pequeñas (P12, 214 ha; P9, 499 ha; P13, 1458 ha), el punto P1 pertenece a la cuenca más grande de todas (17.045,6 ha) y también constituye un punto de control, al encontrarse libre de minería.

Al tratarse de una zona poco accesible y poco poblada, se entiende que más de del 75% del territorio esté compuesto por bosque natural. En la superficie restante compuesta mayoritariamente por pastizales y diferentes cultivos agrícolas, destacan importantes plantaciones de palma africana, un tipo de cultivo muy agresivo con el medio y que puede provocar el desplazamiento y desaparición de especies de flora y fauna autóctonas (Fitzherbert *et al.*, 2008; Koh & Wilcove, 2008).

Pese a no haber hecho mediciones de nutrientes, y pesticidas en las aguas, el cambio de cobertura vegetal sí puede tener efectos sobre la calidad de las aguas (Ahearn *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2008). Por eso, si en los análisis multivariantes existe relación entre los usos del suelo y algunos parámetros de las aguas, lo podremos achacar a la cobertura vegetal. Por ejemplo la relación que hay en el segundo DCA entre el tipo de respiración por tegumentos y aérea con los usos del suelo de tipo agrícola (usos1), cuyas posiciones en la gráfica son contrapuestas (Figura 35).

En cuanto a los parámetros físico-químicos, y como hemos visto en la Figura 17, muchos de los valores extremos de parámetros físico-químicos parecen estar muy relacionados con los puntos P4 (turbidez) y P10 (conductividad), que, junto al punto P8, coinciden con algunas de las zonas más deterioradas por la actividad minera (PUCESE, 2012). Cabe mencionar el valor extremo de P4 por debajo del grueso de valores, en conductividad y sólidos totales disueltos, pese a tener un valor por encima del grueso en turbidez. Esto nos recuerda la independencia que hay entre las variables conductividad y sólidos totales disueltos, y la variable turbidez, con la que no hay relación directa (Wickramaarachichi *et al.*, 2013).

Además, respecto al valor extremo de turbidez registrado en el punto P14 (1081 Unidades de Atenuación de Formacina, FAU), este nos indica que en el momento del

muestreo se estaba llevando a cabo actividad minera aguas arriba de esa misma cuenca (según indicaciones del co-tutor del trabajo, Jon Molinero, experto en la región). El color anaranjado de las aguas nos indica que se estaba produciendo el lavado de suelo, pasando las fracciones más finas (arcillas) a viajar en suspensión en el agua. Esta actividad también se refleja en el pH bajo del agua respecto al resto de puntos (6.19), pero otros parámetros como el oxígeno o la conductividad no presentan valores anómalos.

Por último, cabe mencionar los valores de pH y turbidez del punto P4. Llama la atención que, en los dos años de muestreo, este punto presenta los valores más bajos de pH (6.91 en 2016 y 5.94 en 2017), así como los más altos de turbidez sin contar el valor extremo del punto P14 (104 FAU en 2016 y 105 FAU en 2017). Estos valores indicativos de, al menos, “peor calidad de las aguas” que el resto, fueron reafirmados por las mediciones de otros parámetros como veremos más adelante.

Haciendo referencia a las concentraciones de metales, hay varios de ellos, en diversos puntos, que superan los límites de concentración según la legislación de Ecuador. Y lo que podemos observar es que, de nuevo, muchos de los valores extremos en metales, pertenecen a los puntos P4, P8 y P10. Esto nos relaciona con los resultados de los parámetros físico-químicos, para los que estos puntos contaban con valores extremos en conductividad y turbidez.

Las fuentes de las concentraciones anómalas de muchos metales pueden ser antrópicas y ligadas a actividad minera (Mn, Pb, As, Cd, Cu), del mismo modo que hay otros ligados a aguas residuales (Zn). Esto encaja con que la mayor concentración de manganeso registrada (89.5 ppb) se produjera en el punto P14, en el que había actividad minera en el momento del muestreo. De todos modos, no se han encontrado evidencia que indiquen la presencia de betas de tierra ricas en este metal y que pudieran explicar que aumente la concentración en momentos de actividad minera.

En cuanto a la contaminación por aguas residuales, los puntos con más asentamientos aguas arriba son P4 (tres parroquias) y P8 (una parroquia), y que tienen concentraciones de zinc de 83.6 y 63.8 ppb, respectivamente, en 2016, y de 8.69 y 9.19 ppb en 2017. Por tanto, estas concentraciones tan distintas entre años no parecen atribuibles a vertidos urbanos, que serían más constantes o regulares,

sino más bien dependientes de variaciones de caudal de los ríos y de lavados puntuales de masas de tierra rica en este mineral.

Sin embargo, los valores altos de algunos metales se pueden asociar a concentraciones altas de origen natural características de los suelos tropicales (Al y Fe; Manahan, 1997), y que pueden dar lugar a confusión, al parecer obra de procesos antrópicos.

En relación con los datos de macroinvertebrados, los ejemplares con tipo de respiración atmosférica y branquial provienen en su mayoría de puntos de control, como vimos en la Figura 30. Era de esperar que las zonas con mejor calidad de aguas tuvieran mayor número de ejemplares con respiración branquial. También lo era el que las especies con respiración aérea, propias de zonas con menor calidad, se encontraran principalmente en las zonas con impacto por minería, pero no fue así.

Las branquias de los macroinvertebrados son una de las partes más dañadas cuando se da una alteración en el medio (Skinner & Bennett, 2007). Esto ocurre porque son estructuras con una gran superficie de contacto con el agua y por tanto propensas a acumular compuestos y gases, así como a la abrasión y desgaste por material particulado. Las especies con respiración aérea, en cambio, no tienen ese inconveniente por el hecho de que obtienen el oxígeno de la atmósfera. Es por eso que no se ven tan afectadas por el oxígeno disuelto en el agua, y son las más tolerantes a vivir en zonas con hipoxia (Chapman *et al.*, 2004). Por su parte, las especies con respiración cutánea o por tegumentos, presentan un rango muy grande de tolerancia a la falta de oxígeno y al resto de perturbaciones.

Como no hay una diferencia clara de oxígeno disuelto entre puntos de control y con minería, podemos suponer que la distribución de individuos según los tipos de respiración, no se ve afectada por la cantidad de oxígeno disuelto como por otros parámetros.

4.1. ANÁLISIS DE COMPARATIVA TEMPORAL

En cuanto a las variaciones de los parámetros físico-químicos, nos centramos en que hay una disminución global del pH entre 2016 y 2017. Sorprende esta situación, si entendemos que la disminución de pH puede estar causada por el aumento de la

concentración de cationes de algunos metales, o el aumento de dióxido de carbono en el agua; y en cambio las concentraciones de la mayoría de los metales ha disminuido, y el oxígeno disuelto ha aumentado en promedio. Podemos suponer que ha habido algún proceso desconocido por el que se ha producido una bajada general del pH en prácticamente todas las cuencas, y además en el punto P4 (tanto en 2016 como en 2017) ha habido algún otro proceso o una interacción química que ha hecho que su pH fuese menor que el del resto de puntos.

La alta turbidez continuada hace pensar que la actividad minera es más intensa o más constante en esta cuenca, y un proceso que podría estar produciendo la bajada más acusada de pH podría ser la oxidación de piritita (FeS_2), responsable de causar acidificación de las aguas al reaccionar con esta y producir compuestos ácidos (Manahan, 1997).

En la disminución de la concentración de algunos metales, se observa que en muchos casos, siguen quedando valores extremos que equivalen o se aproximan, al límite máximo de las concentraciones de ese metal en 2016. Es decir, se aprecia que ha habido una reducción de las concentraciones de metales generalizada, exceptuando los puntos con valores extremos, que se encuentran a niveles similares de 2016.

La disminución generalizada tanto de abundancia de familias como de los valores del índice BMWP-Col pueden achacarse parcialmente a unas fuertes lluvias registradas en la zona días antes de la campaña de muestreos de 2017, ya que pueden existir cambios en la composición de las comunidades hasta 30 días después de fuertes perturbaciones, aproximadamente (Vimos *et al.* 2017). A pesar de no disponer de datos meteorológicos ni hidrológicos de los días anteriores, disponemos del testimonio de varios de los habitantes de la zona, que hablan de caudales con un nivel de agua de hasta 3 metros superiores al del día del muestreo.

4.2. ANÁLISIS DE COMPARATIVA ESPACIAL

Exceptuando los valores extremos que experimentan conductividad y turbidez, el grueso de los valores de las variables de los parámetros físico-químicos en las zonas de control y mineras se halla en rangos no muy diferentes. En el caso de la turbidez, hay puntos de zonas mineras donde esta es igual a cero. No nos ha de extrañar

teniendo en cuenta la capacidad de recuperación frente a las alteraciones que presentan los ríos. Por ejemplo, una cuenca como a la que pertenece el punto P10, presentaba en el muestreo de 2016 una turbidez de 33 unidades de turbidez FAU, mientras que en 2017 este valor descendió hasta 0 FAU. A pesar de seguir superando límites de algunos metales, parece indicar que no ha habido actividad minera en la zona desde hace un tiempo, y que ha bastado para eliminar la turbidez del agua (así como disminuir la concentración de algunos metales).

Las diferencias de concentración de metales principales entre los dos grupos de valores, podría achacarse a la diferente cantidad de puntos de uno y otro tipo; mientras hay 21 valores de puntos con minería, hay 6 valores de puntos de control. A pesar de esta variabilidad asumible por la diferencia entre número de muestras, sí que hay que mencionar los puntos mineros con los valores extremos P4 y P8, que han destacado a lo largo de todos los análisis realizados.

A parte de ello, la falta de diferencias claras entre las concentraciones de metales puede deberse a la riqueza de metales y minerales que hay en los materiales aluviales (DINAGE, 2012) y que son movilizados fácilmente, como por ejemplo el zinc (Reddy & DeLaune, 2008). Es posible que las pequeñas diferencias entre concentraciones de zonas mineras y de control se deban a lavados de suelo puntuales y que movilizan algún metal (como el caso de la concentración de Mn en el punto P14), y también a diferencias puntuales en la composición química de las laderas de cada cuenca.

En cuanto a diferencias de comunidades de macroinvertebrados, se observa que hay dos índices cuyos valores varían más entre los puntos de control y los mineros, que son el índice BMWP-Col y la abundancia de familias. Los índices EPT y OCHD no nos aportan mayor información en cuanto a las diferencias entre zonas mineras y de control. Por tanto, pensamos que será más interesante analizar en los análisis multivariantes la relación entre los índices BMWP-Col y abundancia de familias y el resto de variables.

4.3. ANÁLISIS MULTIVARIANTE ENTRE VARIABLES DE HABITAT Y BIOLÓGICAS

Todos los análisis de correspondencias constatan la contraposición de la variable turbidez a las variables biológicas más representativas. Es el caso del índice BMWP y de la Abundancia de Familias, contrapuestos en los extremos del eje 2 en el CCA (Figura 31) y más claramente en los extremos del eje 1 en el DCA (Figura 33).

En relación a los tipos de respiración y la turbidez, esta aparece parcialmente opuesta a las variables de respiración por tegumentos y por branquias en el CCA (Figura 32), mientras que en el DCA (Figura 35) esta contraposición resulta más evidente. La relación de la turbidez con la variable de respiración aérea varía de un análisis a otro. Mientras en el CCA parecen tener una posición próxima, en el DCA aparecen completamente contrapuestos. Cabría esperar que el resultado del DCA, en este caso, fuera más aproximado, ya que la variable de respiración aérea hace referencia al número de ejemplares con este tipo de respiración, y no a su proporción respecto al total.

En cuanto a los metales con concentraciones por encima de los límites legales, la relación de las componentes conformadas por estos metales, junto con las variables biológicas, nos confirma la toxicidad de dichas concentraciones. Tanto el índice BMWP como la Abundancia de Familias, se encuentran en cuadrantes opuestos a la concentración de zinc y de hierro (1met) en el DCA (Figura 33); y en el mismo cuadrante que 2met (correlacionado negativamente con el plomo y el cobre) en el CCA (Figura 31). Por su parte, la variable de ejemplares con respiración aérea se encuentra muy correlacionada con 3met (variable correlacionada a su vez negativamente con la concentración de aluminio) y totalmente contrapuesta a la concentración de zinc (Figura 31).

Esto nos apunta a que existe una tendencia a la baja en los valores de algunas variables biológicas como el índice BMWP, la Abundancia de Familias o la abundancia de ejemplares con respiración aérea; relacionada con el aumento (a niveles tóxicos) de las concentraciones de algunos metales como aluminio, hierro, cobre, plomo o zinc.

En relación a la distribución de los puntos de muestreo en los gráficos de los análisis de correspondencias sin tendencia (DCA), se ha demostrado que existen diferencias entre los puntos de control y los puntos con minería. Como se puede ver previamente en las Figura 34 y Figura 36, existe una agrupación de los puntos de control entorno al cero del eje 1.

Esto se entiende si nos fijamos en que la parte negativa de este eje se encuentran las variables asociadas a la calidad del agua (tanto BMWP y la Abundancia de Familias, como las abundancias de ejemplares según su tipo de respiración), mientras en el otro extremo se encuentra la variable turbidez, seguida de concentraciones de metales como el zinc y el aluminio, o variables de uso del suelo asociadas a cultivos agrícolas. De hecho, se observa cómo en estos DCAs, los puntos de muestreo más correlacionados con el eje 1 son aquellos con peor calidad de aguas según los datos de los análisis físicos, químicos y biológicos.

Como ya se ha comentado previamente, el componente con mayor información acumulada del conjunto de parámetros físico-químicos (1fq) no tiene demasiado peso en varios de los análisis, quedando siempre entorno al cruce de los ejes. Esta situación llama la atención, por el hecho de que en 2017 se registró una bajada generalizada de pH de cerca de 0.8 puntos y sin embargo la componente que contiene la variable de pH (1fq) no presenta un peso suficiente en los análisis que pueda relacionar este suceso con cambios en las comunidades de macroinvertebrados.

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se han conseguido los objetivos planteados de caracterización de la calidad del agua y los parámetros que mejor reflejan las alteraciones, comparación temporal de los parámetros físico-químicos y biológicos, comparación de los mismos parámetros entre puntos con minería y puntos de control, y relacionar las variables de hábitat con las diferencias observadas en la comunidad de macroinvertebrados. En resumen, los resultados obtenidos se pueden resumir en las siguientes conclusiones.

(1) Las aguas del conjunto de puntos se caracterizan sin duda por tener una fuerte carga mineralógica y de metales, consecuencia de la riqueza propia de estos suelos de origen volcánico y alta pluviosidad. Si bien las concentraciones se puede ver aumentadas cuando se produce el lavado del suelo en las minas. Algunas de las variables que destacan en estos casos son la turbidez y las concentraciones de calcio, cobre o manganeso. Las altas concentraciones de hierro y aluminio de forma natural pueden llevar a equivocación al atribuírseles en cualquier ocasión a la actividad antrópica.

(2) La comparación temporal indica que ha habido una disminución generalizada de los índices BMWP respecto a la campaña anterior, acompañada de una disminución del pH prácticamente en todos los puntos, y una bajada considerable de las concentraciones de algunos metales destacando el cromo, cobre, manganeso, níquel, plomo y titanio. No se puede asegurar el origen de estas variaciones, aunque cabe esperar que influyeran los periodos de lluvia torrencial ocurridos días antes de la campaña de 2017. Al ser una comparación con pocos valores en un espacio de tiempo de un año, el resultado de la evolución debe tomarse con mucha cautela.

(3) En cuanto a las diferencias principales entre puntos con minería y puntos de control, destaca la variable de turbidez; además, las concentraciones de los metales cobre, titanio y zinc en las zonas con minería son ligeramente superiores respecto a las zonas de control. La característica de intermitencia de la actividad minera puede entorpecer los análisis al tratarse de datos tomados en un momento puntual, ya que, exceptuando las variables biológicas, los efectos de la actividad minera son solo medibles entre unas horas y pocos días después de que se haya producido el lavado

de la tierra. En este sentido, el punto con minería en peor estado es el punto P4, que presenta los peores valores a nivel biológico, físico-químico y de concentraciones de metales. Esto nos indica que hay algún tipo de alteración constante que mantiene todos estos parámetros a esos niveles.

(4) En cuanto a la relación entre las variables de hábitat y las variables biológicas, los análisis multivariantes indican que las variables que más afectan a la composición de las comunidades de macroinvertebrados (en este caso abundancia de familias e índice BMWP), son en primer lugar la turbidez, y en segundo lugar las concentraciones elevadas de metales. Tanto la abundancia de familias como los valores del índice BMWP tienen una relación inversa clara con los niveles de turbidez. De manera más discreta, estos mismos índices biológicos se ven perjudicados por el aumento de las concentraciones de los metales que superan los umbrales aptos para la vida acuática que marca la legislación Ecuatoriana.

6. PRÓXIMOS PASOS EN LA INVESTIGACIÓN

Como ya se ha comentado, la falta de datos climáticos e hidrológicos marcó toda la investigación. Sería necesario el registro de, al menos, la actividad meteorológica de manera continuada en el tiempo en lugares representativos de las cuencas. Esto permitiría contar con información meteorológica fiable con la que poder analizar la influencia de factores hidrológicos.

Para poder encontrar más relaciones entre los procesos de minería y su respuesta en comunidades de macroinvertebrados, concentraciones de metales, y variación de parámetros físico-químicos, se debería continuar con esta investigación a lo largo del tiempo. Con pocos datos puntuales se hace difícil relacionar procesos de causa-efecto, por lo que sería imprescindible para llegar a comprender la problemática en su totalidad realizar muestreos incluso varias veces al año.

Una de las posibles soluciones sería colaborar con personal en las zonas clave para realizar un seguimiento más continuado. Por ejemplo, la turbidez del agua es el parámetro que más evidencia la actividad minera y puede ser medido incluso sin un gran equipo tecnológico, simplemente con un disco de *secchi*. Las muestras de agua podrían ser tomadas por este personal y almacenadas en neveras o congeladores hasta su recogida y análisis por parte del personal investigador. Otra alternativa sería buscar fondos de investigación para poder colocar registradores automáticos de nivel del agua, temperatura y turbidez, que darían datos con una frecuencia mayor.

Con esto se conseguiría, además, involucrar a los habitantes de estas zonas aisladas en la defensa de su patrimonio natural y la biodiversidad. Poniendo en valor la importancia de preservar un recurso esencial como es el agua de calidad, se llegaría a crear una conciencia ambiental que impulse el uso de los recursos naturales de manera sostenible.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Ahearn D.S., Sheibley R.W., Dahlgren R.A., Anderson M., Johnson J. y Tate K.W. (2005) Land use and land cover influence on water quality in the last free-flowing river draining the western Sierra Nevada, California. *Journal of Hydrology*, 313:234-247.
- Alba-Tercedor J. (1996) Macroinvertebrados acuáticos y calidad de las aguas de los ríos. IV Simposio del Agua en Andalucía (SIAGA). Almería. Vol II 1:203-213.
- Bell F.G. (1998) *Environmental Geology. Principles and practice*. Blackwell Scientific Ltd.
- Belmar O., Velasco J., Gutiérrez-Cánovas C., Mellado-Díaz A., Millán A. y Wood P.J. (2012) The influence of natural flow regimes on macroinvertebrate assemblages in a semiarid Mediterranean basin. *Ecohydrology*, 10:e1274. <https://doi.org/10.1002/eco.1274>
- Bonada N., Rieradevall M. y Prat N. (2007) Macroinvertebrate community structure and biological traits related to flow permanence in a Mediterranean river network. *Hydrobiologia* 589:91-106.
- Carrera C. y Fierro K. (2001) *Manual de monitoreo: los macroinvertebrados acuáticos como indicadores de la calidad del agua*. EcoCiencia. Quito.
- Chapman L., Schneider K., Apodaca C. y Chapman C. (2004) Respiratory ecology of macroinvertebrates in a swamp-river system of East Africa. *Biotropica*, Vol XXXVI 4:572-585.
- Correa M., Bolaños M., Rebolledo E., Rubio D., Salinas E. (2015) Análisis del contenido de metales en aguas, sedimentos y peces en la cuenca del río Santiago, provincia de Esmeraldas, Ecuador. *Investigación y Saberes*, 4(2):32-43.
- Dirección Nacional de Geología, DINAGE (2001) *Mapa Geológico del Ecuador*. Accesible en: <https://bit.ly/2JbpNzS> (Consultado el 10/07/18).

- Fitzherbert E.B., Struebig M.J., Morel A., Danielsen F., Brühl C.A., Donald P.F. y Phalan B. (2008) How will oil palm expansion affect biodiversity? *Trends in Ecology and Evolution*, Vol XXIII 10:538-545.
- Gómez-Pais, G. (2007) Análisis económico de las funciones ambientales del manglar en el Ecosistema Sabana-Camagüey. En: Alcolado P., *Ecosistema Sabana-Camagüey: Estado Actual, avances y desafíos en la protección y uso sostenible de la biodiversidad*, 159-164.
- Hill M. (1974) Correspondence analysis: a neglected multivariate method. *Applied Statistics*, Vol XXIII 3:340-354.
- Hill M. y Gauch H. (1980) Detrended correspondence analysis: an improved ordination technique. *Vegetation*, Vol XLII 1/3:47-58.
- Jáimez-Cuéllar P., Vivas S., Bonada N., Robles S., Mellado A., Álvarez M., Avilés J., Casas J., Ortega M., Pardo I., Prat N., Rieradevall M., Sáinz-Cantero C.E., Sánchez-Ortega A., Suárez M^a.L., Toro M., Vidal-Abarca M^a.R., Zamora-Muñoz C., Alba-Tercedor J. (2002) Protocolo GUADALMED (PRECE). *Limnetica*, Vol XXI 3-4:187-204.
- Koh L. y Wilcove D. (2008) Is oil palm agriculture really destroying tropical biodiversity? *Conservation Letters* 1:60-64.
- Legendre P. y Gallagher E.D. (2001) Ecologically meaningful transformations for ordination of species data. *Oecologia* 129:271-280.
- Li S., Gu S., Liu W., Han H. and Zhang Q. (2008) Water quality in relation to land use and land cover in the upper Han River Basin, China. *Catena*, 75:216-222.
- Manahan S.E. (1997) *Environmental sciences and technology*. CRC Press, Lewis Publishers.
- Martínez-Sanz C. (2013) *Guía para el reconocimiento de los principales grupos de macroinvertebrados fluviales de Esmeraldas (Ecuador)*. PUCESE-IGA-CID. Esmeraldas.
- Membiola P., Montes C y Martínez-Ansemil E. (1991) Características hidroquímicas de los ríos de Galicia (NW Península Ibérica). *Limnetica*, 7:163-174.

- Ministerio de Agricultura y Ganadería, MAG (2016) Mapa de cobertura y uso del suelo (escala provincial) años 2013-2014. Accesible en <https://bit.ly/2tmi4ZI> (Consultado el 6/12/17).
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, MAAMA (2013) Protocolo de cálculo del índice IBMWP. Centro de Publicaciones. Madrid.
- Ministerio del Ambiente del Ecuador, MAE (2015) Plan de manejo y gestión participativa de la reserva ecológica Mache Chindul 2005-2010. Quito.
- Morales C., Guevara J., Cornejo X. (2013) Sector Chocó Ecuatorial. En: Ministerio del Ambiente del Ecuador, Sistema de clasificación de ecosistemas del Ecuador continental. Ministerio del Ambiente del Ecuador, 37-39.
- Muñoz-Riveaux S., Naranjo-López C., Garcés-González G., González-Lazo D.D., Musle-Cordero Y. y Rodríguez-Montoya L. (2004) Evaluación de la calidad del agua utilizando los macroinvertebrados bentónicos como bioindicadores. Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, Vol IX 2:147-153.
- Pérez-Pompa N. E., Marañón-Reyes A.M., González-Marañón A., Rodríguez-Mendoza Y. y Naranjo-López C. (2012) Estudio de la correlación entre el índice biótico BMWP-Cub y parámetros físico-químicos en el río Gascón de Santiago de Cuba. Revista Cubana de Química, Vol XXIV 3:231-242.
- Pontificia Universidad Católica del Ecuador Sede Esmeraldas, PUCESE (2012) Informe final de monitoreo de calidad ambiental de los ríos de la cuenca del Santiago afectados por la actividad minera aurífera entre el periodo noviembre del 2011 a noviembre del 2012. Esmeraldas.
- Reddy R. y DeLaune R. (2008) Biogeochemistry of wetlands. Science and applications. CRC Press, Tylor & Francis Group.
- Rodríguez V., Robles N. y Pimentel Y. (2009) Calidad biológica del agua de los ríos Sábalo, Piña, Ponuga, Pocrí y Suay en la provincia de Veraguas, Panamá. Tecnociencia, 11:75-89.
- Sánchez M.J. (2005) El índice biológico BMWP (Biological Monitoring Working Party score), modificado y adaptado al cauce principal del río Pamplonita Norte de Santander. Bistua, Vol III 2:54-67.

- Skinner K. y Bennett J. (2007) Altered gill morphology in benthic macroinvertebrates from mercury enriched streams in the Neversink Reservoir Watershed, New York. *Ecotoxicology*, 16:311-316.
- ter Braak C. y Verdonschot P. (1995) Canonical correspondence analysis and related multivariate methods in aquatic ecology. *Aquatic Sciences*, 255-289.
- Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiental, TULSMA (2015) Libro VI, Anexo 1, Norma de Calidad Ambiental y de Descargas de Efluente: Recurso Agua. Ministerio del Ambiente de Ecuador, 1-55.
- United Nations (2015) Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development (A/RES/70/1).
- Urrego A. y Ramírez-R. J. (2000) Cambios diurnos de variables físicas y químicas en la zona de ritral del río Medellín, Colombia. *Caldasia*, Vol XXII 1:127-141.
- Vander-Vorste R., Corti R., Sagouis A. y Datry T. (2016) Invertebrate communities in gravel-bed, braided rivers are highly resilient to flow intermittence. *Freshwater Science*, Vol XXXV 1:164-177.
- Vieira N., Poff L., Carlisle D., Moulton S., Koski M. y Kondratieff B. (2006) A database of lotic invertebrate traits for North America. U.S. Geological Survey Data Series 187, <http://pubs.water.usgs.gov/ds187>
- Vimos-Lojano D.J., Martínez-Capel F. y Hampel H. (2017) Riparian and microhabitat factors determine the structure of the EPT community in Andean headwater rivers of Ecuador. *Ecohydrology*, 10:e1894. <https://doi.org/10.1002/eco.1894>
- Wickramaarachchi T., Ishidaira H. y Wijayarathna T. M. (2013) Streamflow, suspended solids and turbidity characteristics of the Gin River, Sri Lanka. *Engineer*, Vol XLVI 4:43-51.
- Zamora H., (1999) Adaptación del índice BMWP para la evaluación biológica de la calidad de las aguas epicontinentales en Colombia. *Unicauca-Ciencia*, 4:47-60.