

## Algas perifíticas en cuatro fuentes hídricas con diferente temporalidad post aprovechamiento minero a cielo abierto en Jigalito, Condoto, Chocó, Colombia

### Periphytic algae in four water source with different temporality post use to open pit mining in Jigalito, Condoto, Chocó, Colombia

Lady Vargas-Porras<sup>1\*</sup>, Giovanni Ramírez-Moreno<sup>2</sup>, Esnedy Hernández-Atilano<sup>3</sup> y J. Orlando Rangel-Ch<sup>4</sup>

Recibido: 25 de mayo de 2018.

Aceptado: 25 de octubre de 2020.

Publicado: diciembre de 2020.

#### RESUMEN

**Antecedentes:** La minería ilegal a cielo abierto es una de las actividades que más afecta los ecosistemas hídricos en Colombia y específicamente en Chocó (Jigalito, Condoto), generando cambios fisicoquímicos y biológicos aún desconocidos. **Objetivos:** Evaluar el comportamiento fisicoquímico del disturbio y la respuesta de la fracción perifítica en fuentes hídricas afectadas por minería. **Métodos:** Se realizaron mediciones *in situ* de variables fisicoquímicas y determinación de riqueza, diversidad y densidad de algas perifíticas en tres fuentes hídricas con diferente temporalidad de cese minero (minería actual, 5-10 y 30 años) y una fuente de referencia. **Resultados:** La minería tiene un efecto marcado en la concentración de nutrientes, material sólido suspendido y la temperatura, presentando un patrón de reducción desde estaciones con intervención actual hasta con 30 años de abandono. Se registraron 120 especies, 80 géneros, 51 familias, 34 órdenes y 13 divisiones, predominando *Frustulia romboides*, *Eunotia aff. minor*, *Ulothrix* sp. y *Frustulia* sp1. La minería reduce más del 50% de la riqueza (35) y la diversidad (1.5) de algas perifíticas con relación a estaciones sin intervención (72 y 3.3, respectivamente) y aunque durante los primeros 5 a 10 años de abandono, se inicia un proceso de restablecimiento (riqueza 49, diversidad 2.0), los efectos del disturbio se perciben aún a los 30 años de cese minero, donde a pesar del aumento en la riqueza (78), la diversidad no alcanzó el nivel inicial (2.7). **Conclusiones:** La recuperación post aprovechamiento minero es de largo alcance, dada la ruptura en la estabilidad de los procesos fisicoquímicos y biológicos que produce la actividad en los sistemas hídricos naturales.

**Palabras clave:** diatomeas perifíticas, disturbio minero, diversidad de algas, minería de oro, recuperación hídrica

#### ABSTRACT

**Background:** Illegal open pit mining is one of the activities that most affects water ecosystems in Colombia and the Chocó (Jigalito, Condoto), generating physical and chemical changes that are still unknown. **Goals:** To evaluate the physicochemical behavior of the disturbance and the response of the peripheral fraction in water sources affected by mining. **Methods:** *In situ* measurements of physicochemical variables and determination of the richness, diversity and density of periphytic algae were made in three water sources with different temporality of mining cessation (current mining, 5-10 and 30 years) and a reference source. **Results:** Mining has a marked effect on the concentration of nutrients, suspended solid material and temperature, presenting a reduction pattern from current intervention scenarios to 30 years of abandonment. There were registered 120 species, 80 genera, 51 families, 34 orders and 13 divisions, predominating *Frustulia romboides*, *Eunotia aff. minor*, *Ulothrix* sp. and *Frustulia* sp1. Mining reduces more than 50% of the wealth (35) and diversity (1.5) of periphytic algae in relation to non-intervention scenarios (72, and 3.3, respectively) and although during the first 5 to 10 years of abandonment, a process of restoration (wealth 49, diversity 2.0), the effects of the disturbance are perceived after 30 years of mining cessation, where despite the increase in wealth (78), diversity does not reach the initial level (2.7). **Conclusions:** The recovery after mining exploitation is far-reaching, given the break in the stability of physical and chemical processes that produces activity in natural water systems.

**Keywords:** diatomaceous periphyton, gold mining, mining disturbance, river restoration, diversity in algae species

<sup>1</sup> Componente Ambiental, Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico. Carrera 6 37-39 Huapango, Quibdó, 270001. Colombia

<sup>2</sup> Subdirección de Investigaciones, Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico, Colombia, Componente Ambiental. Carrera 6 37-39 Huapango, Quibdó, 270001. Colombia

<sup>3</sup> Grupo de Ecología Aplicada, Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia. Calle 67 53-108, Medellín, 050001. Colombia

<sup>4</sup> Instituto de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia. Carrera 45 26-85. Apartado 7495, Bogotá D. C., 110111. Colombia

#### \*Corresponding author:

Lady Vargas-Porras: e-mail: lvargas@iiaip.org.co

#### To quote as:

Vargas-Porras, L., G. Ramírez-Moreno, E. Hernández-Atilano & J. O. Rangel-Ch. 2020. Algas perifíticas en cuatro fuentes hídricas con diferente temporalidad post aprovechamiento minero a cielo abierto en Jigalito, Condoto, Chocó, Colombia. *Hidrobiológica* 30 (3): 189-202.

DOI:10.24275/uam/izt/dcbshidro/2020v30n3/Vargas

## INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas hídricos son dinámicos y soportan una gran diversidad biológica que se articula en una estructura trófica y en ella los productores primarios son los vértices iniciales, que involucran la incorporación de carbono en la transformación de energía. En consecuencia, el estado, distribución y comportamiento de dichos productores primarios, entre los que se encuentran las algas perifíticas, resulta importante para analizar las condiciones ambientales y ecológicas del entorno acuático, ya que pueden aportar información que permita inferir sobre el estado de las dinámicas biológicas, la ecología, la productividad y el nivel de intervención de un cuerpo de agua entre otros aspectos. De otro lado, la actividad minera desarrollada en Condoto-Chocó, Colombia, constituye uno de los principales agentes de afectación de los ecosistemas hídricos, teniendo en cuenta que dicha actividad es realizada a cielo abierto empleando maquinaria para remover el material del suelo, desviar cauces hídricos y utilizarlos como fuente de abastecimiento de agua y sitio de disposición final de los residuos del proceso, los cuales incluyen grandes cantidades de sedimentos, contaminantes químicos, metales, grasas y aceites; que son vertidos directamente, ocasionando la alteración de las características fisicoquímicas del agua y la degradación del ambiente, lo cual tiene un efecto en las algas perifíticas como lo han afirmado algunos autores como Martínez & Donato (2003), Díaz & Rivera (2004), Hernández *et al.* (2011), Zapata-Anzola & Donato-Rondon (2005), Ramírez & Plata-Díaz (2008), Rivera-Rondón & Donato (2008) y Montoya-Moreno & Aguirre-Ramírez (2008) entre otros, que han utilizado este grupo biológico para evaluar el nivel de afectación y la respuesta de los ecosistemas hídricos frente a distintos disturbios antrópicos.

Sin embargo, a pesar de los numerosos registros de estudios del uso de grupos específicos de algas como indicadores del estado de ecosistemas hídricos intervenidos por el hombre, es escasa la información en la cual se utiliza la comunidad algal y su estructura comunitaria para evaluar las alteraciones ocasionadas por la minería de oro a cielo abierto en el departamento del Chocó, donde las fuentes hídricas tienen una importancia que va más allá de la disponibilidad de agua únicamente para consumo, dado que brindan múltiples servicios ecosistémicos que incluyen el hábitat de una gran diversidad de especies que garantizan su seguridad alimentaria y la conexión biológica entre distintos ambientes, funcionalidad que se ha perdido como resultado de su transformación en ríos de lodo por acción de la minería. Esta situación se agrava no solo con la importancia ambiental que tiene el territorio que ha sido considerado como uno de los sitios con mayor biodiversidad a nivel mundial y neotropical (Rangel-Ch, 2004), donde la diversidad biológica está aún inexplorada y más en grupos como las algas perifíticas, sino que a esto se suman las dificultades de control por parte de las autoridades ambientales debido a la cultura de ilegalidad de esta actividad y la importancia de la minería como motor de desarrollo económico a nivel nacional y regional, lo que genera además su permanencia y la de sus impactos, los cuales actualmente presentan una problemática ambiental, social y de salud crítica en torno al recurso hídrico.

Teniendo en cuenta esta problemática y el vacío de información sobre los efectos del disturbio minero en el medio y la comunidad de algas perifíticas, su comportamiento en el tiempo, espacio y la información que aportan acerca del proceso de resiliencia de los ecosistemas hídricos, que son de gran importancia para el desarrollo de la región, la presente investigación busca responder a la pregunta ¿cómo cambia

la riqueza, densidad y diversidad de las algas perifíticas en fuentes hídricas afectadas por minería a cielo abierto con diferentes tiempos de abandono en Jigualito, Condoto, Chocó?, con lo cual se se espera generar información que dé cuenta del grado de afectación de las fuentes hídricas ante el impacto, así como el comportamiento de la fracción perifítica a estas intervenciones, permitiendo evaluar de manera dinámica la perturbación minera a nivel ecológico y la potencial recuperación en el tiempo de los cuerpos de agua intervenidos, información que servirá como base para la toma de decisiones encaminadas a restauración y bioindicación en áreas que presenten este tipo de disturbio, considerando la relevancia del tipo de ecosistemas para el desarrollo económico y sociocultural de las comunidades del departamento del Chocó y la predominancia de la minería a cielo abierto e ilegal como una de las principales actividades productivas en el territorio.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Área de estudio.** El estudio se realizó en el Distrito Minero del San Juan, puntualmente en el corregimiento de Jigualito (74 msnm), perteneciente al municipio de Condoto, Chocó y en la cabecera municipal de Cértegui, Chocó, Colombia (Fig. 1). Ambos se ubican en una zona que se caracteriza por representar un bosque pluvial tropical, donde la precipitación anual oscila entre 4,000 y 10,000 mm, la temperatura promedio es de 26°C y la humedad relativa supera el 80% (Poveda-M *et al.*, 2004). El territorio se encuentra en la zona de calmas ecuatoriales, así mismo está sometido a un régimen de lluvias muy intenso, por su ubicación, se le cataloga como “selva umbrófila-siempre verde”, con predominancia de baja altitud y bosque aluvial (IGAC & MMA, 2000) y con relativa intervención “mosaico antrópico”. El paisaje de la zona se ubica en el nivel de llanura aluvial meándrica (aluvial y fluvio-volcánica). Las principales actividades económicas de esta zona del departamento son la minería, la pesca, la agricultura a baja escala de maíz, arroz, yuca y frutales y el comercio.

**Métodos.** Se seleccionaron cuatro fuentes hídricas que permitieron la identificación de diferentes estaciones de muestreo con distintos tiempos de cese del disturbio. La primera correspondió a una fuente hídrica sin intervención minera, la segunda presentó entre 5 y 10 años de haber cesado la actividad, la tercera contó con más de 30 años de abandono de la actividad y la última presentó recepción actual de vertimientos mineros.

**Estaciones de muestreo.** Estación 0. Quebrada Pichirí: fuente hídrica sin intervención minera, localizada entre las coordenadas 5°1'N - 76°41' O y 5°01'N - 76°41' O, constituye la única fuente de la zona que no ha sido utilizada para la extracción de metales, presenta aguas corrientes y limpias con abundante vegetación ribereña. La cuenca tiene un área de 111.95 Ha (5.01 km<sup>2</sup>), una longitud de 1.97 km, ancho promedio de 0.57 km y se encuentra a 66-89 msnm.

Estación 1. Quebrada Sabaleta: fuente hídrica que presenta entre 5 y 10 años de haber cesado la actividad minera, ubicada entre 5°1'50 N - 76°41' O y 5°1'N - 76°41' O. Cuenta con cauce desviado e interrumpido en varios tramos que han sido convertidos en lagunas conectadas o desconectadas del cauce principal. Los distintos sectores presentan diferentes temporalidades de cese de intervención y variabilidad de condiciones físicas. Vegetación interrumpida en riberas que presentan procesos de sucesión temprana con predominio de Gramíneas y Cipe-

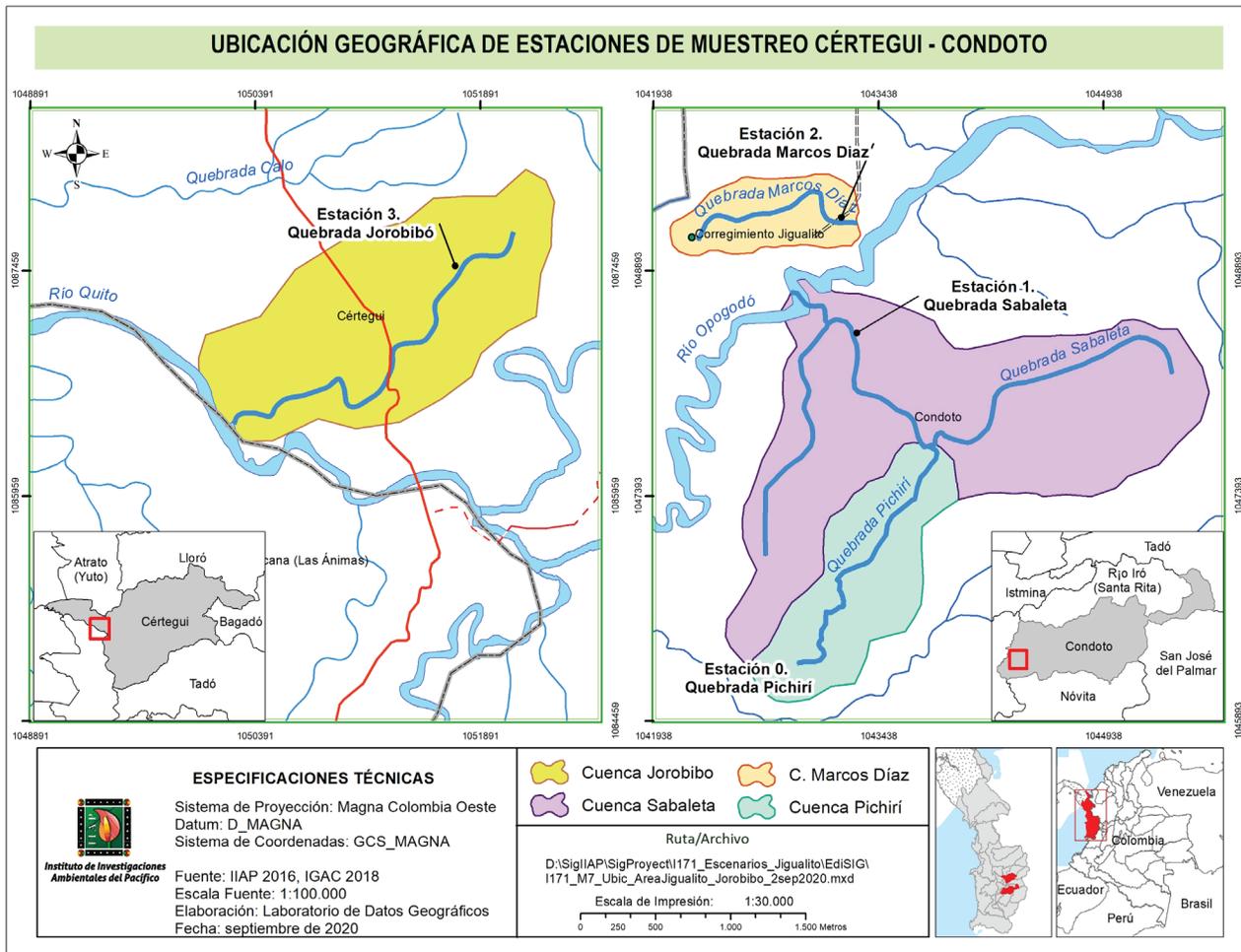


Figura 1. Localización de las estaciones de muestreo en el Distrito Minero del San Juan, Jigualito, Condoto, Chocó, Colombia

ráceas. La cuenca cuenta con un área de 457.11 Ha (10.48 km<sup>2</sup>), una longitud de 2.73 km, un ancho promedio de 1.26 km y 48-63 msnm.

Estación 2. Quebrada Marcos Díaz: fuente hídrica con más de 30 años de cese de la actividad minera, localizada en 5°2' N - 76°41'0" y 5°2' N - 76°41'0". Presenta cauce modificado e integrado por sectores naturales conectados con un canal artificial. Los sectores naturales presentan características lóxicas y el canal constituye un tramo con flujos muy lentos e inundables. Las riberas presentan vegetación interrumpida en estado de sucesión avanzada con predominio de diferentes especies de Gramíneas y Ciperáceas. La cuenca cuenta con un área de de 52.04 Ha (3.15 km<sup>2</sup>), una longitud de 1.24 km, un ancho promedio de 0.42 km y 56-59 msnm.

Estación 3. Quebrada Jorobibó: fuente hídrica con recepción actual de vertimientos de minería mecanizada con retroexcavadora en combinación con minería artesanal en algunos tramos, se localiza entre los 5° 22' N - 76° 36' 0" y 5° 22' N - 76° 36' 0", presenta desviación del cauce y vegetación interrumpida en las riberas con predominio de algunas Gramíneas Ciperáceas y Aráceas. La cuenca cuenta con un área de de

246.27 Ha (2.6 km<sup>2</sup>), una longitud de 2.58 km, un ancho promedio de 0.95 km y 90-99 msnm.

En cada estación se establecieron dos puntos de muestreo ubicados aguas arriba y aguas debajo de la fuente los cuales corresponden al factor de análisis Sitio. Se realizaron cuatro muestreos, tres durante la época de altas lluvias (mayo y agosto) y un muestreo en época de bajas lluvias (octubre) (Guzmán *et al.*, 2014). Por campaña de muestreo se tomaron dos muestras por estación para los análisis biológicos, para un total de 16 por muestreo. En cada estación se determinó el ancho y la profundidad media con una cinta métrica, el caudal y la velocidad utilizando un caudalímetro y se midió temperatura, pH, oxígeno disuelto (OD), conductividad, sólidos disueltos (TDS) y turbiedad en el agua, mediante el uso de una sonda multiparamétrica YSI Profesional Plus Quick 1700/1725. Así mismo, se determinaron las concentraciones de nutrientes (nitratos, nitritos y fosfatos) y sólidos suspendidos (SS) utilizando un Colorímetro portátil HACH DR 900. Para efectuar la toma de muestras ficoperifíticas en cada uno de los puntos de muestreo, se utilizaron cepillos plásticos para realizar la remoción del material

adherido a sustratos (piedras, troncos, hojarasca) inmersos en el lecho de la corriente; como unidad de área se utilizó un cuadrante de 8 cm<sup>2</sup>, el cual se utilizó 30 veces al azar en cada punto de muestreo, obteniendo un área total de 240 cm<sup>2</sup> de raspado por estación. Posteriormente la muestra colectada fue fijada con una solución de lugol al 10% (0.5 ml por cada 100 ml de muestra) y fue transportada al laboratorio en envases plásticos opacos debidamente rotulados. Para la observación de las muestras ficoperifíticas se utilizó un microscopio invertido, provisto de una reglilla ocular y para el montaje de la muestra se utilizó la cámara de conteo Sedgwick-Rafter de 1 ml de capacidad, la cual es necesaria para efectuar comparaciones entre análisis cuantitativos (Wetzel & Likens, 1991). Para efectuar el conteo de algas perifíticas en la cámara se seleccionaron 30 campos de observación siguiendo un sistema de muestreo al azar (Uehlinger, 1964). El conteo se realizó con una magnificación total de 400X y la determinación taxonómica de las algas perifíticas se realizó como mínimo hasta la categoría taxonómica de género. La relación de la densidad de algas por unidad de área (cm<sup>2</sup>) fue obtenida por medio de una división entre el número de individuos totales cuantificados en la muestra sobre el área de muestreo considerada en cada sitio y momento de muestreo. Para el análisis de la información se realizó una exploración de los datos mediante estadística descriptiva, determinando las medidas de tendencia central (media, varianza, desviación estándar, coeficiente de variación) para cada variable fisicoquímica, para lo cual se utilizó el programa R 4.0.2. La dispersión de las variables fue analizada en histogramas usando como factores de análisis las estaciones y muestreos. Para determinar si los datos presentaban diferencias significativas entre factores de análisis (Estación, Sitio y Muestreo) y después de verificar los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza, se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis. A partir de la estimación de la densidad de organismos/cm<sup>2</sup> se aplicaron los índices de diversidad (Shannon & Weaver, 1949) y el grado de dominancia de Simpson (Simpson, 1949). Se realizaron curvas comparando las especies observadas con las esperadas, utilizando el estimador de riqueza Chao 1 (Colwell, 2004). Se realizó un Análisis de Componentes Principales (PCA) para establecer la disposición de las estaciones en relación con la Riqueza, Diversidad, Abundancia y el estimador Chao1.

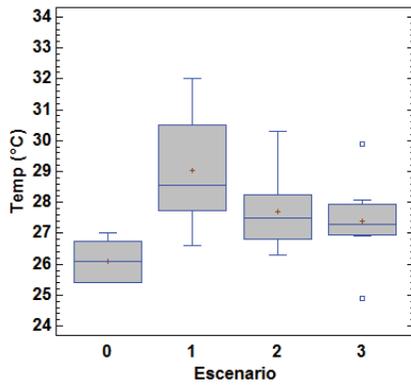
## RESULTADOS

**Características fisicoquímicas de las estaciones.** La caracterización fisicoquímica mostró que la estación E0 presenta condiciones típicas de ecosistemas hídricos naturales con bajo o nulo nivel de intervención antrópica, este comportamiento fue determinado por bajas concentraciones de material suspendido y disuelto (promedios de 1.2 FAU y 7.1 µs/cm), buenas condiciones de oxigenación (>4mg/l según Decreto 1594 de 1984), temperatura promedio de 26°C, pH ligeramente ácido a neutro y pocas variaciones en la concentración de nutrientes entre puntos y muestreos, evidenciando condiciones de estabilidad en el agua que favorecen el desarrollo de grupos biológicos. En contraste, la estación E1 (5 a 10 años de cese minero) presentó un incremento en las concentraciones de material disuelto y suspendido con relación a E0, lo cual tuvo un efecto directo en la turbiedad y conductividad del agua (hasta 83 FAU y 24 µs/cm). Aunque se registraron niveles de oxígeno y pH similares, así como baja concentración de nutrientes, esta estación se caracterizó por presentar temperaturas más altas (entre 26.6 - 32°C), debido a una mayor exposición a la radiación solar por la falta de cobertura vegetal como resultado del disturbio minero. Por su parte

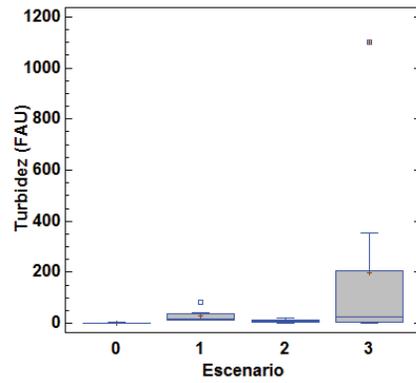
la estación E2 (30 años de cese minero) mostró bajas concentraciones de sólidos disueltos y suspendidos, correspondientes a aguas con poca turbidez y conductividad (promedios de 8,8 FAU y 23 µs/cm). Presentó una temperatura promedio de 27.7°C, además de una tendencia a la acidez (promedio pH 6.1), relacionadas con concentraciones considerables de nitratos y fosfatos, bajos niveles de oxígeno disuelto (<4mg/l en el 60% de los muestreos) y poca velocidad de flujo (0.17m/s en promedio) en zonas de cauce aplanadas por la maquinaria minera. Para el caso de la estación E3 (minería actual), se registraron condiciones de alteración evidenciadas en una alta concentración de sólidos suspendidos (hasta 1,067 mg/l), que se reflejaron en niveles de turbidez hasta de 1,100 FAU. Aunque se presentó una buena oxigenación y los sólidos disueltos mantuvieron concentraciones entre 3 y 7.8 mg/l, consecuentes con niveles de conductividad casi constantes entre 11 y 12 µs/cm, los nitratos presentaron su nivel máximo (35 mg/l) en esta estación, mostrando una marcada diferencia con el resto de las estaciones e indicando la existencia de aportes de origen antrópico (Fig.2).

**Composición taxonómica.** Las cuatro estaciones del estudio presentaron 120 especies pertenecientes a 80 géneros, 51 familias, 34 órdenes y 13 divisiones (Tabla 1). En las estaciones E2 (78 especies y 2,987 individuos) y E0 (73 especies y 3,962 individuos) se observaron las mayores riquezas y abundancias registradas para el estudio con un 65% y 54% del total de las especies e individuos de la comunidad de algas perifíticas. Las especies más representativas por sus abundancias fueron las diatomeas *Frustulia rhomboides* (Ehrenberg) De Toni, 1891, con 4,823 individuos y *Eunotia aff. minor* (Kützing) Grunow in Van Heurck, 1881, con 1,296 individuos, siendo estas dos especies las más dominantes, con el 48% de los individuos de la comunidad y una ocurrencia en el 100% de las estaciones. Los diferentes muestreos indican que los géneros mejor representados fueron las diatomeas *Eunotia* sp. y *Gomphonema* sp. con 18 y 6 especies, respectivamente, lo que corresponde al 20% de la riqueza del estudio. El 80% se encuentra distribuido en los 78 géneros restantes. El 55% de las especies pertenece a la división Bacillariophyta, el 22% a Chlorophyta, el 11% a Cyanophyta, mientras que divisiones como Ochrophyta, Euglenophyta, Rodophyta, Charophyta y Crysophyta presentaron menos del 3%. A nivel específico de las estaciones se observa una disminución de la composición taxonómica, a medida que disminuye el tiempo de abandono minero; siendo la estación E3 con minería actual el que registra la menor riqueza y abundancia en el estudio con 35 especies y 2,832 individuos; seguido de la estación E1 con 48 especies y 3,962 individuos.

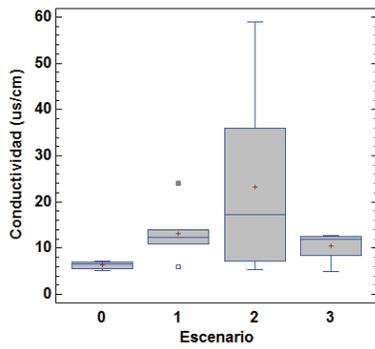
**Importancia ecológica de las especies.** Los valores de importancia ecológica de las algas perifíticas en las diferentes estaciones temporales de afectación minera, muestran que el 57% de la densidad de algas estuvo concentrada en sólo cuatro especies *Frustulia rhomboides* (37.5), *Eunotia aff. minor* (10.1), *Frustulia* sp.1 (4.98) y *Ulothrix* sp.(4.02). La frecuencia de especies de la comunidad de algas por estación fue alta, encontrando 35 especies (29%) de las 120, ocurriendo en la mitad de las estaciones; 17 (14%) especies en tres estaciones, 14 especies (12%) en todas las estaciones y 54 (45%) especies raras con presencia en una sola estación. Las especies con mayor valor del índice de valor de importancia para las cuatro estaciones, fueron *Frustulia rhomboides* (43.2), *Eunotia aff. minor* (12.8), *Ulothrix* sp. (8.99) y *Frustulia* sp.1 (7.01); estas cuatro especies no solo estuvieron entre las más frecuentes, apareciendo en todas las estaciones, sino que también fueron relevantes por sus altas densidades; concentrándose en éstas el



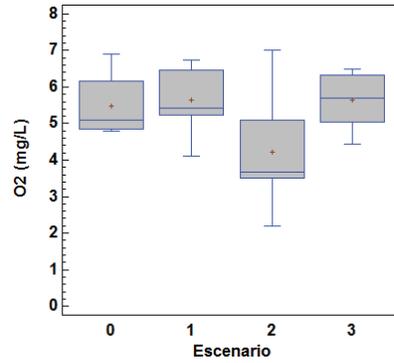
a)  
 Esc: K-W = 13,61 Valor- $p$ = 0.003  
 Mto: K-W = 5,47 Valor- $p$ = 0.140  
 Sitio: K-W = 0,99 Valor- $p$  = 0.317



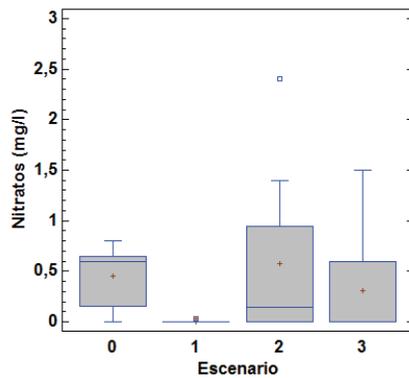
b)  
 Esc: K-W = 14,44 Valor- $p$  = 0.002  
 Mto: K-W = 2,42 Valor- $p$ = 0.490  
 Sitio: K-W = 0,93 Valor- $p$  = 0.335



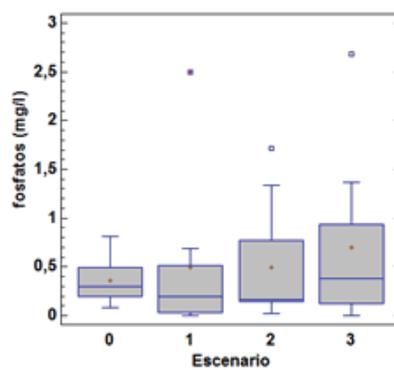
c)  
 Esc: K-W = 9,96 Valor- $p$ = 0.018  
 Mto: K-W = 0,47 Valor- $p$  = 0.924  
 Sitio: K-W = 2,22 Valor- $p$ = 0.136



d)  
 Esc: K-W = 6,15173 Valor- $p$ = 0.051  
 Mto: K-W = 3,84581 Valor- $p$  = 0.278  
 Sitio: K-W = 0,17228 Valor- $p$  = 0.678



e)  
 Esc: K-W = 8,36 Valor- $p$ = 0.038  
 Mto: K-W = 0,84 Valor- $p$ = 0.838  
 Sitio: K-W = 0,15 Valor- $p$  = 0.701



f)  
 Esc: K-W = 1,35 Valor- $P$  = 0.717  
 Mto: K-W = 3,35 Valor- $P$  = 0.340  
 Sitio: K-W = 1,46 Valor- $P$  = 0.227

Figura 2a-f. Esquemas de tendencia central y de dispersión de las variables hidráulicas y fisicoquímicas por estación o escenario; valores  $p$  de Kruskal-Wallis con un nivel de confianza del 95% teniendo en cuenta como factores de discriminación las estaciones (ESC), muestreos (MTO) y Sitios. Se muestra en cada caja el rango, la media, la mediana y los puntos atípicos. a) Temperatura del agua; b) Turbidez del agua; c) Conductividad; d) Oxígeno disuelto; e) Nitratos; f) Fosfatos.

72% del total, indicando que existe en estos ambientes un predominio de especies probablemente tolerantes a fluctuaciones ambientales.

**Distribución de densidades y riqueza numérica.** La densidad de algas perifíticas entre las estaciones y muestreos osciló entre 4.54 y 1,774.3 org/cm<sup>2</sup>. Los valores más bajos se presentaron en los muestreos realizados después del vertimiento minero en la estación E3 (minería actual) y los más altos se ubicaron en E1 (5 a 10 años de cese minero). La estación sin minería (E0) presentó una mayor estabilidad en los valores de densidad entre los 4 muestreos (472.7 y 880.9 org/cm<sup>2</sup>), mientras en E2 (30 años de cese minero) se obtuvo un rango más amplio de variación (70 y 570.3 org/cm<sup>2</sup>). Aunque la densidad tuvo su máximo pico (1,565 org/cm<sup>2</sup>) en el muestreo 3 de la estación con minería actual (E3), correspondiente al punto antes del vertimiento minero, la riqueza de especies registrada no presentó un incremento. En cuanto al número de especies por estación, se encontró que en las estaciones E0 y E2 se presentaron el mayor número de especies por muestreo con valores por encima de 20, seguido de E1 cuyo máximo valor alcanzó las 16 especies en dos de los muestreos, mientras que los valores más bajos correspondieron a la estación con minería actual donde el número de especies fue inferior a 11 en el 87% de los muestreos realizados (Fig. 3). Los resultados obtenidos muestran que la densidad de algas y el número de especies registradas se ve afectado por el disturbio y presenta cambios con relación a la temporalidad de cese minero, dado que las mayores densidades se presentan en la estación E1 (5 a 10 años de cese minero) y las menores corresponden a la estación con minería actual (E3). Las estaciones E0 (sin minería) y E2 (30 años de cese minero) presentaron densidades similares entre sí. En este mismo sentido, el aumento del número de especies encontradas tuvo relación directa con la temporalidad de operación minera, teniendo en cuenta que entre más reciente es el disturbio menor cantidad de especies se registraron. De este modo la estación con mayor número de especies encontradas correspondió a una estación con 30 años de cese minero E2 (78 especies), seguida de la estación E0 (sin minería) con 72 especies, la estación E1 (5 a 10 años de cese minero) con 48 especies y la estación de intervención actual E3 con 35 especies. A pesar de que las densidades en las estaciones intervenidas por minería presentan valores cercanos o por encima de la estación sin minería, el número de especies registrado para esta estación supera notablemente a aquellas con disturbio reciente.

**Componentes de diversidad.** La riqueza específica estuvo estrechamente relacionada con la temporalidad del disturbio minero, siendo la estación E2 (30 años post minería) quien reportó la riqueza específica más alta con 78 especies y un porcentaje del 91% de lo esperado según el estimador Chao 1 (Tabla 1). La estación sin minería registró

72 especies y un porcentaje de 97% según Chao 1; la diferencia entre estas estaciones puede estar dada por la permanencia de especies transitorias en la estación de 30 años, estas especies frecuentemente aprovechan las condiciones de modificación para prolongar sus estadios sucesionales. Para las dos estaciones restantes E1 y E3 (5 a 10 años post minería y actual), se presentaron las riquezas específicas más bajas del estudio con 49 especies (95% según Chao 1) y 35 especies (96% según Chao1), respectivamente (Tabla 1); esto pudo estar relacionado con los eventos sucesionales tempranos influenciados por el comportamiento cronológico del disturbio.

Los índices ecológicos para la comunidad de algas de las diferentes estaciones disturbadas por minería se relacionan en la Tabla 1. La diversidad estuvo representada mediante el índice de Shannon, que permitió establecer dos grupos marcados por valores altos y bajos de este indicador ecológico. Siendo las estaciones E0 y E2 con valores de 3.25 y 2.5 respectivamente los de mayor valor de diversidad; mientras que las estaciones E1 y E3 presentaron valores bajos de diversidad con 1.99 y 1.54, respectivamente. Este comportamiento general de la diversidad se vio influenciado de manera directa por el alto número de especies (120) e individuos (12,848), su relación con los diferentes procesos cronológicos sucesionales y de restauración pasiva que se desarrollan al interior de las fuentes hídricas disturbadas; al mismo tiempo, por la alta representatividad de especies como *Frustulia rhomboides*, *Eunotia aff. minor*, *Frustulia* sp.1 y *Ulothrix* sp, las cuales representaron más del 57% del total de los individuos encontrados. En términos de la dominancia de Simpson, la comunidad de algas perifíticas de las cuatro estaciones mostró un comportamiento similar (E0= 0.06, E2= 0.05, E3= 0.05), influenciado por el equilibrio de valores muy altos de pocas especies y valores muy bajos de abundancia de muchas especies, esta situación fue general para las estaciones, con una pequeña diferencia para la estación de cinco a diez años (E1= 0.1).

El estimador Chao 1 mostró que la riqueza observada fue muy alta para las cuatro estaciones, con un promedio de 95% del total de las especies esperadas por sitio. La estación con mayor número de especies encontradas según el estimador Chao 1 fue E0 (sin minería) con 72 especies de las 75 estimadas para un porcentaje de ocurrencia de 96%; seguido de la estación E3 (minería actual), que registró 35 especies observadas, de las 37 estimadas por Chao 1 para un porcentaje del 95%; la estación E1 presenta 49 especies y un 94% de presencia de las 52 especies estimadas por Chao 1 y por último el E2 que presentó 78 especies, el 91% de las 86 especies estimadas por Chao 1.

**Análisis de Componentes Principales.** El análisis agrupó las estaciones según los atributos de diversidad, abundancia, riqueza y el estima-

Tabla 1. Riqueza, estimador Chao1, porcentaje de especies de algas perifíticas encontradas, abundancia, índices de diversidad y dominancia por Estación, en la región de Jigalito, Condoto, Chocó.

Estaciones	Riqueza	Chao1	%	Abundancia	Diversidad (Shannon)	Dominancia (Simpson)
E0 (sin minería)	72	75	96	3.2	3.3	0.06
E1 (5 a 10 años post minería)	49	52	94	4.1	2	0.1
E2 (30 años post minería)	78	86	91	3.1	2.7	0.05
E3 (minería actual)	35	37	95	3	1.5	0.05

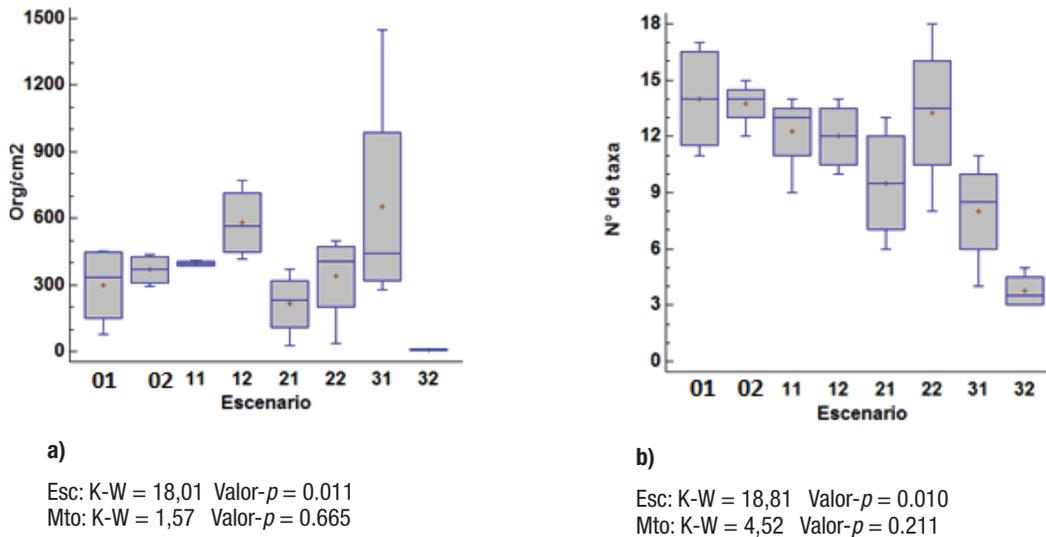


Figura 3a-b. Distribución de la densidad (a) y la riqueza (b) de algas perifíticas en cada sitio del escenario (aguas arriba y aguas abajo: número 1 y 2 al final de cada pareja numérica); valores  $p$  de Kruskal-Wallis con un nivel de confianza del 95% teniendo en cuenta como factores de discriminación los escenarios.

por Chao 1 en un componente que explicó el 99.8% de la relación entre estas variables (Fig. 4). Las estaciones E1 y E3 con disturbio minero más reciente (actual y 5 a 10 años de post minería) se agruparon junto con la abundancia de especies, mientras que las estaciones sin intervención o con mayor tiempo de cese minero (E0 y E2) se relacionaron con la diversidad, la riqueza y el estimador Chao 1, debido a que en ellas se presentaron los mayores valores para estos parámetros, sugiriendo que la temporalidad tiene un efecto en la resiliencia de los cuerpos de agua disturbados por la actividad minera y que estaciones con más de 30 años de restauración pasiva son más parecidos a ambientes naturales en cuanto a la riqueza de especies y a la distribución de las mismas en el ambiente. En contraste, aunque las estaciones de afectación reciente mantienen abundancias cercanas a los anteriores, presentan marcadas diferencias en la diversidad de algas perifíticas, evidenciando el impacto notable de la actividad minera sobre este atributo del ecosistema y los requerimientos y los considerables requerimientos temporales para su restablecimiento.

## DISCUSIÓN

La minería a cielo abierto realizada en Jigalito (Condoto) genera alteraciones en la calidad ambiental de las fuentes hídricas intervenidas y en el ensamblaje de las algas perifíticas que se desarrollan en su interior y que dependen de las condiciones del medio. Estas alteraciones se evidencian de manera específica en las características fisicoquímicas e hidráulicas de las fuentes y a nivel biológico en la riqueza y diversidad de las poblaciones. Aunque parte de estas condiciones presentan una dinámica temporal que tiende al restablecimiento, dado por la capacidad de resiliencia de estos ambientes luego del disturbio, lo cual se evidenció por la agrupación fisicoquímica y biológica de las estaciones sin minería y con 30 años post disturbio, los resultados sugieren que aún con dicha temporalidad este tipo de ambientes todavía se encuentran en proceso de recuperación y no han alcanzado la estabilidad de aquellos que no han sido intervenidos.

El análisis de las condiciones ambientales de las estaciones temporales de disturbio minero en las diferentes fuentes hídricas evaluadas, mostró que esta actividad tiene un efecto marcado en las variables fisicoquímicas relacionadas con la concentración de nitrógeno ( $\text{NO}_3$ ), la presencia de materiales suspendidos (SS, turbidez) y la temperatura del agua. De ahí que dichas variables presentaran las concentraciones más altas en las quebradas Jorobibó (E3) y Sabaleta (E1) que corresponden a fuentes hídricas con recepción actual de vertidos mineros y con cese reciente de la actividad, lo que está asociado con las técnicas de explotación minera empleadas en la zona, que según la UPME (2007) son realizadas sin prospección y con el uso de monitores y retroexcavadoras que además de talar los bosques, remueven y lavan las capas del suelo para extraer los metales, vierten los residuos del proceso de manera directa a las fuentes hídricas aportando con ello gran cantidad de sedimentos y materia orgánica que queda en suspensión incrementando la turbidez del agua.

Estos cambios tienen un efecto en la estructura de la comunidad de algas perifíticas, de ahí que a nivel biológico se pudo establecer que los escenarios temporales evaluados están dominados por diatomeas y algas verdes y que la composición mostró variaciones en función de la temporalidad de abandono minero y por ende una relación con el nivel de disturbio y el estado del hábitat. Aunque entre las cuatro estaciones se compartieron 14 especies, 17 estuvieron en tres estaciones y 35 en dos de ellas, el mayor número de especies (54) correspondieron a organismos particulares de una estación, evidenciando los cambios en la composición taxonómica de las algas con relación a la presencia de minería y al tiempo de su abandono. En este sentido, la mayor riqueza se concentró en la estación con 30 años post minería (78), seguido de la estación sin intervención (72) y la estación con 5 a 10 años de cese de la actividad (49), mientras que la riqueza más baja coincidió con el ecosistema actualmente intervenido con minería (35), lo que permite deducir que inmediatamente ocurre el disturbio hay una pérdida sustancial en la riqueza de algas perifíticas, lo que está relacionado con la degradación del hábitat en respuesta a la modificación de la

estructura del cauce que altera los sustratos y la velocidad del flujo y a la recepción de vertimientos que cambia las condiciones fisicoquímicas del recurso, incrementando principalmente la cantidad de sólidos suspendidos, la turbidez, los nutrientes y la temperatura como se evidenció en las estaciones de disturbio reciente (E1 y E3), lo cual concuerda con lo expresado por Stevenson *et al.* (1996), quienes explican que en los cuerpos de agua con perturbaciones físicas y químicas como el incremento de arrastre de sedimentos y de la velocidad del agua, las algas perifíticas reducen su desarrollo.

Con relación a lo anterior, se puede analizar que los vertimientos mineros están cargados de material litológico que es lavado con grandes cantidades de agua a presión para obtener los metales, lo que hace que sean muy abrasivos y que favorezcan el desprendimiento de las algas perifíticas menos resistentes e incluso de aquellas que están fuertemente adheridas al hábitat, de ahí que este tipo de disturbio pueda ocasionar un cambio en la composición taxonómica y la riqueza de las estaciones (Francoeur & Biggs-F, 2006; Bilotta & Brazier, 2008; Luce *et al.*, 2010). De igual manera, estos sedimentos pueden afectar la disponibilidad de luz, causando cambios en la temperatura, aumento en la turbidez y la disponibilidad de nutrientes, factores que también tienen una influencia en la comunidad (Henley *et al.*, 2000).

El comportamiento de la riqueza de especies en las estaciones muestra un patrón temporal que da cuenta de una aparente recuperación de la comunidad de algas perifíticas a medida que aumenta el tiempo de resiliencia de las estaciones, sin embargo el hecho asociado a que la estación con 30 años de cese minero supere la riqueza de la estación sin intervenir, podría indicar que dicho proceso se encuentra en desarrollo y que la diferencia puede estar dada por la permanencia de especies transitorias que frecuentemente aprovechan las condiciones de modificación para prolongar sus estadios sucesionales en la estación de 30 años. En cuanto a la importancia ecológica de las especies se encontró un predominio de la especie *Frustulia rhomboides* en todas las estaciones y muestreos, probablemente por su carácter cos-

mopolita y su tolerancia a fluctuaciones de conductividad, temperatura y concentración de nutrientes (Giorgio *et al.*, 2001; Trobajo *et al.*, 2002). También predominaron *Eunotia aff. minor*, *Ulothrix* sp. y *Frustulia* sp1.

La densidad y la abundancia no mostraron divergencias considerables entre las estaciones, sus valores fueron similares con una diferencia en la estación con 5 a 10 años de cese minero, en el cual se presentó los niveles más altos, situación que evidencia que la densidad y abundancia de algas permaneció casi constante entre las 4 estaciones pese a las marcadas diferencias en la riqueza, lo que puede ser explicado con los reportes de Lobo (1993) y Margalef (1983), quienes afirman que los ambientes intervenidos se caracterizan por presentar pocas especies con alta abundancia. Esto obedece a que sus condiciones extremas permiten el desarrollo de unas pocas especies que dominan debido a su capacidad de tolerancia a dichas condiciones. Lo que corrobora que el disturbio minero afecta la estructura del ensamblaje de algas perifíticas.

El valor del índice de diversidad de Shannon-Weaver mostró un patrón de incremento con el tiempo de cese de la minería y obtuvo su mayor valor en la estación donde no ha existido disturbio (E0), mostrando que al igual que la riqueza de especies se encuentra influenciado por las afectaciones ocasionadas por la minería y se ve favorecido con los procesos de resiliencia que probablemente inician cuando se detiene la intervención. Estos resultados pueden estar relacionados con el hecho de que a medida que pasa el tiempo, comienza el proceso de sucesión vegetal asociado a los cuerpos de agua disturbados, se sedimentan las partículas vertidas, se reconforma el nuevo cauce y sus sustratos, situaciones que en conjunto mejoran el flujo de agua y la entrada de nutrientes al sistema, lo que tiene un efecto en las condiciones del medio y en la estructura de la comunidad de algas perifíticas. Esto es corroborado por Reynolds (1984) y Donato (2002), quienes han indicado que la entrada de agua y de nutrientes, induce a una colonización de nuevas especies creándose espacios para el ingreso, crecimiento y desarrollo de la comunidad con especies pioneras, de vida corta y tasas

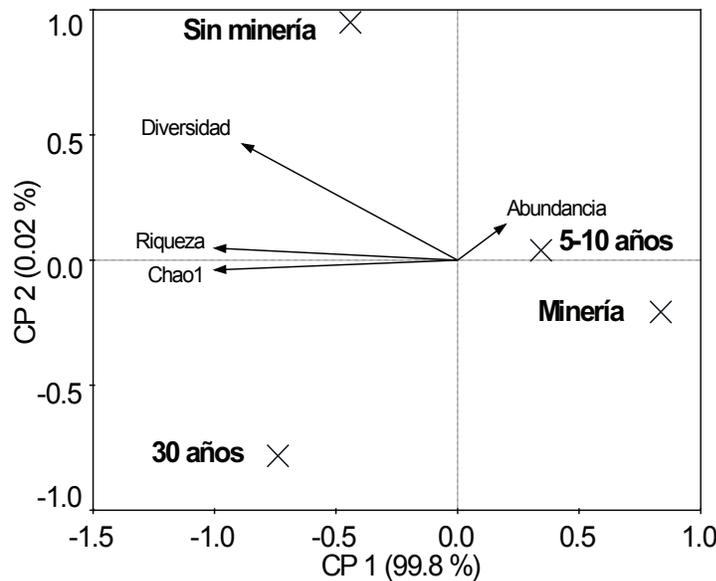


Figura 4. Análisis de componentes principales sobre disposición de los escenarios en relación con la Riqueza, Diversidad, Abundancia de algas perifíticas y el estimador Chao1.

Tabla 2. Composición taxonómica de algas perfiticas registradas en los 4 escenarios temporales de intervención minera en Jigualto (A: Abundancia, D: Densidad, DR: densidad relativa)

División	Clase	Orden	Familia	Género/Especie	Género/Especie	A	D	DR
Bacillariophyta	Bacillariophyceae	Bacillariales	Bacillariaceae	<i>Mitzschia</i>	<i>Mitzschia sp1</i>	33	37	0,26
					<i>Mitzschia sp2</i>	28	32	0,22
					<i>Achanthes sp</i>	97	110	0,75
					<i>Nupela sp</i>	14	16	0,11
					<i>Planothidium sp</i>	1	1	0,01
					<i>Achanthidium minutissimum</i>	9	10	0,07
					<i>Achanthidium sp</i>	62	70	0,48
					<i>Cymbella sp</i>	2	2	0,02
					<i>Encyonema sp</i>	78	88	0,61
					<i>Encyonema cf. lunatum</i>	9	10	0,07
					<i>Eunotia sp</i>	20	23	0,16
					<i>Eunotia aff. monodon</i>	2	2	0,02
					<i>Eunotia monodom</i>	1	1	0,01
					<i>Eunotia aff. serra 1</i>	2	2	0,02
					<i>Eunotia aff. serra 2</i>	12	14	0,09
					<i>Eunotia serra</i>	307	348	2,39
					<i>Eunotia bilunaris1</i>	112	127	0,87
					<i>Eunotia bilunaris 2</i>	43	49	0,33
					<i>Eunotia cf. minor</i>	279	316	2,17
<i>Eunotia aff. minor</i>	1296	1469	10,1					
<i>Eunotia alargada</i>	41	46	0,32					
<i>Eunotia brasiliensis</i>	30	34	0,23					
<i>Eunotia cf. glacialis</i>	23	26	0,18					
<i>Eunotia cf. pseudoserra</i>	7	8	0,05					
<i>Eunotia flexuosa</i>	5	6	0,04					
<i>Eunotia grande</i>	5	6	0,04					
<i>Eunotia naegueli</i>	3	3	0,02					
<i>Eunotia aff. camelus</i>	20	23	0,16					
<i>Actinella sp 1</i>	291	330	2,26					
<i>Actinella sp 2</i>	1	1	0,01					
<i>Actinella punctata</i>	5	6	0,04					

Tabla 2. Continúa.

División	Clase	Orden	Familia	Género/Especie	Género/Especie	A	D	DR
Bacillariophyta	Bacillariophyceae	Naviculales		<i>Frustulia</i>	<i>Frustulia rhomboides</i>	4823	5468	37,5
					<i>Frustulia</i> sp1	640	726	4,98
					<i>Frustulia</i> sp2	216	245	1,68
					<i>Gomphonema</i> affine	36	41	0,28
					<i>Gomphonema</i> aff. <i>archaebrio</i>	17	19	0,13
					<i>Gomphonema</i> augur	45	51	0,35
					<i>Gomphonema</i> lagenula	199	226	1,55
					<i>Gomphonema</i> parvulum	367	416	2,86
					<i>Gomphonema</i> sp	39	44	0,30
					<i>Navicula</i> sp1	69	78	0,54
					<i>Navicula</i> sp2	6	7	0,05
					<i>Navicula</i> sp3	1	1	0,01
					<i>Caloneis</i> sp	8	9	0,06
					<i>Pinnularia</i> cf. <i>viridis</i>	32	36	0,25
					<i>Pinnularia</i> sp	25	28	0,19
					<i>Stauroneis</i> sp 1	31	35	0,24
					<i>Stauroneis</i> sp 2	3	3	0,02
					<i>Capartograma</i> crucicola	15	17	0,12
					<i>Amphipleura</i> sp 1	162	184	1,26
					<i>Amphipleura</i> sp 2	7	8	0,05
					<i>Brachysira</i>	86	98	0,67
					<i>Diadsmis</i> sp	2	2	0,02
					<i>Sellaphora</i> pupula	20	23	0,16
					<i>Fragillaria</i> sp	204	231	1,59
					<i>Fragillaria</i> sp	20	23	0,16
					<i>Pseudestausira</i> sp	9	10	0,07
					<i>Stausira</i> sp	2	2	0,02
	<i>Ulnaria</i> sp	20	23	0,16				
	<i>Tabellaria</i> sp	30	34	0,23				
	<i>Surirella</i> sp	37	42	0,29				
	<i>Stenopterothia</i> curvula	3	3	0,02				
	<i>Stenopterothia</i> sp	12	14	0,09				
	<i>Rhopalodia</i> sp	6	7	0,05				
	<i>Cyclotella</i> sp	21	24	0,16				
	<i>Aulacoseira</i> sp	10	11	0,08				

Tabla 2. Continúa.

División	Clase	Orden	Familia	Género/Especie	A	D	DR				
Cyanophyta	Cyanophyceae	Oscillatoriales	Oscillatoriaceae	<i>Lyngbya</i>	2	2	0,02				
				<i>Oscillatoria</i> sp1	183	207	1,42				
				<i>Oscillatoria</i> sp2	18	20	0,14				
				<i>Phormidium</i> sp	22	25	0,17				
				<i>Plenctonema</i> sp	7	8	0,05				
				<i>Pseudoanabaena</i> sp	8	9	0,06				
				<i>Borzia</i>	12	14	0,09				
				<i>Borzia</i> sp	2	2	0,02				
				<i>Anabaena</i> sp	9	10	0,07				
				<i>Tolyprotrix</i>	15	17	0,12				
				<i>Calothrix</i> sp	2	2	0,02				
				<i>Stigonema</i> sp	235	266	1,83				
				<i>Synechococcus</i> sp	1	1	0,01				
				<i>Closterium</i> sp	83	94	0,65				
				<i>Closterium</i> alargado	8	9	0,06				
				<i>Closterium</i> setaceum	7	8	0,05				
				<i>Cosmarium</i> sp	78	88	0,61				
				<i>Euastrum</i> sp	8	9	0,06				
				Chlorophyta	Chlorophyceae	Desmidiiales	Desmidiaceae	<i>Desmidium</i> sp	20	23	0,16
<i>Cylindrocystis</i> sp	9	10	0,07								
<i>Netrium</i> sp	3	3	0,02								
<i>Actinotaenium</i>	18	20	0,14								
<i>Sphaerosoma</i> sp	8	9	0,06								
<i>Tetmemorus</i>	3	3	0,02								
<i>Mougeotia</i> sp	356	404	2,77								
<i>Spirogyra</i> sp	11	12	0,09								
<i>Zygnema</i> sp	70	79	0,54								
<i>Bambusina</i> sp	2	2	0,02								
<i>Ankistrodesmus falcatus</i>	6	7	0,05								
<i>Crucigenia</i> sp	9	10	0,07								
<i>Chlorococcal</i>	15	17	0,12								
<i>Tetraedrom</i> sp	1	1	0,01								
<i>Oocystis</i> sp	23	26	0,18								
<i>Eremosphaera</i> sp	2	2	0,02								
<i>Oedogonium</i>	209	237	1,63								
Chlorococcales	Chlorococcales	Chlorococcales	Chlorococaceae					<i>Microspora</i> sp	15	17	0,12
								<i>Ulotrix</i> sp	517	586	4,02
				<i>Stigeoclonium</i> sp	13	15	0,10				
				<i>Chlorella</i> sp	380	431	2,96				
				<i>Chlorella</i>							

Tabla 2. Continúa.

División	Clase	Orden	Familia	Género/Especie	A	D	DR
Euglenophyta	Euglenophyceae	Euglenales	Euglenaceae	<i>Euglena</i>	3	3	0,02
				<i>Trachelomonas</i>	5	6	0,04
Rodophyta	Rodophyceae	Bangiales Acrochaetales	Bangiaceae Acrochaetiaceae Heteropediaceae	<i>Bangia</i> <i>Audouinella</i> <i>Heteropedia</i>	12 6 37	14 7 42	0,09 0,05 0,29
Ochrophyta	Xanthophyceae	Tribonematales	Tribonemataceae	<i>Tribonema</i>	49	56	0,38
				<i>Tribonema</i> sp 2	1	1	0,01
Charophyta	Coleochaetophyceae	Mischococcales	Ophycitaceae	<i>Ophycitium</i>	1	1	0,01
Cryophyta	Cryophyceae	Coleochaetales	Coleochaetaceae	<i>Coleochaete</i>	35	40	0,27
Filamento	Indeterminada	Indeterminada	Indeterminada	Indeterminada1	4	5	0,03
Indeterminado	Indeterminada	Indeterminada	Indeterminada	Indeterminada2	3	3	0,02
Filamento	Indeterminada	Indeterminada	Indeterminada	Indeterminada3	144	163	1,12
Indeterminado	Indeterminada	Indeterminada	Indeterminada	Indeterminada4	16	18	0,12
Filamento	Indeterminada	Indeterminada	Indeterminada	Indeterminada5	70	79	0,54
Indeterminado	Indeterminada	Indeterminada	Indeterminada	Indeterminada6	11	12	0,09
Filamento	Indeterminada	Indeterminada	Indeterminada	Indeterminada6	12.848	14567	100

reproductivas altas, que preparan el ambiente para la llegada de especies intermedias y termina con la entrada de especies tardías de ciclos de vida más complejos con tasas reproductivas más lentas.

Lo anterior puede explicar que la diversidad y la riqueza hayan ido en aumento en las estaciones con afectación minera evaluados y que las estaciones con 30 años de abandono y sin minería se hayan relacionado en el PCA con estos dos atributos de la estructura de la comunidad. Asimismo permite justificar que las estaciones con minería actual o con 5 a 10 años de abandono donde estos procesos de recuperación no han iniciado o son incipientes, se hayan relacionado con la dominancia de individuos, que es la característica determinante de estos ambientes donde la diversidad es menor.

En este estudio se pudo establecer que las fuentes hídricas inmediatamente disturbadas por la minería presentan altas turbiedades, elevadas concentraciones de sólidos suspendidos y nutrientes, incrementos en la temperatura y como consecuencia se reducen más del 50% la riqueza (35) y la diversidad (1.5) de algas perifíticas con relación a cuerpos de agua que no han sido intervenidos. Es decir, la minería degrada el medio acuático y genera un estrés en este grupo biológico que constituye una importante base en la estructura trófica de los ecosistemas hídricos, haciendo que disminuyan su capacidad de ser productivos y ofertar servicios ambientales. A este respecto autores como Luttenton & Baisden (2006), Cushing & Allan (2001) han indicado que en los ríos donde se realizan actividades que pueden aportar sedimentos, se aumenta la cantidad de sólidos en suspensión y la disponibilidad de nutrientes y se dificulta la penetración de luz al cuerpo de agua, lo que inducen cambios en la comunidad perifítica, como la reducción de la productividad primaria y la diversidad, lo que a su vez puede alterar y modificar otras comunidades presentes en la red trófica del ecosistema.

Los resultados obtenidos, evidencian que aunque estas afectaciones se reducen con el tiempo, sus efectos son persistentes a largo plazo, ya que al comparar el estado ambiental y ecológico de los diferentes escenarios temporales evaluados, se encontró que durante los primeros 5 a 10 años de cese de la actividad minera, ocurre una reducción en la cantidad de material sólido suspendido favorecido por la sedimentación, pero se incrementan las temperaturas como resultado de una mayor exposición al sol por la falta de vegetación asociada y los bajos caudales, haciendo que en este tipo de estaciones pese a un leve incremento de la riqueza (49) y diversidad (2.0) de algas perifíticas, se hayan presentado las mayores densidades y abundancias debido al predominio de especies altamente tolerantes que logran adaptarse a las condiciones extremas que se configuran en el ecosistema.

La persistencia temporal en las alteraciones ocasionadas por la minería, también pudo evidenciarse en el estado de la estación con 30 años de cese minero, en la cual se presenta un incremento en la riqueza (78) y diversidad (2.7) con relación a las estaciones anteriores. En comparación con la estación sin intervención (riqueza 72, diversidad 3.3) muestra diferencias que pueden estar dadas a nivel fisicoquímico por los cambios en la estructura del cauce y el crecimiento de la vegetación de ribera y a nivel ecológico con la colonización y permanencia de especies transitorias, lo que podría indicar que el ecosistema aún se encuentra en un proceso de sucesión y que pese a su notable recuperación, no alcanza la estabilidad de un ecosistema sin disturbio.

## AGRADECIMIENTOS

La información presentada hace parte de los resultados de investigación de las Tesis de Maestría y Doctorado de la primera y el segundo autor, los cuales fueron desarrollados en el marco del proyecto Biochocó, en convenio entre la Universidad Tecnológica del Chocó y el Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico para el desarrollo de una herramienta contextualizada de recuperación ecosistémica en áreas degradadas por minería en el departamento del Chocó.

Se agradece al Convenio Biochocó (IIAP – UTCH) por la financiación del trabajo y en especial a la dirección del Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico en cabeza del Ingeniero William Klinger por el apoyo y la oportunidad de llevar a cabo el trabajo, a Hamleth Valois Cuesta por su apoyo en el análisis estadístico, a Zoraida Quesada y Yirlesa Murillo por el acompañamiento en campo.

## REFERENCIAS

- BILOTTA, G. S. & R. E. BRAZIER. 2008. Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota. *Water Research* 42(12): 2849-2861. DOI:10.1016/j.watres.2008.03.018
- COLWELL, R. K. 2004. *Estimates: Statistical Estimation of Species Richness and Shared Species from Samples, Version 7*. Department of Ecology & Evolutionary Biology, University of Connecticut, Storrs, CT.
- CUSHING, C. E. & J. D. ALLAN. 2001. *Streams. Their ecology and life*. London, Academic Press, California. 366 p.
- DE TONI, G.B. 1891. *Sylogeargarum omnium hucusquecognitarum. Vol. II. Sylloge Bacillariearum. Sectio I. Rhaphideae*. Patavii: Sumptibus auctoris. 490 p.
- DÍAZ, C. & C. RIVERA. 2004. Diatomeas de pequeños ríos andinos y su utilización como indicadores de condiciones ambientales. *Caldasia* 26(2): 381-394.
- DONATO, J. C. 2002. *Diatomeas de agua dulce: Indicadores del cambio del ecosistema*. Academia de Ciencias Naturales, Philadelphia. Academia de Ciencias San Francisco de California. 120 p.
- FRANCOEUR, S. N. & B. J. BIGGS-F. 2006. Short-term effects of elevated velocity and sediment abrasion on benthic algal communities. *Hydrobiologia* 561(1): 59-69. DOI:10.1007/s10750-005-1604-4
- GIORGIO, P., A. VINOCCUR, R. LOMBARDO & H. TELL. 2001. Progressive changes in the structure and dynamics of the phytoplankton community along a pollution gradient in a lowland river-A multivariate approach. *Hydrobiologia* 224: 129-154. DOI:10.1007/BF00008464
- GUZMÁN, D., J. F. RUIZ & M. CADENA. 2004. *Regionalización de Colombia según la estacionalidad de la precipitación media mensual, a través del Análisis de Componentes Principales (ACP)*. Grupo de Modelamiento de Tiempo, Clima y Escenarios de Cambio Climático. Subdirección de Meteorología – IDEAM. 55 p.
- HENLEY, W., M. PATTERSON, R. NEVES & A. LEMLY. 2000. Effects of sedimentation and turbidity on lotic food webs: A concise review for natural resource managers. *Reviews in Fisheries Science* 8(2): 125-139. DOI:10.1080/10641260091129198
- HERNÁNDEZ-ATILANO, E., N. AGUIRRE-RAMÍREZ & J. PALACIO. 2011. Relación entre la determinación del pigmento Clorofila a y el Biovolumen geométrico algal en un lago de planicie de inundación (Ciénaga de Ayapel, Córdoba-Colombia). *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia* 60: 159-169.
- IGAC (INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI) & MMA (MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE). 2000. *Estudio de Zonificación Ecológica de la Región Pacífica Colombiana*. Bogotá. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 250 p.
- LOBO, J. M. 1993. *La base de la ecología*. Pentalon, Madrid. 192 p.
- LUCE, J., A. CATTANEO & M. F. LAPOINTE. 2010. Spatial patterns in periphyton biomass after low-magnitude flow spates: Geomorphic factors affecting patchiness across gravel-cobble riffles. *Journal of the North American Benthological Society* 29(2): 614-626.
- LUTTENTON, M. & C. BAISDEN. 2006. The Relationships Among Disturbance, Substratum Size and Periphyton Community Structure. *Hydrobiologia* 561: 111-117. DOI:10.1007/s10750-005-1608-0
- MARGALEF, M. R. 1983. *Limnología*. Ediciones Omega, Barcelona. 1010 p.
- MARTÍNEZ, L. & J. C. DONATO. 2003. Efectos del caudal sobre la colonización de algas en un Río de alta montaña tropical (Boyacá, Colombia). *Limnología, Caldasia* 25 (2): 337-354.
- MONTOYA-MORENO, Y. & N. AGUIRRE-RAMÍREZ. 2008. Asociación de algas perifíticas en raíces de macrófitas en una ciénaga tropical Colombiana. *Hidrobiológica* 18(3): 189-198.
- POVEDA-M, C., C. A. ROJAS-P, A. RUDAS-LI & J. O. RANGEL-CH. 2004. El Chocó biogeográfico: ambiente físico. In: J. O. Rangel-Ch (ed.). *Colombia diversidad biótica IV, El Chocó biogeográfico/Costa Pacífica*. Universidad Nacional de Colombia-Conservación Internacional. Bogotá, pp. 1-22.
- RAMÍREZ, A. & Y. PLATA-DÍAZ. 2008. Diatomeas perifíticas en diferentes tramos de dos sistemas lóticos de alta montaña (Páramo de Santurbán, norte de Santander, Colombia) y su relación con las variables ambientales. *Acta Biológica Colombiana* 13(1): 199-216.
- RANGEL-CH, J. O. 2004. *Colombia Diversidad Biótica IV: El Chocó Biogeográfico, Costa Pacífica*. Instituto de ciencias Naturales, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D.C. 985 p.
- REYNOLDS, C. S. 1984. *The Ecology of Freshwater Phytoplankton*. Cambridge University Press. 396p.
- RIVERA-RONDÓN, C. & J. C. DONATO. 2008. Influencia de las Variaciones Hidrológicas y Químicas Sobre la Diversidad de Diatomeas Bénticas. In: Donato-Rondón, J. (ed.). *Ecología de un río de montaña de los Andes Colombianos (río Tota, Boyacá)*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D. C., pp. 83-102.
- SHANNON, C. E. & W. WEAVER. 1949. *The mathematical theory of communication*. University Illinois, Press Urbana. 125p.
- SIMPSON, E. H. 1949. Measurement of diversity. *Nature* 163:688. DOI:10.1038/163688a0
- STEVENSON, J. R., M. BOTHWELL & R. LOWE. 1996. *Algal ecology. Freshwater benthic ecosystems*. Academic Press, San Diego, California. 753 p.

- TROBAJO, R., X. QUINTANA & R. MORENO-A. 2002. Model of alternative predominance of phytoplankton-periphyton-macrophytes in lentic waters of Mediterranean coastal wetlands. *Archiv für Hydrobiologie* 154: 19-40. DOI:10.1127/archiv-hydrobiol/154/2002/19
- UPME (UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA). 2007. *Producción más limpia en la minería de oro en Colombia. Mercurio, cianuro y otras sustancias*. Bogotá. Ministerio de Minas y Energía. 62 p.
- VAN HEURCK, H. 1881. Synopsis des Diatomées de Belgique Atlas. Anvers. Ducaju et Cie 31-77.
- UEHLINGER, V. 1964. Etude statistique des méthodes de dénombrement planctonique. *Arch. Science Physics Nature* 17: 121-223.
- WETZEL, R. G. & G. E. LIKENS. 1991. *Limnological analyses*. Springer Verlag, New York. 391 p.
- ZAPATA-ANZOLA, M. & J. C. DONATO-RONDÓN. 2005. Cambios diarios de las algas perifíticas y su relación con la velocidad de corriente en un río tropical de alta montaña (río Tota - Colombia). *Limnética* 24: 327-338.