



Condiciones fisicoquímicas del agua en lagunas derivadas de la actividad minera mecanizada en diferentes períodos de abandono en el municipio de Cértegui, Chocó, Colombia

Physicochemical conditions of the water in lagoons derived from mechanized mining activity in different periods of abandonment in the municipality of Cértegui, Chocó, Colombia

Zoraida Quesada Martínez^{*}, Lady Vargas Porras^{*}

Resumen

Se realizó una evaluación fisicoquímica del agua en lagunas derivadas de la actividad minera mecanizada en diferentes períodos de abandono, en cuatro escenarios de muestreo, seleccionados de acuerdo con el tiempo de abandono de la actividad minera entre 1 y 3 años hasta 20 años de cese de la minería. Se tomaron muestras integradas para el análisis in situ de variables fisicoquímicas, así como un análisis estadístico de los datos. Las variables que determinan la subsistencia de la biota como el oxígeno disuelto y la temperatura, presentaron coeficientes de variación menores a 8%, mostrando homogenización en los datos, mientras que las variables asociadas con el aporte de sólidos como turbiedad, sólidos suspendidos, conductividad y sólidos disueltos, presentaron coeficientes de variación entre 20,2% y 167,5%, al igual que compuestos nitrogenados como los nitritos. En conclusión, se observó como las alteraciones que ha sufrido el sustrato en diferentes períodos determinan marcadamente la composición química de las lagunas, donde las concentraciones de material disuelto y suspendido, al igual que los nutrientes, son las que más inciden la dinámica en estos sistemas hídricos.

Palabras clave: *Composición química, Disturbio minero, Restauración hídrica, Variables ambientales.*

Abstract

A physicochemical evaluation of the water in lagoons derived from mechanized mining activity was carried out in different periods of abandonment, in four sampling scenarios, selected according to the time of abandonment of the mining activity from one to three years to 20 years of cessation of the mining,

* Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico (IIAP), Quibdó, Chocó, Colombia.

Autor correspondencia:
zoraidquesada35@gmail.com

Recepción: Septiembre 14, 2018
Aprobación: Diciembre 5, 2018
Editor Asociado: G Ramírez



integrated samples were taken for the in situ analysis of physicochemical variables, as well as a statistical analysis of the data. The variables that determine the subsistence of the biota, such as dissolved oxygen and temperature, presented coefficients of variation lower than 8%, showing homogenization in the data, while the variables associated with the contribution of solids such as turbidity, suspended solids, conductivity and Dissolved solids presented coefficients of variation between 20.2% and 167.6%, as well as nitrogenous compounds such as nitrites. In conclusion, it was observed how the alterations suffered by the substrate in different periods of time markedly determine the chemical composition of the lagoons, where the concentrations of dissolved and suspended material, as well as the nutrients, are the ones that most affect the dynamics in this water systems.

Keywords: *Chemical composition, Environmental variables, Mining disturbance, Water restoration.*

Introducción

Colombia es uno de los países más ricos del mundo en recursos hídricos y en este se destacan cinco zonas hidrográficas: Caribe, Orinoco, Amazonas, Pacífico y Magdalena-Cauca. Específicamente la zona del Caribe incluye ríos muy importantes para Colombia, uno de ellos el Atrato en el departamento del Chocó (IDEAM 2004), sobre las cuales se desarrollan gran parte de las actividades productivas de la región, además de ofrecer diversidad de bienes y servicios desde los aspectos ecosistémicos hasta el social y cultural. Sumado a esto, el Chocó ocupa el primer lugar dentro de la producción colombiana de oro y platino (Agencia Nacional de Minería 2015). Pese a esto, el uso intensivo no planificado de los ríos y quebradas que integran el sistema hídrico del departamento, se está viendo afectado tanto en

su calidad como su cantidad por el desarrollo de actividades mineras, mediante el uso de dragas y retroexcavadoras, la cual además de generar grandes perturbaciones sobre el agua, trae como consecuencia la formación de grandes extensiones de áreas degradadas en las cuales se evidencian cambios en la estructura y composición del suelo, deforestación de áreas de bosques, pérdida de hábitat y conectividad de especies biológica además de la formación de grandes pozos o lagunas por acción del uso de retroexcavadoras con fines de explotación, las cuales son abandonadas sin ningún tipo de tratamiento o recuperación, una vez termina la actividad (Vargas 2012, Mosquera 2016, IIAP *et al.* 2016). Estas lagunas, se perciben como un nuevo ecosistema donde pueden habitar diferentes especies típicas de ambientes lenticos como las algas, macroinvertebrados, vegetación y fauna acuática (IIAP *et al.* 2012).

Las lagunas derivadas por la actividad minera mecanizada en el departamento del Chocó están en la mayoría de los casos, influidas por una entrada de agua proveniente de fuentes hídricas superficiales, al igual que por la acción de factores hidroclimáticos como la precipitación, por lo que tienen un comportamiento similar en cuanto a su estructura y forma, a un ecosistema lentic como lagos, lagunas o humedales, siendo abandonadas una vez culmina el proceso minero (IIAP *et al.* 2012). Los niveles de contaminación y comportamiento ecológico han sido poco estudiados. Según estudios realizados por IIAP y MADS (2012), en la mayoría de los casos, estas lagunas, con el paso del tiempo, son colonizadas por especies de macroinvertebrados, vegetación, fauna acuática y en algunos casos, han sido empleadas por las comunidades como sitios de recreación o de producción piscícola, desconociendo la pertinencia de esta práctica en relación con los niveles de contaminación que pudieran contener.

La problemática que se genera en torno a la actividad minera mecanizada en el departamento del Chocó, está relacionada con la falta

de planificación de esta actividad por parte de propietarios y administradores de entables mineros, la no ejecución de acciones consonantes con la naturaleza, y la diversidad y complejidad ecosistémica de la región. Además, no se han implementado estrategias de manejo integrado del medio ambiente y protección de los recursos naturales acorde con las políticas ambientales, la normatividad ambiental y minera (Ley 685 de 2001, Decreto 2390 de 2002, Ley 1382 de 2010, Decreto 1970 de 2012, entre otros) y planes de desarrollo nacional y regional, falta de estudios previos a la actividad en donde se tenga un conocimiento como línea base del entorno ambiental y ecosistémico que dé cuenta de las características y propiedades ecológicas de cada uno de los componentes que integran estos ecosistemas (agua, suelo, fauna, flora, entorno social, local y regional). Se suma a lo anterior, un deficiente aprovechamiento de la información requerida para la elaboración de estudios ambientales y un desconocimiento de los potenciales de restauración de áreas degradadas por la actividad minera a cielo abierto mecanizada en el departamento del Chocó. Los esfuerzos de investigación en relación con la minería en el Chocó, se han centrado en la caracterización y evaluación ambiental de áreas degradadas por esta actividad, principalmente fuentes hídricas y componentes asociados como fauna, flora y dinámicas socioeconómicas y culturales, destacándose las investigaciones de Asprilla *et al.* (1998), Vargas *et al.* (2010), Vargas (2012, 2016), Restrepo (2015), Mosquera (2016), e IIAP (2017), poniendo de manifiesto el enorme vacío de investigación referente al conocimiento de las dinámicas fisicoquímicas y ecológicas de las lagunas que se derivan del desarrollo de prácticas mineras mecanizadas a cielo abierto en esta región. El objetivo de esta investigación fue analizar la calidad fisicoquímica del agua en lagunas derivadas de la actividad minera mecanizada en diferentes períodos de abandono, en el municipio de Cértegui, Chocó, Colombia.

Metodología

Área de muestreo. El área de estudio estuvo comprendida por 4 lagunas derivadas de la actividad minera en el municipio de Cértegui, Chocó: la primera con abandono reciente entre 1 y 3 años; la segunda con un tiempo de abandono de 5 años; la tercera con un abandono de 10 años; la cuarta con un período de cese de la actividad minera de 20 años. En cada escenario se establecieron 4 puntos distribuidos uniformemente a lo largo de cada laguna, donde se determinó la profundidad aproximada con una plomada y en cada punto se hicieron muestreos integrados a tres profundidades diferentes (100%, 50% y 1% de la profundidad total), que incluyeron las zonas fóticas y afóticas de cada escenario y arrastre superficial para la toma de muestras de fitoplancton (Figura 1). Estas lagunas presentan condiciones vegetales reducidas a bosque remanente que a partir de los 5 años de abandono minero son colonizadas por especies invasoras en estado de sucesión temprana hasta pasar a sucesión vegetal avanzada en las riberas, con presencia de plantas con hábito de crecimiento arbustivo y arbóreo (Figura 2).

Medición de variables fisicoquímicas. Para evaluar la calidad fisicoquímica del agua en cada escenario, se establecieron 4 puntos de muestreo distribuidos uniformemente a lo largo de cada laguna, abarcando desde las zonas litorales hasta la zona limnética. También se determinó la profundidad aproximada con una plomada y en cada punto se hicieron mediciones *in situ* de variables oxígeno disuelto (OD), temperatura (TEMP), porcentaje de saturación de oxígeno disuelto (OD), medida de acidez o alcalinidad (pH), conductividad (COND), sólidos suspendidos (SS), sólidos disueltos totales (TDS), nitritos (NITRI), nitratos (NITRA) y fosfato (FOSF), mediante un muestreo integrado a tres profundidades diferentes (100%, 50% y 1% de la profundidad total) que incluyeron las zonas fóticas y afóticas de cada escenario. Se realizaron 4 muestreos con una

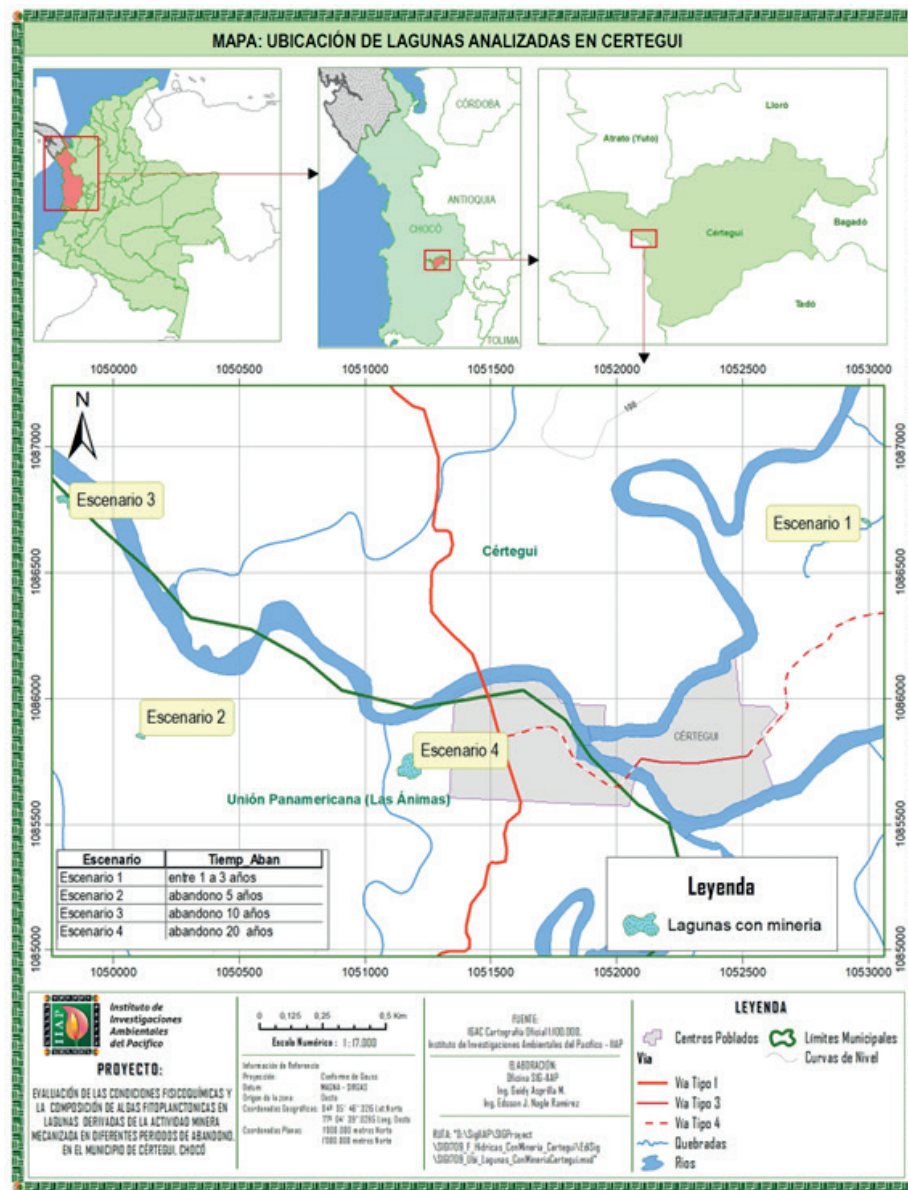


Figura 1. Ubicación escenarios de muestreo lagunas derivadas de la actividad minera. Escenario 1, tiempo de abandono de la actividad minera entre 1 a 3 años. Escenario 2, tiempo de abandono de 5 años. Escenario 3, tiempo de abandono de 10 años. Escenario 4 con tiempo de cese de la actividad de 20 años.

periodicidad quincenal.

Análisis estadístico de los datos. 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. La dispersión de las variables fue analizada en

histogramas usando como factores de análisis los escenarios de muestreo. Para determinar si los datos presentaban diferencias significativas entre factores de análisis, se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis. Se ejecutó un análisis de componentes principales (PCA) CANOCO 4.5, para establecer la ordenación de las variables fisicoquímicas en relación con los escenarios y muestreos.



Figura 2. Descripción de puntos de muestreo en lagunas derivadas de la actividad minera: a. 1 a 3 años; b. 5 años; c. 10 años; d. 20 años de abandono.

Resultados

Caracterización fisicoquímica de las lagunas.

Los resultados de la caracterización fisicoquímica del agua en las lagunas derivadas de la actividad minera se encuentran en la Tabla 1. El oxígeno disuelto presentó un promedio entre 7,30 mg/l y 6,25 mg/l, con coeficiente de variación entre 4,8% y 10,2% y diferencias estadísticamente significativas entre escenarios ($p < 0,05$), registrándose las mayores concentraciones de esta variable en el escenario 1 con cese de actividad minera entre 1 y 3 años. El porcentaje de saturación de oxígeno se presentó entre 87,9% y 96%, estando dentro del rango que describe estos escenarios como en equilibrio y en excelentes condiciones de oxigenación. El pH se presentó entre 7,44 y 6,10 unidades evidenciándose cuerpos de agua neutras, con un coeficiente de variación que mostró pocas diferencias entre escenarios oscilando entre 11,4% a 12,9%, así como diferencias estadísticamente significativas entre escenarios ($p < 0,05$).

La temperatura del agua presentó un coeficiente de variación de 7,9% oscilando en promedio entre 32,2°C y 29,1°C, con diferencias estadísti-

camente significativas entre escenarios ($p < 0,05$), que pudieron estar relacionados con las horas de muestreo, así como con una mayor incidencia de los rayos solares en los escenarios más desprovistos de vegetación debido a una actividad minera reciente como el escenario de 1 a 3 años de abandono minero, registrándose en promedio temperaturas de 29,1°C. Los valores más altos de esta variable se registraron en el escenario de 10 años, donde el promedio es de 32,2°C con un valor máximo de 38,2°C, registro que se asoció principalmente con las horas de muestreo.

Los sólidos suspendidos presentaron fluctuaciones considerables en todos los escenarios de muestreo con un coeficiente de variación de 145% y diferencias estadísticamente significativas entre escenarios ($p < 0,05$), oscilando en promedio entre 74,3 mg/l y 7,31 mg/l. Los mayores registros se presentaron en el escenario de 1 a 3 años correspondiendo a un área con abandono reciente de la actividad minera, lo cual explica persistencia de material suspendido. Estos registros muestran una diferencia marcada con otros escenarios muestreados en donde las concentraciones de sólidos en suspensión son menores, como en el



Tabla 1. Datos estadísticos de las variables fisicoquímicas en los escenarios de muestreo

Escenarios	Descriptivo	OD (mg/l)	% OD	T (°C)	pH	Turb (FAU)	SS (mg/l)	Cond (µs/cm)	TDS (mg/l)	NO ₃ (mg/l)	NO ₂ (mg/l)	PO ₄ (mg/l)
1 a 3 años	Promedio	7,30	96,1	29,10	7,44	82,56	74,31	9,01	4,54	0,03	0,01	1,75
	Máxima	8,02	103,1	31,50	9,08	197,00	175,00	17,26	8,44	0,10	0,05	2,50
	Mínima	5,26	71,0	27,30	5,00	13,00	16,00	3,52	1,96	0,01	0,001	0,17
	DE	0,74	8,3	1,25	0,91	51,69	46,11	3,72	1,64	0,02	0,015	0,96
	CV	10,24	8,6	4,32	12,26	62,61	62,05	41,36	36,22	64,92	123,96	55,26
5 años	Promedio	6,25	82,9	29,51	6,10	9,87	7,31	16,39	6,96	0,05	0,007	1,55
	Máxima	6,98	93,6	31,10	7,40	24,00	21,00	21,81	9,10	0,40	0,03	2,50
	Mínima	5,35	71,0	28,80	5,22	0,00	0,00	12,72	5,41	0,01	0,001	0,18
	DE	0,49	7,0	0,60	0,73	9,03	8,08	2,05	0,83	0,09	0,008	0,96
	CV	7,94	8,5	2,04	12,00	91,47	110,62	12,54	12,04	187,62	109,48	62,42
10 años	Promedio	6,30	87,9	32,24	6,47	15,31	12,37	26,70	10,86	0,04	0,02	1,69
	Máxima	6,93	94,9	38,20	7,96	55,00	50,00	36,10	14,43	0,40	0,08	2,50
	Mínima	5,00	73,1	24,30	5,28	0,00	0,00	18,47	7,84	0,01	0,001	0,05
	DE	0,46	5,7	3,65	0,73	17,04	14,83	5,00	1,74	0,09	0,02	0,93
	CV	7,42	6,5	11,32	11,36	111,33	119,85	18,74%	16,06	195,55	101,00	55,33
20 años	Promedio	6,81	94,7	32,14	6,62	10,62	9,87	12,07	4,80	0,02	0,02	1,27
	Máxima	7,12	99,6	34,10	7,63	59,00	60,00	17,06	6,78	0,07	0,05	2,50
	Mínima	5,86	84,1	30,80	4,86	0,00	0,00	7,52	2,84	0,01	0,005	0,03
	DE	0,32	4,1	0,98	0,85	16,39	16,53	2,43	0,98	0,01	0,013	1,00
	CV	4,82	4,3	3,08	12,90	154,34	167,46	20,20	20,60	56,51	48,95	79,03
Kruskal-Wallis		27,10	31,6	27,72	17,59	30,27	31,59	49,39	47,45	2,46	19,38	2,47
p		5,59E-06	6,38E-07	4,13E-06	0,00053	1,21E-06	6,38E-07	1,07E-10	2,78E-10	0,48	0,0002	0,48

escenario de 5 años de cese de la actividad minera, que obtuvo concentraciones en promedio de 7,31 mg/l con valores máximos de 21 mg/l, evidenciándose procesos de recuperación en los niveles de sólidos en estos cuerpos de agua. Los niveles de turbidez presentaron un coeficiente de variación alto de 141,1%, con diferencias estadísticamente significativas entre escenarios ($p < 0,05$), registrándose en promedio datos entre 82,5 FAU y 9,8 FAU, con los mayores registros en el escenario de abandono reciente (1 a 3 años), en donde además se evidencia procesos propios de la actividad minera en el área circundante, como remoción en masa de tierra, erosión y sedimentación de fuentes hídricas cercanas.

La conductividad se registró con pocas variaciones entre muestreo y una similitud entre escenarios, con un coeficiente de variación de 20,2% y datos promedios que oscilaron entre 9,01 $\mu\text{s/cm}$ y 26,7 $\mu\text{s/cm}$, con mayores promedios en los escenarios entre 5 y 10 años de cese de la actividad minera. El comportamiento de los sólidos disueltos fue similar, con datos promedios entre 4,54 mg/l y 10,86 mg/l, presentando igualmente, mayores registros en los escenarios de 5 y 10 años de abandono de la actividad minera. La prueba de Kruskal-Wallis para estas dos variables, mostró diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$), por escenarios. Los datos registrados, pueden estar asociados con procesos de remoción y cambios en la estructura, dinámica y sustratos del suelo, relacionados con los procesos de excavación y remoción en masa de grandes volúmenes de tierra durante la intervención minera, toda vez que el escenario con menores registros fue el de abandono de 20 años, registrando máximos de 6,78 mg/l.

Los nutrientes como el nitrito (NO_2), presentaron un comportamiento homogéneo entre los escenarios con coeficiente de variación de 98,6% mostrando promedios cercanos que oscilaron entre 0,028 mg/l y 0,007 mg/l, con menores registros en el escenario de 5 años, datos que pueden estar

asociados con el tipo de suelo, el aporte de materia orgánica vegetal y con procesos de sucesión y recuperación de las riberas de las lagunas. A pesar de presentarse en concentraciones bajas, los nitratos (NO_3) presentaron un coeficiente de variación de 56,5% con concentraciones similares en todos los escenarios, que oscilaron entre 0,025 mg/l y 0,05 mg/l. presentándose el mayor promedio en el escenario de 5 años con concentraciones máximas de 0,4mg/l; los menores registros en promedio se obtuvieron en el escenario de 20 años de cese de la actividad con valores máximos de 0,07mg/l, diferencias que pueden estar relacionadas con los períodos de abandono de la actividad y las condiciones ambientales de las estaciones muestreadas. Los nitritos presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$), a diferencia de los nitratos con un valor de ($p > 0,05$). Los fosfatos por su parte presentaron un coeficiente de variación de 61,5% por escenario y muestreo con datos promedio que oscilaron entre 1,75 mg/l y 1,27 mg/l con mayores registros en el escenario de 1 a 3 años (2,5 mg/l y 0,17 mg/l) asociados con un período de abandono reciente de la actividad minera. Las menores concentraciones se registraron en el escenario de 20 años con concentraciones entre 2,5 mg/l a 0,03 mg/l, aunque con pocas variaciones en relación con las estaciones entre 5 y 10 años de cese de la actividad minera, mostrando además que no existe diferencias estadísticamente significativas entre escenarios ($p < 0,05$).

En el PCA dos componentes explicaron el 95% de la variación total: el primer componente explicó 89,4% de la variabilidad de contenida en la muestra. El diagrama de dispersión muestra que los escenarios forman dos grupos: el primero conformado por las variables sólidos suspendidos, turbiedad, sólidos disueltos, conductividad, nitratos, nitritos y temperatura, es decir, que está relacionado con la cantidad de material disuelto y suspendido en el agua, la cual además es la condición que mejor explica las diferencias en

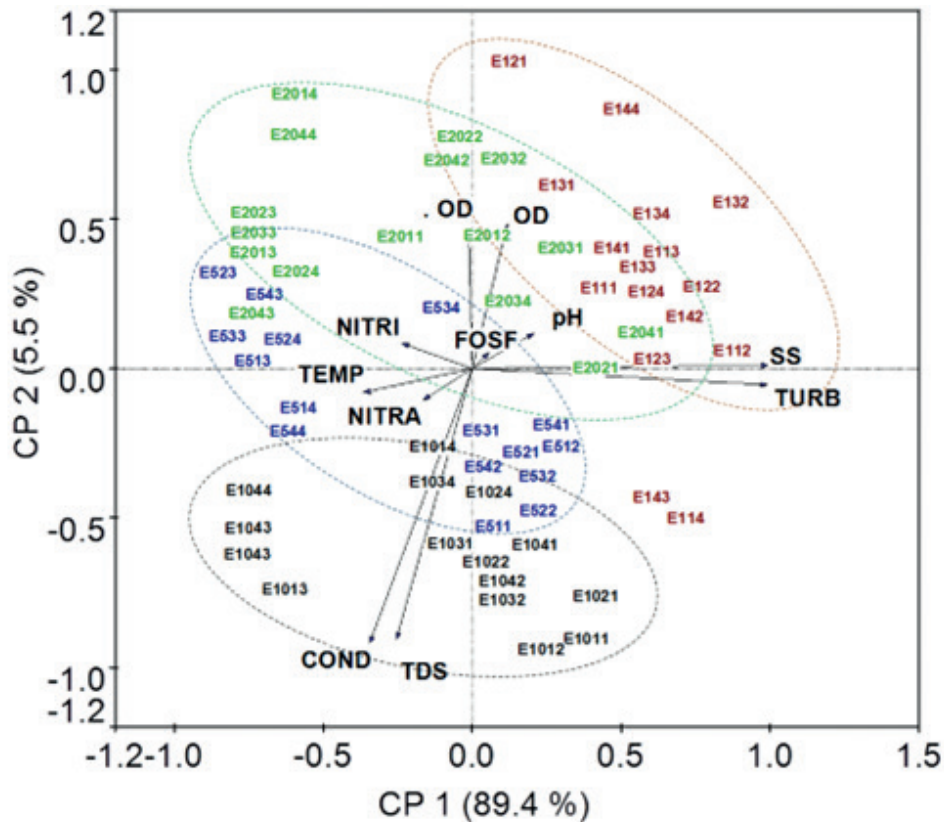


Figura 3. Análisis de Componentes Principales (PCA) por escenarios de muestreo (acrónimos definidos en el texto).

las condiciones fisicoquímicas de los ambientes estudiados. El segundo estuvo integrado por las variables oxígeno disuelto, porcentaje de saturación, pH y fosfatos, las cuales dan cuenta de las condiciones de oxigenación del medio acuático y que para este caso presentaron pocas variaciones entre escenarios, evidenciando que el disturbio minero y la temporalidad de abandono no tiene un efecto marcado sobre su dinámica (Figura 3).

Discusión

En relación con la temporalidad o tiempo de abandono de la actividad minera, se presentaron cambios estadísticamente significativos en las condiciones fisicoquímicas de las lagunas, considerando la disminución en las concentraciones de sólidos suspendidos, niveles de turbiedad, y

el aumento de nutrientes y de material disuelto, así como las fluctuaciones de otras variables que están asociadas con procesos de conservación y de restauración de las condiciones ambientales de estos escenarios como el la temperatura, pH y el oxígeno disuelto (OD). Los grados de temperatura del agua registrada, se pueden relacionar con las horas de muestreo así como las características del ambiente, que para el caso de escenario de minería reciente (1 a 3 años) estuvo caracterizado por una zona litoral desprovista de vegetación, permitiendo la entrada directa de los rayos solares a la columna de agua, incidiendo además en las concentraciones de oxígeno disuelto, con niveles promedios en este escenario de 7,30 mg/l y un coeficiente de variación de 10,2% obedeciendo a un cuerpo de agua con buenas condiciones de oxigenación en todos los períodos de muestreo.

De igual manera, las condiciones fisicoquímicas del agua en esta laguna (escenario 1 a 3 años), estuvieron condicionadas por niveles de turbiedad y concentraciones de sólidos suspendidos altos, lo cual está asociado con el aporte de material de excavación durante el desarrollo de la actividad minera, así como procesos erosivos de cuerpos hídricos cercanos a esta laguna, donde se realizó actividad minera durante los períodos de muestreo, lo que puede generar una disminución de oxígeno disuelto en el agua, porque las partículas en suspensión impiden la transferencia de luz en la columna de agua reduciendo su fotosíntesis y sus procesos de oxigenación. Además, los valores de nitritos y nitratos en este escenario fueron bajos mostrando condiciones de inestabilidad en el sistema. Caso contrario al fosfato con concentraciones que pueden estimular el crecimiento de algas y de plantas acuáticas al interior de la laguna.

A diferencia de lo anterior, el escenario de 5 años de cese de la actividad minera presentó mejores condiciones en relación con los promedios de sólidos suspendidos totales (SST) (7,31 mg/l) y turbiedad (9,8 FAU), indicando heterogeneidad de los datos por períodos de muestreo, además de una relación con la precipitación y posibles procesos erosivos. De igual manera, se presentaron buenas condiciones de variables que favorecen la recuperación de sistemas disturbados como oxígeno disuelto, pH y temperatura del agua, indicando que para los primeros 5 años de cese de actividad minera, hay mayor aporte de materia orgánica del suelo y la vegetación circundante, lo que produce procesos de degradación y oxidación en el agua que pueden contribuir en la reducción de la disponibilidad de su oxígeno. Al respecto, algunos autores como García *et al.* (2001), afirman que la variación del contenido de oxígeno disuelto y, por ende, del déficit de oxígeno en el agua, puede estar en función de la presencia de vegetales y materia orgánica oxidable. Lo que explica la disminución de las concentraciones de esta variable en relación con el escenario de 1 a 3

años de abandono minero. Los nutrientes en este escenario presentaron concentraciones homogéneas entre puntos de muestreo, mostrando que, a partir de este período de abandono se inicia una liberación de materia orgánica por crecimiento y procesos de sucesión vegetal que favorecen un mayor aporte de nutrientes en esta laguna.

Tanto el escenario de 10 años como el de 20 años de cese de la actividad minera, presentaron condiciones fisicoquímicas más estables, indicando que entre más aumenta la temporalidad o abandono minero se aumenta el ingreso de materia orgánica a las lagunas, por el avance en el crecimiento de la vegetación y la formación de la capa orgánica en el suelo, que por escorrentía aporta al agua componentes biodegradables que pueden consumir el oxígeno. Lo que coincide con las afirmaciones hechas por García *et al.* (2001), quienes reportan un déficit de oxígenos entre 20% y 40% en regiones de la Amazonía, la Orinoquía y la cuenca del río Atrato, relacionando esta condición en el agua probablemente a la presencia de materia orgánica proveniente del ciclo natural de descomposición de la biota y al arrastre de sedimentos, que generalmente tienen considerables contenidos de sustancias fácilmente oxidables. En estos escenarios las variables fisicoquímicas monitoreadas presentan condiciones de uniformidad en los 4 puntos durante los 4 períodos de muestreo, mostrando una estabilidad del ecosistema favorecido posiblemente por la vegetación predominante en sus zonas de ribera, caracterizada por una sucesión vegetal avanzada, con presencia de los niveles arbustivo y arbóreo. Las concentraciones de nutrientes presentaron fluctuaciones que pudieron estar asociadas con las variaciones del clima en los períodos de muestreo y el contenido de materia orgánica de origen vegetal caracterizado por la presencia de vegetación flotante como macroalgas para el caso del escenario de 10 años. Al respecto, autores como Baron (2003), afirma que las condiciones nutricionales y químicas naturales son reflejo del



clima local, del lecho rocoso, del suelo, del tipo de vegetación y de la topografía.

La ordenación del PCA permitió observar que las cuatro lagunas o escenarios de estudio son fisicoquímicamente distintos, aunque aquellas que se derivaron de la minería en temporalidades más recientes, es decir con 1, 5 y 10 años se asociaron con el primer componente junto con las variables relacionadas con el contenido de material disuelto y suspendido en el agua y la temperatura; cada escenario estuvo dominado por variables diferentes, lo cual tiene una relación directa con la temporalidad del disturbio. En este sentido, el análisis muestra que el escenario de reciente creación con una temporalidad de 1 a 3 años presentó mayor asocio con los sólidos suspendidos y la turbidez, situación que se explica teniendo en cuenta que inmediatamente ocurre la explotación minera a cielo abierto, se elimina la vegetación, las capas del suelo son removidas y lavadas para extraer los metales, vertiendo las aguas residuales del proceso en las excavaciones que luego se convierten en las lagunas de estudio, haciendo que en estas se concentren grandes cantidades de sólidos suspendidos que generan aguas de alta turbiedad. En relación con esto Sánchez y Cañón (2010), Vargas *et al.* (2010), Vargas (2012) reportan que en el Chocó la minería a cielo abierto utiliza maquinaria pesada (retroexcavadoras), con la cual se retira la cobertura vegetal y se remueven grandes volúmenes de tierra, que, tras la extracción del metal, es vertida a los cuerpos de agua. Además, indica que uno de los parámetros que presenta mayor concentración en los vertimientos de este tipo de minería son los sólidos suspendidos (SST) que oscilan entre 102 y >100.000 mg/l debido a la gran cantidad de materiales estériles que se lavan para extraer los minerales, los cuales aumentan la turbiedad del agua.

Esta condición de turbiedad de las lagunas derivadas de la minería predomina durante los primeros años, donde la sucesión vegetal aún es incipiente y la alta pluviosidad genera escorrentías

que continúan aportando sólidos en suspensión aun en estado de abandono minero, situación que explica el asocio de los muestreos realizados en el escenario 2 (20 años de cese de la actividad minera) con las variables sólidos suspendidos y turbiedad. Esto es explicado por Calder *et al.* (2007), quien indica que la deforestación aumenta la erosión, resultando en una mayor concentración de sedimentos en la escorrentía y en el aporte de sólidos a los ecosistemas hídricos. Pese a que las lagunas de estudio no constituyen cuerpos de agua de origen natural, una vez se termina el proceso de extracción minera y son abandonadas, estas se configuran como nuevos sistemas acuáticos donde también se presentan estos fenómenos de intercambio con la vegetación y el suelo circundante de manera similar que en ecosistemas hídricos naturales, por lo que los comportamientos mencionados acerca del aporte de sólidos suspendidos al espejo de agua durante la etapa de intervención reciente, donde el área circundante aun esta desprovista de vegetación, aplican para explicar las condiciones del escenario de 20 años de abandono y su ordenación en el PCA.

Por su parte, el escenario de 5 años de abandono presenta mayor asocio con el contenido de nitrógeno, mostrando los primeros indicios de los cambios fisicoquímicos que se generan en el agua de estas nuevas lagunas, como consecuencia del proceso de resiliencia que ocurre en el ecosistema circundante degradado por la actividad minera. En esta temporalidad se puede observar que se ha iniciado el proceso de sucesión vegetal en las zonas adyacentes y las riberas, con lo cual se generan aportes de materia orgánica dado por el intercambio que existen entre los cuerpos de agua y la vegetación asociada, teniendo en cuenta que los nutrientes, entre los que se encuentran los compuestos del nitrógeno como nitratos llegan a las aguas superficiales derivados de la descomposición natural de materiales nitrogenados orgánicos como las proteínas de las plantas por acción de microorganismos (Pacheco y Cabrera 2003). Esta

situación favorece el incremento del contenido de nutrientes en el agua, lo que marca un cambio con respecto al escenario de 1 a 3 años de cese de la actividad minera, donde solo predominan sólidos suspendidos, dada su condición de ser un cuerpo de agua derivado de una actividad antrópica como la minería que los aporta en grandes cantidades. Lo anterior explica que, aunque los escenarios entre 1 y 3 años y 5 años de abandono minero se hayan ordenado en el primer componente, están dominados por variables fisicoquímicas diferentes, cuyas diferencias podrían indicar que una vez estas lagunas son generadas por el proceso minero, presentan un mejoramiento en sus condiciones ambientales a medida que se incrementa la temporalidad de cese de la intervención, lo cual es favorecido por la resiliencia del ecosistema en el que se encuentran.

El escenario de 10 años de abandono se ordenó junto con la conductividad y los sólidos disueltos, lo cual corrobora lo antes mencionado en relación con la influencia del tiempo y los procesos de resiliencia en la dinámica física y química de las lagunas derivadas de la minería. Estas variables son indicadoras de que los aportes de iones y sales que produce el intercambio con las capas de suelo conformadas luego del proceso de extracción han tenido el tiempo suficiente para sufrir procesos de mineralización y dilución en el agua, haciendo que las concentraciones de material disuelto y la conductividad se incrementen y sean las variables que dominen estos ambientes después de 10 años de cese de la explotación. Lo anterior teniendo en cuenta que estas variables están directamente relacionadas y que la conductividad eléctrica expresa de forma global el grado de mineralización del agua, la cual depende de las características geológicas y refleja la acumulación de iones que se producen por el drenado y lavado de los suelos con el discurrir del agua, lo cual para este escenario ha aumentado considerablemente con respecto al escenario de 5 años de abandono.

El escenario de 20 años de cese de la activi-

dad minera mostró una mayor relación con las variables del segundo componente, las cuales explican mayores contenidos de oxígeno, pH y en menores proporciones algunos nutrientes como nitritos y fosfatos, evidenciando mayor estabilidad en las dinámicas fisicoquímicas del cuerpo de agua conformado, posiblemente con características más cercanas a la de ambientes acuáticos naturales, dada la temporalidad de creación. Estas variables son indicadoras de que los aportes de materia orgánica que el suelo y la vegetación hayan podido hacer a estos espejos de agua como producto del avance de la sucesión vegetal en el área intervenida, han tenido el tiempo suficiente para sufrir procesos de degradación, dilución en el agua, teniendo en cuenta que esta materia orgánica disuelta (MOD) constituye una compleja mezcla heterogénea de macromoléculas, cuyos principales componentes en las aguas dulces son sustancias húmicas y carbohidratos (Steinberg y Münster 1985, Volk *et al.* 1997, Baker 2001, Engelhaupt y Bianchi 2001, Baker y Spencer 2004), los cuales en las aguas naturales puede ser originados por la descomposición del material biológico procedente de animales, plantas y microorganismos (Spence *et al.* 2011). También el PCA permite inferir que a pesar de estos aportes orgánicos este escenario mantiene buenas condiciones de oxigenación, mostrando un recambio de agua que puede estar favorecida por la alta pluviosidad de la zona de estudio. A este resultado se suma que tanto el oxígeno como el pH hayan presentado coeficiente de variación bajo en el escenario 4, y los fosfatos no hayan presentado diferencias significativas entre los escenarios, de ahí que estas variables se hayan agrupado de manera simultánea con los muestreos de los escenarios de 1 y 4, evidenciando además que estas variables no son afectadas de manera considerable por el disturbio minero.

Es importante mencionar el asocio de la temperatura con el componente de mayor peso en el análisis y que esta variable cobra una gran



importancia más que en los impactos directos de la minería, en la dinámica temporal de las áreas degradadas, ya que sus cambios en los ambientes acuáticos están dados en mayor medida por el grado de exposición a la radiación solar, que en estos ambientes está directamente relacionado con el nivel de sucesión vegetal en el área de influencia, de ahí que la temperatura haya presentado diferencias entre los escenarios muestreados. En términos generales el PCA muestra la existencia de un gradiente ambiental entre escenarios, que está determinado por la temporalidad de cese de la actividad minera, la cual corresponde a su vez a la edad de generación de las lagunas, lo que sugiere que una vez ocurre el impacto y se conforman estos cuerpos de agua, comienza un proceso de recuperación junto con el ecosistema, permitiendo que estas lagunas se incorporen con las dinámicas ambientales conformando unos nuevos ambientes acuáticos que requieren estudio detallados para soportar la toma de decisiones en torno a su manejo adecuado.

Conclusiones

El análisis global de las variables fisicoquímicas en las lagunas derivadas de la actividad minera mecanizada en el municipio de Cértegui, Chocó, permite una clasificación en función de la temporalidad o períodos de abandono, evidenciado en variaciones espacio temporales. Desde el punto de vista espacial se observa como las alteraciones que ha sufrido el sustrato en diferentes períodos determinan marcadamente la composición química de las lagunas, donde las concentraciones de material disuelto y suspendido, al igual que los nutrientes, son las que más inciden la dinámica en estos sistemas hídricos, comportamiento relacionado específicamente con el desarrollo de la actividad minera mecanizada, constituyéndose en el mayor aportante de estos elementos en el agua en los escenarios estudiados, desde 1 a 3 años correspondiendo a un cese reciente de la

minería, hasta 20 años de abandono. Por el contrario, otras variables como el oxígeno disuelto, el pH y los nutrientes como el nitrato no mostraron correspondencia significativa, lo que guarda una relación más directa con las condiciones naturales de las lagunas, viéndose menos alterados por los cambios en la calidad de sus aguas.

Agradecimientos

Las autoras manifiestan su infinita gratitud con el Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico (IIAP), con el Consejo Comunitario Local del Cértegui, y con la ingeniera Yirlesa Murillo.

Literatura citada

- Agencia Nacional de Minería. 2015. Producción oficial de minerales en Colombia. <http://www.anm.gov.co>
- Asprilla S, Ramírez JJ, Roldán G. 1998. Caracterización limnológica preliminar de la ciénaga de Jotadó (Chocó, Colombia). *Revista Actualizades Biológicas*. 20 (69): 87-107. <https://bit.ly/3UHmsym>
- Baker A. 2001. Fluorescence excitation-emission matrix characterization of some sewage- impacted rivers. *Environ Sci Technol*. 35 (5): 948-53. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es000177t>
- Baker A, Spencer RGM. 2004. Characterization of dissolved organic matter from source to sea using fluorescence and absorbance spectroscopy. *Sci Total Environ*. 333 (1-3): 217-32. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15364531/>
- Calder I, Hofer T, Vermont S, Warren P. 2007. Towards a new understanding of forests and water. *Unasylva*. 58 (229). FAO: Roma. www.fao.org/docrep/010/a1598e/a1598e02.htm
- Engelhaupt E, Bianchi TS. 2001. Sources and composition of high-molecular-weight dissolved organic carbon in a southern Louisiana tidal stream (Bayou Trepagnier). *Limnol Oceanogr*. 46 (4): 917-26. <https://bit.ly/3fmVCLQ>
- García M, Sánchez FD, Marín R, Guzmán H, Verdugo N, Domínguez E, *et al*. 2001. El agua. En: El medio ambiente en Colombia. Leyva P (ed.). 2ª ed. Bogotá: IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales). pp. 114-189. <https://bit.ly/3CM6SL0>
- IDEAM. 2004. Guía técnico-científica para la ordenación y manejo de cuenca hidrográficas en Colombia. Decreto 1729 de 2002. Bogotá: Presidencia de la República de

- Colombia. <https://bit.ly/3LQLtTN>
- Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico (IIAP). 2017. Monitoreo fisicoquímico y ecológico de calidad de aguas costeras en Bahía Solano como herramienta de análisis de los aportes contaminantes urbanos de la quebrada Jella. Documento técnico N° 54. Quibdó: IIAP.
- Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico, Universidad Tecnológica del Chocó. 2016. Lineamientos de manejo ecosistémico post-aprovechamiento minero en ambientes naturales del Chocó, Colombia. Convenio de Cooperación BIOCHOCÓ. 32 pp. <https://bit.ly/3Sz2Evi>
- Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacífico (IIAP), Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). 2012. Protocolo de restauración ecológica en áreas degradadas por minería a cielo abierto de oro y platino en el Chocó Biogeográfico. Convenio 182 de 2012. Documento técnico. 88 pp.
- Baron JS, Poff NL, Argermeier PL, Dahm CN, Gleick PH, Hairston NG, *et al.* 2003. Ecosistemas de agua dulce sustentables. En: *Temas en ecología*, N° 10. <https://bit.ly/3RNNQZ8>
- Mosquera LM. 2016. Evaluación exploratoria de la calidad del agua del río San Juan en el municipio de Tadó, Chocó, por el impacto que causan los vertimientos mineros. Manizales: Maestría en Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. Universidad de Manizales. 111 pp. <https://bit.ly/3fiOosh>
- Pacheco J, Cabrera A. 2003. Fuentes principales de nitrógeno de nitratos en aguas subterráneas. *Ingeniería* 7 (2): 47-54. <https://www.redalyc.org/pdf/467/46770204.pdf>
- Restrepo IR. 2015. Evaluación de la calidad del recurso hídrico del río Cabá a través de la formulación de un índice de contaminación asociado a la actividad minera aurífera. (Tesis inédita de maestría). Manizales: Universidad de Manizales. <https://bit.ly/3xXiJ6c>
- Sánchez DE, Cañón JE. 2010. Análisis documental del efecto de vertimientos domésticos y mineros en la calidad del agua del río Condoto (Chocó, Colombia). *Gestión y Ambiente*. 13 (3): 115-30. <https://bit.ly/3SFIO6e>
- Steinberg CEW, Münster U. 1985. Geochemistry and ecological role of humic substances in lakewater. In: *Humic substances in soil, sediment and water. Geochemistry, isolation and characterization*. Aiken GR, McKnight DM, Wershaw RL, MacCarthy P, eds. New York: Wiley. pp. 105-45. <https://bit.ly/3xWtJ3L>
- Spence A, Simpson AJ, McNally DJ, Moran BW, McCaul MV, Hart K, *et al.* 2011. The degradation characteristics of microbial biomass in soil. *Geochim Cosmochim Acta*. 75 (10): 2571-81. <https://bit.ly/3E2nrDt>
- Vargas L, Quesada Z, Ramírez G, Valoyes Z. 2010. Diagnóstico ambiental de las áreas degradadas por la actividad minera en el municipio de Atrato, Chocó. *Revista Bioetnia*. 7 (1): 23-37. <https://bit.ly/3DYhhUN>
- Vargas L. 2012. Análisis de los impactos generados por la minería de oro y platino a cielo abierto sobre los recursos hídricos a partir de la cuantificación del consumo de agua y la carga contaminante de los vertimientos. *Revista Bioetnia*. 9 (2): 203-14. <https://bit.ly/3fsgXDu>
- Vargas L. 2016. Diagnóstico de la calidad ecológica a través de algas perifíticas en escenarios hídricos afectados por minería a cielo abierto con diferente temporalidad, en el corregimiento de Jigualito (Condoto, Chocó). (Tesis de maestría meritatoria). Medellín: Maestría en Ciencias Ambientales, Corporación Académica Ambiental, Universidad de Antioquia. <https://bit.ly/3r9GNim>
- Volk CJ, Volk CB, Kaplan LA. 1997. Chemical composition of biodegradable dissolved organic matter in stream water. *Limnol Oceanogr*. 42 (1): 39-44. <https://bit.ly/3rcVa5u>