

MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LA CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS EN LA ESPECIE GUAÑA (H. Plecostomus) EN LA CUENCA DEL RIO SANTIAGO Y UNA ALTERNATIVA NATURAL PARA SU REMEDIACIÓN

AUTORES

MS.c Carlos Montaña cm96478@gmail.com U. Técnica Luis Vargas Torres
Ing. Celina Santos santoscelina97@yahoo.es U. Técnica Luis Vargas Torres
Ing. Jorge Palacios jpalaciosrevelo@gmail.com U. Técnica Luis Varga Torres

MSc. Joseph Cruel josephcrusi@outlook.es U. Técnica Luis Vargas Torres

RESUMEN

Según, PUCESE. Existirían unas 200 mina aurífera en explotación entre los Cantones de San Lorenzo y Eloy Alfaro, en este sentido Alberto Prado, minero de la zona contaminada afirma que se requiere mover una tonelada de tierra para tener la probabilidad de encontrar 5-8 gramos de oro, este movimiento de tierra es la que por escorrentía llega a los ríos incrementando los niveles de metales pesados. La deforestación que produce la erosión de los suelos aumenta los niveles de metales pesados en ríos, a diferencia de otras minas auríferas en el país, el oro en Esmeraldas se encuentra en un segmento de la corteza terrestre llamada *arenisca* ubicada a 2 y 5 metros de profundidad y en gran proporción sin formar aleaciones con otros metales, esta es la causa de la mínima utilización de Mercurio. En el modelo propuesto la variable a ser explicada es la concentración de metales pesados en la especie "Guaña" del Río Zapallito, tal concentración responde a 0,76 mg/l en función de la concentración de metales pesados en el agua del río y de 56,6 mg/l en sedimento del mismo río si se mantienen constantes, obteniéndose una explicación del modelo del 99,9%, aunque la abundancia de las especies capturadas fue escasa, el 70% reportaron la presencia de metales pesados, como medida de remediación se propone el diseño y construcción de un humedal artificial a base de zeolitas naturales para depurar 10 metros cúbicos/ h con un diámetro hidráulico de 0,8 metros. Palabras claves. Pucese. Escorrentía. Arenisca. Guaña. Humedal artificial. Metales pesados

INTRODUCCIÓN

El Cantón San Lorenzo, según el GADPE (*Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia de Esmeraldas*), está ubicado en la frontera Norte de la Provincia de Esmeraldas, al Norte limita con la República de Colombia, hacia el Sur con el Cantón Eloy Alfaro, al Este con las Provincias de Carchi e Imbabura y hacia el Oeste con el Océano Pacífico, las coordenadas geográficas del cantón oscilan desde los 78° 48" 20" hasta 78° 50" 30" longitud oeste; y, 01° 15" 30" hasta 01° 17" 40 Latitud Norte.

Con el propósito de conducir esta investigación se elaboró los siguientes objetivos.

- Elaborar un análisis de situación actual para la identificación de las causas de impacto ambiental de la minería aurífera artesanal en San Lorenzo.
- Evaluar la concentración de metales pesados en el organismo de los peces, el agua de los ríos y sedimentos, para la verificación del cumplimiento de la normativa ambiental.
- Diseñar un modelo estadístico que explique la contaminación por metales pesados en una especie de pez en un río donde se desarrolla la minería aurífera.
- Proponer una medida de control ambiental para la mitigación de los efectos de la contaminación en los ríos debido a la minería aurífera artesanal.
- La importancia del proyecto radica en que alrededor del 50% de la población del cantón San Lorenzo desarrolla sus actividades diarias en el área rural, siendo el pescado el principal componente de la dieta de los habitantes; y, a esto se suma que el área rural del cantón carece de sistemas de potabilización de aguas. Por lo tanto, los ríos son la única fuente de abastecimiento de agua, en consecuencia, la contaminación de ecosistemas por metales pesados pone en alto riesgo la salud de la población de la cantidad

Según E. Rebolledo., et Al 2013, los efectos de la contaminación por actividades

mineras informales son la causa de la contaminación por metales pesados en peces. Y la deforestación que en el año 1990-2000 y 2000-2008 se talaron un promedio de 17.282 y 12.485 ha/año en este sentido el aprovechamiento forestal se duplicó de 20.112 a 42.459 ha en el periodo 2007-2012

Desde el punto de vista de la abundancia (H') relativa comparando una estación sin contaminación, Estero Camba, y uno de los Ríos más contaminados Zapallito, se evidencia una marcada diferencia de diversidad biológica como de riqueza. En cuanto al impacto de los metales pesados sobre la población. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos ha determinado una lista de contaminantes prioritarios en la que los metales tóxicos son: arsénico, cromo, cobalto, níquel, cobre, zinc, cadmio, mercurio, titanio, selenio y plomo, (EPA, 2017). Así como de enfermedades (ATSDR, 2017).

De acuerdo con la tabla 1, se observa la presencia de metales pesados en la cuenca del Río Santiago en este sentido los ríos que presentan mayor presencia de contaminación por metales pesados son Ricaurte (Río Tululbí), Wimbi, Los Ajos y Zapallito.

En el diario El Universo del Domingo 10 de septiembre 2017, página 8 y 9, reportó la contaminación de metales pesados en la provincia de Esmeraldas, así también ECUAVISA, canal 2, en la misma fecha, en su programa VISIÓN 360, transmitió reportajes y videos de la misma problemática en la provincia de Esmeraldas.

Según Eduardo Rebolledo. "El mal estado del agua (que aun en muchas comunidades utilizan para actividades cotidianas de subsistencia: beber, cocina, bañarse, lavar...) En algunas comunidades existen serias dificultades para acceder a agua potable segura, pues si bien en ocasiones recibían agua entubada en la actualidad y debido a causas diversas no disponen de la misma y se ven obligados a coger el agua del río, como es el caso de Maldonado". Producto 8.7 Informe de calidad del agua de los Cantones de San Lorenzo y Eloy Alfaro. 24 enero 2014.

Desde 1993 en EEUU se inició una alternativa denominada. Tratamiento Pasivo de Drenajes Mineros In Situ, sostenido por un consorcio llamado *PIRAMID*. Del cual partimos para proponer el diseño y construcción de un Humedal Artificial a base de

zeolitas naturales, que según pruebas obtenidas en laboratorio contenidas en las Tablas. 3, 4 y 5, se propone proveer de agua segura para 500 habitantes en una hora de tratamiento, este diseño permitirá la movilidad y ensamblaje por cuanto todas sus estructuras son desmontables y se tendrá información de calidad de agua en tiempo real a un ordenador autorizado por medio de un sistema de sensores.

MATERIALES Y MÉTODOS

Utilizando el Índice Rápido de Calidad de Agua **B.M.W.P** (Hellawell, 1978) (J. Alba-Tercedor., 1988), aplicando un sondeo ecológico en un área de explotación minera, este índice asigna un número del 1 al 10 por familia de especies y su cómputo total permite la clasificación de la contaminación, mientras más alto es el número más grave es la contaminación, factor que se consideró para la especie Guaña, a pesar de no representar la mayor abundancia de especie. Pero es la de mayor preferencia en la dieta de los habitantes de los sectores. Los protocolos de captura de especies en este proyecto se desarrollaron de acuerdo a las normas internacionales (Methods, 2012). e instrucciones del laboratorio acreditado encargado del análisis.

Se procedió a la captura de peces en forma aleatoria en un perímetro que no exceda los 100m² de la estación que corresponde a un río de la cuenca, se utilizó un trasmallo artesanal con una granulometría apropiada para capturar peces. Luego de su captura, los peces eran pesados y puestos en recipiente previamente rotulado; y, en cadena de frío fueron transportados hasta el laboratorio donde se efectuó el análisis respectivo, teniendo como objetivo determinar la concentración de arsénico, cadmio, cobre, mercurio, plomo y zinc

Monitoreo se realizó desde el 2012- 2014. Las capturas en meses de invierno fueron muy complicadas debido a la cantidad de solidos suspendidos. En noviembre 2016 y enero 2017, se monitorearon 14 estaciones georreferenciadas de las cuales se formó la Tabla 1

La muestra de aguas se tomó con una botella horizontal, Van Dorn, luego se procedió a reencauzar en botellas de 500ml, 5 por cada estación, las mismas que se rotularon y empezaron la cadena de frío y acidificación hasta el laboratorio.

Con excepción del río Santiago y wimbí, cachaví, corresponde a primer orden y segundo orden respectivamente, los demás ríos el 70%, en su mayoría son ríos de tercer, cuarto y quinto orden, este hecho facilitó la toma de muestras de aguas y sedimentos.

Los resultados obtenidos muestran que la especie más afectada es la guaña, dado que la incidencia de metales pesados se evidenció en los dos ríos donde se capturó esta especie. Aun cuando en las especies cagua y barbudo no se supera de forma abrumadora los valores de referencia, será tema de futuros análisis los hallazgos encontrados.

En las mismas estaciones donde fueron capturados los peces de la sección anterior y de preferencia en un lugar donde no hubiera tránsito de cualquier tipo, se tomaron muestras de sedimentos por medio de una draga Van Veen por cable para sedimento y se depositaban en fundas especiales con capacidad de 1 Kg, dos por estación, se rotulaban y se guardaban para análisis consideraron los ríos Zapallito, Los Ajos, La Boca y Cachaví, siendo en este último el único río en que se observó un exceso de concentración de cobre, según la *NORMA DE CALIDAD AMBIENTAL DEL RECURSO SUELO Y CRITERIOS DE REMEDIACIÓN PARA SUELOS CONTAMINADOS* (Calidad-Ambiental), se puede observar la evaluación de la concentración de metales pesados en la cuenca del Río Santiago respecto a los Límites permitidos por la normativa ecuatoriana para agua dulce contemplada en la *NORMA DE CALIDAD AMBIENTAL Y DE DESCARGA DE EFLUENTES: RECURSO AGUA* (Norma-Agua); los datos mostrados evidencian que en todos los ríos analizados existe al menos un metal pesado que excede el límite permisible; además, se puede apreciar que los ríos que presentan mayor presencia de contaminación por metales pesados son Ricaurte (Río Tululbí), Wimbi, Los Ajos y Zapallito.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a dos factores principales de contaminación, la actividad minera y la deforestación, sin embargo, se debe mencionar que la actividad ganadera en estos cantones es muy reducida, pero si merece nuestra atención la fumigación por la gran actividad agrícola en los sectores

en la cual tendría su incidencia mayor en los meses de invierno, es decir, las lluvias llevarían los residuos a los ríos, pero el mayor área de cultivo lo cubre la palma y su ubicación está muy alejada de los recursos hídricos en estos dos cantones. Este criterio se sustenta debido a la ausencia de pesticidas y herbicidas en los análisis de muestras de aguas reportados. Por lo tanto, la hipótesis de que la actividad minera y la deforestación tienen la principal responsabilidad en éste proceso de contaminación se sostiene con el desarrollo de esta investigación. Estos resultados tienen afinidad con otros autores como E. Rebolledo 2014; M. Bolaños 2016.

En la investigación in situ, al momento de la captura, se evidencio por la población la disminución de la abundancia, así como la diversidad de especie, por lo tanto, se presume que el índice de metales pesados al estar por encima de los LMP según las normativas podría tener alguna incidencia en las condiciones apropiadas en el ecosistema río para la evolución de especies.

La cadena trófica se encuentra muy afectada por cuanto según E Rebolledo, en su investigación determinó la presencia de metales pesados en crustáceos como concha y camarón, con lo cual esta contaminación dejó de ser puntual en peces e invertebrados que con el tiempo ha emigrado ambos lados de la frontera entre Ecuador y Colombia

Con estos antecedentes de contaminación más el hecho de que el 50% de la población rural de estos dos cantones, San Lorenzo y Eloy Alfaro, carecen de servicios de potabilización de agua y permanencia de la actividad minera aurífera y la deforestación agravan la situación de salud de la población lo cual requiere urgentes medidas de remediación. En este sentido se ha propuesto como alternativa de remediación un Tratamiento Pasivo In Situ para Drenajes Mineros a bases de zeolitas naturales, el cual permitirá producir agua segura a la población.

Según F. Morante 2014. Las zeolitas naturales han sido estudiadas por mineralogistas durante más de 200 años y se comportan como una serie de materiales micro porosos hidratados, que tienen cationes cambiables de los grupos de elementos 1^a y 2^a y su estructura interna permite que actúen como tamices moleculares que pueden retener y liberar selectivamente las moléculas por adsorción.

La especie Guaña y el río zapallito permitieron construir este modelo de regresión lineal, por cuanto los intentos con otro río y especie no produjo una alta explicación del modelo debido a que resultaron modelo homocedásticos, es decir, de variabilidad constante

Tabla 1: Evaluación de la concentración de metales pesados en la Cuenca del Río Santiago

Cuenca Río Santiago	Zn	Cu	Cr	Fe	Ni
Límites permitidos*	0.18 mg/l	0.02 mg/l	0.05 mg/l	0.3 mg/l	0.025 mg/l
Punto Limpio Cachavi	0.06	0.15	0.02	0.03	0.00 ₉
Valle de la Virgen	0.11	0.04	0.02	0.02	0.00 ₀
San José de Durango	0.02	0.06	0.02	0.00	0.00 ₀
Minas Viejas	0.22	0.41	0.08	0.19	0.00 ₆
La Boca	0.48	0.14	0.04	0.66	0.02 ₁
Ricaurte (Río Palaví)	0.06	0.10	0.02	0.02	0.00 ₀
Ricaurte (Río Tululbi)	0.19	0.37	0.14	0.71	0.00 ₂
Wimbi	0.53	0.00	0.15	0.44	0.14₃
Wimbicito	0.22	0.09	0.03	0.22	0.00 ₇
Concepcion	0.16	0.19	0.04	0.08	0.02 ₃

Los Ajos	0.51	0.68	0.14	0.40	0.10₃
Maldonado	0.19	0.04	0.06	0.09	0.00 ₄
Zapallito	0.48	0.92	0.18	3.02	0.01 ₅
Río Cachaví (San Antonio)	0.18	0.04	0.02	0.06	0.00 ₄

* *NORMA DE CALIDAD AMBIENTAL Y DE DESCARGA DE EFLUENTES: RECURSO AGUA (Norma-Agua)*

Los resultados, hasta aquí encontrados son el insumo para la construcción de un modelo estadístico que posibilite la explicación de la concentración de metales pesados de la especie Guaña.

Tabla 2: Concentración de Metales pesados en el Río Zapallito

	Especie	Río	Sedimento
Metales pesados	Guaña	Zapallito	Río Zapallito
As	1.3	0.0025	2.5
Cd	1.5	0.0005	0.1
Cu	22	0.0270	28
Hg	0.1	0.0005	0.1
Pb	1.6	0.0025	4
Zn	42	0.1800	44

Modelo planteado es de Regresión Lineal Simple obtenido mediante la utilización del software estadístico Minitab. Los resultados evidencian que con base al Valor p de las pruebas de significancia de los coeficientes, los parámetros del modelo son significativos; y, se obtuvo una alta potencia de explicación ($R^2 \times 100\%$) de 99 %, lo cual indica que el modelo es bueno.

CONCLUSIONES

Los datos obtenidos durante el proceso de esta investigación permiten establecer las causas principales de la contaminación en los cantones de San Lorenzo Y Eloy

El trabajo de investigación cubre las áreas más críticas o donde se acentúan la mayor cantidad de minas auríferas en explotación, se evidenció que precisamente en estos recursos hídricos referente a los peces, la diversidad biológica y la riqueza han disminuido en grandes proporciones, sin embargo, el consumo de estas especies sigue siendo parte de la dieta de la población especialmente rural, agravándose la estructura de la cadena trófica y poniendo en alto riesgo la salud de otros ecosistemas. La selección de los metales pesados e investigados tienen incidencia catastrófica en la salud de la población como hemos citado a organismos internacionales como la EPA de EEUU, entre otros autores.

El modelo de regresión lineal planteado explicó la concentración de metales pesados en la especie Guaña en base a la concentración de metales pesados en agua de los ríos como en sedimentos, no tenemos datos para inferir que esta concentración será similar en otras especies, pero si inferimos que la migración del contaminante ha llegado al 90% del recurso agua, como ejemplo en la Tabla 1 está la Cuenca del río Santiago

La presentación de la alternativa de remediación presentada en esta investigación a diferencia de otras, presenta las siguientes ventajas. El 90 % de la inversión es sobre bienes de capital, es económico debido a la reutilización de la zeolita, se emplea energía hidráulica, mejor disposición final del contaminante, reducción a la mínima expresión los impactos ambientales.

La población no está consciente del riesgo de consumir agua contaminada y defienden el trabajo como tal, denominado en el medio como “playar”, en este sentido estos sectores necesitan una concientización del daño ambiental en la zona y como les afectará en el presente y futuro y por generaciones. Es necesario tomar medidas urgentes por organismos rectores de la salud ambiental de esos ecosistemas.

Se sugiere que se desarrolle un diagnóstico de las concentraciones de metales

pesados en sangre y demás tejidos biológicos en la población de éstos dos cantones.

ALTERNATIVA NATURAL PARA REMEDIACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS DE METALES PESADOS

A continuación, se formaron dos columnas de lechos filtrantes para proceder a realizar el ensayo de adsorción del catión zinc ⁺²

MUESTRA #1

Tabla 3: Datos de la columna de adsorción, muestra 1 de zeolita

ZEOLITA (g)	DIÁMETRO (cm)	ALTURA (cm)	VOLUMEN (cm ³)	DENSIDAD (g/cm ³)	CAUDAL (cm ³ /h)
18,0545	1	10,02	15,85	1,13	60

MUESTRA #2

Tabla 4: Datos de la columna de adsorción, muestra 1 de zeolita

MUESTRA 2 (g)	DIÁMETRO (cm)	ALTURA (cm)	VOLUMEN (cm ³)	DENSIDAD (g/cm ³)	CAUDAL (cm ³)
18,0606	1	9,85	15,03	1,20	60

obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 5: Resultados finales de la absorción de las zeolitas

ZEOLITAS	TIEMPO DE RUPTURA	TIEMPO DE SATURACIÓN	MASA ABSORBIDA POR GRAMO DE ZEOLITA
MUESTRA 1	1.40 H	4 H	161 MG / Zn ²⁺
MUESTRA 2	10.0 H	14 H	813 MG / Zn ²⁺

Como se observa la muestra 2 logró adsorber más del 80% del área total de su celda unitaria, lo cual se corroboró con examen de difracción de rayos X

BIBLIOGRAFÍA

Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (2017). *Tóxic Substances Portal*. Obtenido de ATSDR: <https://www.atsdr.cdc.gov/substances/index.asp>.

Banco Central del Ecuador. (2017). *Reporte de Minería 2017*. Obtenido de BCE: <https://contenido.bce.fin.ec>.

Bancomundial. (2016). *Las tendencias de la inversión minera a nivel mundial y el caso de América Latina*. Obtenido de Ritimo: <https://www.ritimo.org/Las-tendencias-de-la-inversion-minera-a-nivel-mundial-y-el-caso-de-America>

Bustos, F. (2016). *Manual de Gestión y Control Ambiental* (Quinta ed.). Quito: Acierto Gráfico.

Calidad-Ambiental. (s.f.). *Norma de Calidad Ambiental del recurso suelo y criterios de remediación para suelos contaminados*. Obtenido de <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6078/39/LIBRO%20VI%20Anexo%202%20Remediacion%20de%20suelos.pdf>

Canovas R., C. (2013). *Geology, a tool to solve current*

environmental:Remediation of mining in the Iberian Pyrite Belt. Iberian: Geología.

COA. (2017). *Suplemento – Registro Oficial Nº 983 - Código Orgánico del Ambiente.*

Obtenido de <http://www.asambleanacional.gob.ec/sites/default/files/private/asambleanacional/filasambleanacionalnameuid-29/Leyes%202013-2017/102-ambiente/ro-cod-ambiente-ro-s-983-12-04-2017.pdf>

CONVENIORAMSAR. (2012). *Convenio Sobre Humedales Ramsar.* www.ramsar.org. <https://youtu.be/ynw61DCOfs>. Ramsar: UNESCO.

Dante, J. (2016). *Diseño del sistema de tratamiento Pasivo de filtraciones provenientes del depósito e material adecuado d eminería la zanja.* España: Tesis de maestría p18-20.

Domínguez, M. (2013). La Minería a Gran Escala en Ecuador: Una Perspectiva de desarrollo. *Revista E+E ESPAÑA Y EMPRESA*, 3(1), 18.

El Telégrafo. (20 de Septiembre de 2016). Economía. Minería generará \$ 8000 MM de dolares hasta 2025. *El Telégrafo*, pág. 1.

El Universo. (2017). Metales Pesados son una amenaza según informe. *El Universo*, págs. 8-9.

EPA. (2017). *Heattly Watersheds Protection. Pensylvania.* Obtenido de <https://epa.gov/hwp>.

ERMISA. (2006). *Remediación Pasiva In Situ de Drenajes Minero/Industrial.* *ERMITE*, P.6-8.

European-Commission. (2006). *Legislation on heavy metals in feed and food.* Obtenido de <https://ec.europa.eu/jrc/en/eurl/heavy-metals/legislation>

GROUP, T. T. (2014). *Remediación Ambiental.* Obtenido de www.Tolsa.com.

Hallberg, J. (2005). The importance of biological oxidati6n of iron in the aerobic cells of the Jane pilot passive treatment system. *Elsevier*, 67-72. Obtenido de

ELSEVIER .

Indeglia, P. (2012). *ANUARIO DE INVESTIGACIONES Y DESARROLLO. PUCESE*. Esmeraldas: Don Bosco.

J. Alba-Tercedor., A. (1988). *UN MÉTODO RÁPIDO Y SIMPLE PARA EVALUAR LA CALIDAD BIOLÓGICA DE LAS AGUAS CORRIENTES BASADO EN EL DE HELLAWELL* . Obtenido de Asociación Española de Limnología. : www.cienciaviva.pt/Alba-Tercedor1988.,

Ley-Gestión-Ambiental. (2004). *CONGRESO NACIONAL Registro Oficial Suplemento 418 de 10-sep-2004*. Obtenido de <http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/09/LEY-DE-GESTION-AMBIENTAL.pdf> (NACIONAL)

Methods, S. (2012). *Examination of water and wastewater. New York*. Obtenido de <https://revista.ucm.es/index.php/ANHM/article/viewFiel/40440/38790>.

MINERA, L. (2015). *Reglamento General de la Ley Minera. Quito*. Obtenido de www.mineria.gob.ec/uploads.2015/08.

Morante, F. (2014). *Zeolitas Naturales del Ecuador: Geología, caracterización y aplicación 1 ra Edición*. Guayaquil: ESPOL.

Norma-Agua. (s.f.). *NORMA DE CALIDAD AMBIENTAL Y DE DESCARGA DE EFLUENTES: RECURSO AGUA*. Obtenido de <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/ecu112180.pdf>

Pezo, R. H. (1992). Determinación de metales pesados bioacumulable en especies icticas de consumo humano en la amazonia Peruana. *Folia Amazonica*, 4(1), 35.

Pushini, L. (2017). *DRENAJES ANOXICOS CALIZOZ. Santo Domingo*. Obtenido de <https://es.slideshare.net>.

Rebolledo, E. (2013). *La actividad minera en el norte de Esmeraldas-Ecuador. Anuario de Investigación y Desarrollo. PUCESE*. Esmeraldas: Don Bosco.

Salas, J. J. (2017). Jornada Técnica Depuración de Aguas Residuales. Diseño, construcción y explotación de humedales artificiales en pequeños municipios. *Castellón*, 1.

SENAGUA. (2012). *Muestra de Calidad del Agua en el río Cayapas*. Obtenido de Secretaría del Agua: [www.agua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/07/Muestreo Calidad de AguaCayapas.pdf](http://www.agua.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/07/Muestreo-Calidad-de-Agua-Cayapas.pdf).