

## **CONTAMINANTES METALICOS EN SEDIMENTOS Y SUELOS AGRICOLAS GENERADOS POR ACTIVIDADES MINERAS EN LA CUENCA DEL RIO RIMAC**

Autor : Nelli Sofía Guerrero Gárate  
Universidad Nacional de Ingeniería. Lima - Perú



### **RESUMEN CURRICULAR**

- Grado Académico: Bachiller en Química - Universidad Nacional de Ingeniería - Lima - PERU
- Título Profesional: Licenciado Químico - Universidad Nacional de Ingeniería - Lima - PERU
- Post Grado: Maestría en Minería y Medio Ambiente - Universidad Nacional de Ingeniería - Lima – PERU
- Docencia Universitaria: Universidad Nacional de Ingeniería
- Servicio de Agua Potable y Alcantarillado de Lima (SEDAPAL)

Dirección: Jr. San Pedro 187. Urb. San Felipe - Lima 7 – PERU. Teléfono: (51-1)3173586 y (51-1)9049644

FAX : (51-1)4828533 – Universidad Nacional de Ingeniería. e-mail: [nelliguerrero42@hotmail.com](mailto:nelliguerrero42@hotmail.com)

### **RESUMEN**

El presente estudio tiene por objetivo evaluar el impacto causado por la actividad minera sobre las cuencas hidrográficas del departamento de Lima. Teniendo en cuenta la factibilidad de ubicación y acceso ha sido posible el estudio de la cuenca del río Rímac, principal fuente de abastecimiento de agua superficial para el tratamiento en la obtención de agua potable de la ciudad de Lima, con una producción máxima de 21 m<sup>3</sup>/s que abastece a 8 millones de habitantes.

El río Rimac nace a 4000 msnm en el departamento de Lima , en el flanco oeste de la cordillera occidental, provincia de Huarochiri, cortando secuencias de rocas volcánicas, sedimentarias e intrusivos con emplazamiento en sus márgenes de yacimientos polimetálicos importantes como las minas Casapalca, Millotingo, Pacococho, Coricancha, El Barón, Perúbar además de relaveras como Chinchán, Tablachaca en la provincia de Lima y, sus aguas desembocan en el Océano Pacífico, en la provincia del Callao.

Para la realización del trabajo se realizó la toma de muestras de sedimentos de río y drenaje en puntos previamente seleccionados, posteriormente se efectuaron análisis químico para la determinación de los elementos plomo, cadmio, mercurio y arsénico.

Con respecto a la evaluación de Pb, Cu y Zn en sedimentos y relaves de la cuenca del río Rimac en el tramo Ticlio – San Bartolomé, del total de 23 puntos muestreados, 15 excedieron los límites máximos permisibles en plomo, 8 en cobre y 14 en zinc, tomando como base la Norma Holandesa para suelos, cuyos LMP en mg/Kg son: 600, 500 y 3000 para Plomo, cobre y Zinc respectivamente.

Los resultados muestran que los sedimentos del río Rímac depositan minerales sulfurados con metales como cobre, plomo, zinc, arsénico, mercurio, manganeso, y hierro, los mismos que son bioacumulados por algunas plantas.

Se estudió la relación de asimilación límite de metales contaminantes por vegetales y suelos con dosis de relaves, frente a un testigo conformado por suelo libre de relave. Para la prueba se seleccionó al maíz, en cuyo proceso se sembró 3 semillas del mismo en cada recipiente de polietileno de un litro y medio en el suelo preparado con diferentes dosis de relave. El resultado muestra que cuando el suelo llega a tener más del 20% en peso de relaves la semilla no llega a germinar. Para este caso el relave contiene 35 % de pirita con una granulometría del 80% en malla –200 .

Palabras Clave (en negritas): Contaminantes metálicos, Sedimentos, Suelos agrícolas, Prevención de la Contaminación, Actividades mineras.

## **INTRODUCCION**

Este estudio muestra los mecanismos de asimilación de contaminantes metálicos por los vegetales. Los contaminantes metálicos proceden de los relaves mineros, desmontes y efluentes líquidos de las unidades mineras que llegan a los ríos en forma disuelta, en suspensión y como partículas de grano fino correspondiente a fracciones de relaves conformada por minerales ganga como pirita, cuarzo, carbonatos, etc propios de los procesos de flotación, cianuración, fundición, etc, los mismos que son dispersados por gravedad y arrastre del agua, depositándose parcialmente como sedimentos en los ríos.

Bajo estas tres formas llegan a los suelos agrícolas de valles adyacentes a los ríos donde en estado iónico como  $\text{Cd}^{+2}$ ,  $\text{Pb}^{+2}$ ,  $\text{Hg}^{+2}$ ,  $\text{As}^{+3}$ ,  $\text{Zn}^{+2}$ ,  $\text{Cu}^{+2}$  etc. producto de la solubilización de los minerales, pueden ser asimilados por las plantas o animales y llegar por la cadena trófica al ente humano.

La dispersión de partículas de relaves, escorias, etc. en los lechos de los ríos es producido por la acción hidráulica de las aguas y por los canales o derivaciones que llegan a los campos de cultivo, donde por oxidación e hidrólisis en los suelos llegan al estado iónico y pueden ser asimilados por las plantas perturbando su normal desarrollo.

Este trabajo ha permitido evaluar los sedimentos del río Rimac y notar acumulaciones apreciables en la parte media de la cuenca con contenidos de Cu, Pb y Zn que llegan a ser bioacumuladas por algunas plantas .

El trabajo de simulación utilizando la germinación de semillas de maíz en un suelo con diferentes dosis de relave permite determinar que cuando el suelo llega a tener más del 20% en peso de relaves la semilla no llega a germinar. Para este caso el relave contiene 35 % de pirita con una granulometría del 80% en malla –200 .

## **ASPECTOS FUNDAMENTALES DE LOS CONTAMINANTES EN SEDIMENTOS Y SUELOS RELACIONADOS CON LA AGRICULTURA**

Un suelo es un cuerpo natural constituido por partes mineral y orgánica, diferenciado en horizontes de espesor variable y propiedades físicas, químicas y biológicas características; los suelos pueden ser generados in situ por intemperismo de la roca infrayacente o haber sido transportado.

Un sedimento corresponde a un material de grano fino , generalmente menor que malla 80 , constituida por arena fina, limos y arcillas, etc. que es transportada o dispersada por agentes mecánicos como la gravedad y el agua. Su fuente de generación puede ser natural o por la actividad del hombre como el caso de la dispersión de relaves de las relaveras o también de escorias de fundición .

Los granos de minerales reaccionan con el agua de acuerdo su solubilidad , pH, Eh del agua fraccionándose en parte granular , soluble o en suspensión como hidróxidos y coloides.

Los sedimentos de las relaveras o escorias alcanzan los campos de cultivos a través de los canales laterales de irrigación a los valles.

La fracción soluble de los minerales de los relaves llegan a ser asimilados por los vegetales dependiendo de su afinidad y niveles de prioridad ya sea como macronutrientes, micronutrientes o elementos esenciales

Bowen(1966) notó que un elemento es un nutriente para un organismo particular , si el organismo no puede desarrollar su ciclo completo en la ausencia de ese elemento y el elemento no podría ser reemplazado por otro en el proceso de la nutrición, consecuentemente todos los nutrientes

son esenciales para el desarrollo de los organismos Sin embargo no todos los elementos esenciales son nutrientes .

Los elementos generalmente reconocidos como macronutrientes esenciales para las plantas son C, H, O, N, P, K, Ca, Mg y S.

### **• Micronutrientes en suelos**

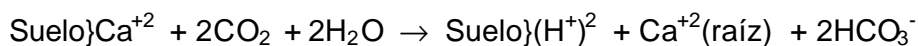
Boro, cloro, cobre, hierro, manganeso , molibdeno ( Para fijación del Nitrógeno) son considerados micronutrientes esenciales para las plantas . Estos elementos son necesarios para las plantas solamente en muy bajos niveles y frecuentemente son tóxicos en altos niveles. Muchos de estos elementos son componentes de enzimas esenciales .

Algunas plantas acumulan niveles extremadamente altos de metales trazas específicos . Cuando acumulan mas que 1 mg/g de peso seco son llamados hiperacumuladores

- **Reacciones de intercambio iónico acido-base en suelos**

El intercambio de cationes en el suelo es el mecanismo por el cual el potasio, calcio, magnesio y metales esenciales en trazas son disponibles por las plantas. Cuando los iones metálicos nutrientes son tomados por las raíces de las plantas, el ion hidrógeno es intercambiado por los iones metálicos ; este proceso, seguido de la lixiviación del calcio, magnesio, y otros iones metálicos del suelo por el agua conteniendo ácido carbónico tiende a acidificar el suelo .

Una ecuación representativa es la siguiente :



- **Características de los relaves**

Los relaves son materiales granulares de tamaños generalmente menores de 2 mm: que comprende fracciones de tamaños arena, limo y arcilla con formas predominantemente angulosos y subangulosos, su mineralogía depende del tipo de yacimiento y proceso metalúrgico; predominando comúnmente en los relaves pirita , carbonatos , cuarzo como mayoritarios y como minoritarios galena, esfalerita, calcopirita, arsenopirita, feldespatos, óxidos de hierro, arcillas, etc. Algunos elementos trazas se encuentran como inclusiones minerales o como sustitución atómica en el mineral base, como el caso del cadmio en esfalerita.

## **OBJETIVOS**

- Conocer la relación de asimilación límite de metales contaminantes por los vegetales y los suelos en los que se desarrollan con determinadas dosis de relaves en su composición.
- Conocer la capacidad de desarrollo de vegetales tomando como caso específico el maíz en medio de suelo/relave mediante simulación en Laboratorio.

## **METODOLOGIA EMPLEADA**

Para la evaluación de relaves y sedimentos en la Cuenca del río Rímac, se realizó un muestreo sistemático y análisis de relaves y sedimentos entre Ticlio y Tornamesa en el que se ha podido establecer la existencia de cinco distritos mineros denominadas Ticlio, Casapalca, río Aruri, río Viso y Perubar. La zona de Ticlio se caracteriza por mostrar algunos afloramientos de yacimientos polimetálicos y un gran depósito de relaves abandonado denominado Unidad Ticlio de la compañía minera Volcán. La zona de Casapalca se caracteriza por tener una serie de yacimientos polimetálicos y relaveras con dispersión al río Rimac de la Empresa Minera Yauliyacu . La zona del río Aruri es un distrito minero donde los yacimientos mas representativos son Minera Tamboraque, Cía. Minera Pacococha y Cía. Minera Millotingo, en la zona del río

Viso el yacimiento y relavera mas importante es el de la Cía. Minera el Barón, luego tenemos la zona de Perubar que engloba una serie de minas polimetálicas.

## ANALISIS DE RELAVES Y SEDIMENTOS

**Tabla N°1. Evaluación de Pb, Cu y Zn en sedimentos y relaves de la cuenca del río Rimac en el tramo Ticlio – San Bartolomé**

Código	Muestra	Lugar	Pb (mg/Kg)	Cu (mg/Kg)	Zn (mg/Kg)
S1	Sedimento	Laguna Ticticocha en Ticlio, 4838 msnm	<b>745</b>	296	369
R2	Relave	Relavera de Unidad Ticlio, 4640 msnm	<b>5181</b>	<b>776</b>	<b>8035</b>
S21	Sedimento	Río Antajasha, 4390 msnm	227	53	199
S22	Sedimento	Río Chinchán 4280 msnm	466	96	1105
S4	Sedimento	Río Antaranra 4210 msnm	171	87	938
R5	Relave antiguo	Rio Rímac Relave inactivo frente a la Planta concentradora de E.M. Yauliyacu 4100 msnm	<b>5714</b>	<b>560</b>	<b>9571</b>
R6	Relave reciente	Relavera Tablachaca de E.M. Yauliyacu 3990 msnm	<b>1767</b>	466	<b>7115</b>
S23	Sedimento	Rio Rimac, altura puente Bellavista, 3780 msnm	<b>3544</b>	489	<b>4653</b>
S7	Sedimento	Rio Blanco, antes de llegar al Río Rímac 3500 msnm	27	33	151
S24	Sedimento	Rio Rimac aguas arriba del Túnel Gratón 3253 msnm	34	38	175
S8	Sedimento	Río Rímac, aguas abajo del Túnel Gratón 3235 msnm	<b>7280</b>	<b>1062</b>	<b>8439</b>
S25	Sedimento	En el río Rimac, aguas arriba de Tamboraque, 3040msnm	<b>4912</b>	<b>807</b>	<b>5319</b>
R11-A	Relave antiguo	Relave Tamboraque en margen izquierda del río Rímac 2990 msnm	<b>2561</b>	<b>514</b>	2317
S11	Sedimento	Río Aruri, antes de llegar al río Rimac 2989 msnm	<b>767</b>	275	1798
S26	Sedimento	Río Rímac, aguas arriba de río Viso 2735 msnm	<b>1324</b>	470	<b>3281</b>
S14	Sedimento	Rio Rimac aguas abajo del río Viso 2720 msnm	<b>779</b>	333	<b>3714</b>
S27	Sedimento	En el río Rimac, al frente de relave inactivo R15. 2585msnm	540	230	1563
R15	Relave antiguo	Relave inactivo en margen izquierdo del Rio Rimac.	484	<b>2082</b>	<b>5778</b>

		2600 msnm.			
S16	Sedimento	Efluente al río Rimac, (colecta drenaje de planta metalúrgica de mina El Barón). 2590 msnm	<b>925</b>	<b>2634</b>	<b>6507</b>
S28	Sedimento	En el Río Rimac, antes de Tornamesa. 1675 msnm	<b>984</b>	416	<b>3368</b>
S32	Sedimento	En canal Masipa que sale del río Rimac hacia Cocachacra. 1645 msnm	<b>1267</b>	<b>583</b>	<b>4893</b>
S29	Sedimento	Río Rimac, a la altura de Tornamesa, antes de confluencia con río Seco 1630 msnm	<b>752</b>	446	<b>4093</b>
S30	Sedimento	De vivero experimental de Tornamesa , 1629.7 msnm	263	157	<b>4791</b>
<b>LMP : Tabla Holandesa (Ministerie VROM 1983)</b>			<b>600</b>	<b>500</b>	<b>3000</b>

Para la prueba de simulación de desarrollo de vegetales a nivel de Laboratorio, se seleccionó un suelo libre de contaminantes correspondiente al jardín de la Facultad de Minas de la UNI – LIMA, y también relave procedente de la planta de flotación de la FIGMM emplazada en el cerro de arrastre.

Se caracterizó previamente el relave en el que se determinó 35% de pirita, 1% de galena, 1% de esfalerita, 0.5% de esfalerita, 0.5% de calcopirita, 45% de cuarzo, 12% de feldespatos, 5% de arcillas con una granulometría del 80% en malla –200.

Para la prueba se mezcló en forma homogénea relaciones en peso de relave versus suelo en las dosis como muestra la Tabla N°2.

**Tabla N°2. Relación Relave / Suelo para evaluar germinación de semilla de maíz.**

Relave	Suelo	%Relave	Germinación de semilla de maíz
1	1	50.0	No
1	2	33.3	No
1	3	25.0	No
1	4	20.0	Si
1	5	16.7	Si
1	6	14.3	Si
1	7	12.5	Si(raíces, tallos y hojas bien desarrollados)
1	8	11.1	Si(raíces, tallos y hojas bien desarrollados)
1	9	10.0	Si(raíces, tallos y hojas bien desarrollados)
1	10	9.1	Si(raíces, tallos y hojas bien desarrollados)

Además se construyó una muestra testigo constituida por suelo libre de relave.

La planta que se seleccionó para la prueba corresponde al maíz, para lo cual se realizó previamente antes de sembrarlo una prueba de germinación de semillas en tubos de ensayo de vidrio, lo que evidenció un 80% de eficiencia.

Para el sembrado se colocaron tres semillas en cada recipiente de plástico de polietileno de un litro y medio en el suelo preparado con las diferentes proporciones de relave / suelo como indica la Tabla N°2.

### ***Desarrollo de planta de maíz en el medio suelo-relave***

De las tres semillas sembradas en cada recipiente después de cinco días se observó que solamente una semilla había germinado en siete recipientes y en los recipientes con mayor proporción de relaves no germinaron ninguna de las semillas, esto corresponde a las proporciones 1:1 , 1:2 , 1:3 además se observan diferencias en la morfología y taxonomía del tallo y las hojas.

El maíz cuya planta en proceso de experimentación del presente trabajo con nombre botánico viene a ser una planta monocotiledónea perteneciente a la especie *Zea Mays*. Familia de las gramíneas.

Respecto a los tallos podemos observar que estos se hacen mas gruesos cuando aumenta el contenido de suelo en el recipiente.

Respecto a las hojas podemos observar que estas adquieren mayor tamaño en los suelos que contienen menos relaves.

Con respecto a la asimilación de metales contaminantes en plantas, relacionados con sedimentos y aguas del entorno ambiental en el río Rímac se colectó muestras en dos estaciones.

La primera estación esta ubicada en la margen izquierda del río Rimac, aguas arriba del poblado de Tornamesa, definida con las coordenadas siguientes :

18L	Este	335 875
	Norte	8' 684 309
	Altura	1574 msnm

Características de muestra de agua tomada en margen izquierda del río Rimac :

pH	8.5
T°C	23.9
Conductividad	590 $\mu$ mhos/cm
Potencial	68 mV

En esta estación se tomó también una muestra de sedimentos.

La segunda estación alejada aproximadamente 200 m de la margen izquierda del río Rimac se tiene un sembrío de tunas con desarrollo de cochinilla en sus pencas, definida por las coordenadas siguientes:

18L	Este	335 877
	Norte	8' 684 216

En esta estación se tomaron muestras de suelo en que se desarrollan las tunas y pencas; notamos que este valle esta casi a un nivel del cauce del río, de manera que en épocas de aumento de caudal los sedimentos acarreados por el río Rimac se depositan en estos suelos; siendo posteriormente solubilizados los minerales

sulfurados finos que constituyen los sedimentos y asimilados posteriormente por las plantas a través de sus raíces .

Los metales totales se han determinado en la Universidad Nacional de Ingeniería utilizando un Espectrofotómetro de Absorción Atómica marca Shimadzu AA-6701F con dispositivos de hidruros y mercurio, utilizando métodos EPA.

Las Determinaciones de parámetros físico-químicos en el presente trabajo se realizaron en base a las técnicas establecidas en el Standard Methods (APHA -AWWA- WPCF, 1995)

## ACTIVIDADES

Revisión bibliográfica.

Toma de muestras y medición de parámetros fisicoquímicos en campo.

Determinación de plomo, cobre y zinc en relaves y sedimentos en el tramo Ticlio – San Bartolomé de la Cuenca del río Rímac.

Evaluaciones cuantitativas de metales pesados en muestras de agua del río de la zona crítica y en vegetales.

Determinación de dosis de relaves/suelo para la germinación del maíz.

## RESULTADOS OBTENIDOS

Resultados analíticos

Con respecto a la evaluación de Pb, Cu y Zn en sedimentos y relaves de la cuenca del río Rimac en el tramo Ticlio – San Bartolomé, del total de 23 puntos muestreados, 15 excedieron los límites máximos permisibles en plomo, 8 en cobre y 14 en zinc.

<b>LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES</b>			
	<b>Pb (mg/Kg)</b>	<b>Cu (mg/Kg)</b>	<b>Zn (mg/Kg)</b>
L.M.P (*)	<b>600</b>	<b>500</b>	<b>3000</b>
Puntos muestreados	23	23	23
Puntos que exceden	<b>15</b>	<b>8</b>	<b>14</b>

(\*): Tabla Holandesa para suelos (Ministerie VROM 1983)

En el caso de la muestra de agua y sedimentos de la primera estación tenemos:

<b>METALES DISUELTOS EN (ppm)</b>							
Cu	Pb	Zn	Fe	As	Hg	Cd	SST(ppm)
0.002	0.224	0.015	0.010	0.013	0.0001	0.0013	42

En el sedimento (malla –80) del río Rimac de la primera estación :

Cu(ppm)	Pb(ppm)	Zn(ppm)	As(ppm)	Hg(ppm)	Mn(ppm)	Ag(ppm)
---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------



271	298	1408	0.324	1.011	880	12.16
-----	-----	------	-------	-------	-----	-------

En la fracción malla -80 del suelo y penca de tunas de la segunda estación se determina:

En el suelo (malla-80)

Cu(ppm)	Pb(ppm)	Zn(ppm)	As(ppm)	Hg(ppm)	Mn(ppm)	Ag(ppm)
46	70	256	26	0.726	662	0.35

En la penca de la tuna :

Cu(ppm)	Pb(ppm)	Zn(ppm)	As(ppm)	Hg(ppm)	Mn(ppm)	Fe(ppm)
0.21	0.43	3.7	0.002	0.021	8.74	3.02

Los resultados muestran que los sedimentos del río Rimac depositan minerales sulfurados con metales contaminantes y que en el caso de la tuna tiene capacidad de bioacumulación de metales en las pencas.

Los análisis de las muestras de agua han sido realizados de acuerdo al Protocolo de Monitoreo de agua del MEM y comparado con los niveles máximos permisibles para efluentes líquidos minero-metalúrgicos según Resolución Ministerial N° 011-96-EM/VMN y valores de la LGA (D.L. 17752). Los resultados de Pb, Zn y Cu en sedimentos ha sido comparado con la Tabla Holandesa utilizada como índice para evaluar suelos contaminados, indicando valores máximos de 600 mg/Kg para Pb, 500 mg/Kg para Cu, y 3000 mg/Kg para Zn.

Los resultados analíticos de las muestras de agua demuestran que la abundancia de los iones contaminantes provenientes de vertimientos y tributarios al río Rímac está de acuerdo a su comportamiento geoquímico; siendo el parámetro más importante el pH, que en este tramo de Ticlio - San Bartolomé se encuentra entre 7-9, lo cual tiende a inhibir la movilidad del As, Cu, Pb, Fe por la formación de hidróxidos que generan material en suspensión, finalmente son precipitados, quedando móviles el Zn y Mn que precipitan cuando el pH toma valores entre 9-10. Como la precipitación de los iones no es total; estos quedan con valores cercanos a su background o abundancia normal promedio en aguas de río.

## CONCLUSIONES

El desarrollo del trabajo ha permitido conocer la relación de asimilación límite de metales contaminantes por los vegetales y los suelos en los que se desarrollan con determinadas dosis de relaves en su composición. Las dosis de relaves dependería de sus características y composición.

El trabajo de germinación experimental del maíz en medio de suelo/relave muestra anomalías morfológicas en las tallos e inhibe su capacidad de desarrollo .

En el caso del río Rimac la dispersión de los relaves de las relaveras emplazadas en la cuenca alta y media llegan a los campos de cultivos a través de canales laterales, inhibiendo el desarrollo de las plantas.

Los resultados de los análisis de las muestras de aguas demuestran ser aceptables generalmente en las clases II y III según la Ley General de Aguas. La abundancia de los elementos en las aguas es controlada por el pH que genera hidróxidos quedando las concentraciones en los límites de su background natural. El pH en parte, mantiene su comportamiento alcalino por los vertimientos básicos de las Plantas de Flotación (Pb, Zn, Cu) y la disolución de rocas carbonatadas, volcánicas e intrusivas por las que discurre.

Los resultados del análisis de sedimentos en malla -80 (partículas con tamaño promedio e inferiores a 177 micrones) nos permite colectar la fracción correspondiente a los relaves; que en el caso de los sedimentos muestreados se observa bajo el microscopio, granos de minerales sulfurados como pirita, pirrotita, esfalerita, galena, calcopirita, etc. con granos de carbonatos, cuarzo, feldespatos, óxidos, etc. los sedimentos conteniendo residuos de relaves mineros.

## **RECOMENDACIONES**

Es necesario optimizar los procesos biológico / inorgánico formados por guano, algas, calizas que permiten neutralización y disminución de la carga contaminante de los drenajes ácidos

## **REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

STANLEY E. MANAHAN (1997) Environmental Science and Technology, New York 339-334, 351-370, 445- 456

APHA – AWWA-WPCF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 19th Edición. Washington, D.C. USA. (1995)

MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS REPUBLICA DEL PERU, Protocolo de Monitoreo de Calidad de Aguas y Emisiones 1994