

Zonificación de contaminación por metales pesados en San Bartolomé

Valencia Fernando¹

¹ Escuela de Ingeniería en Minas/
Facultad de Ciencia y Tecnología/
Universidad del Azuay
Av. 24 de Mayo y Hernán Malo/
Azuay/Ecuador
fvalencia@uazuay.edu.ec

RESUMEN

La investigación trata de la determinación espacial de concentraciones de metales pesados presentes en suelos de uso agrícola mediante la aplicación de un modelo geoestadístico generado a partir del análisis de la dispersión secundaria del yacimiento polimetálico de San Bartolomé y de las piscinas de relave que desde el año 1994 se encuentran abandonadas significando las mismas un pasivo ambiental. El área de estudio cubre 2400 hectáreas correspondientes a las microcuencas de las quebradas Sorche y El Salado de la parroquia San Bartolomé, cantón Sígsig provincia del Azuay. Para la elaboración del modelo de contaminación por metales pesados se procedió a la toma de muestras de suelo de forma estratificada en áreas con pendientes menores a 20° y de vocación agrícola con una densidad al menos de 2.5 muestras por kilómetro cuadrado; en total se recolectaron 106 muestras. El análisis en laboratorio determinó en parte por millón (ppm) la concentración de metales pesados: plomo (Pb), cadmio (Cd) y zinc (Zn) mediante espectrometría de absorción atómica. Se procedió al análisis y tratamiento de la información que incluye la generación del modelo predictivo de dispersión de metales pesados en la zona de interés mediante la utilización de un software SIG. Este modelo permitió establecer las áreas sobre las cuales la concentración de metales pesados objeto de la investigación supera los umbrales de riesgo de acuerdo a la normativa ambiental ecuatoriana y cartografiar los resultados que pueden ser utilizados como insumos de ordenamiento territorial. Se proponen alternativas tendientes al manejo del pasivo ambiental.

Palabras clave: **geoestadística, geoquímica, metales pesados, contaminación, relaveras.**

ABSTRACT

The research deals with the spatial determination of concentrations of heavy metals present in soils of agricultural use through the application of a geostatistical model generated from the analysis of the secondary dispersion of the polymetallic deposit of San Bartolome and the tailings deposit that from the year 1994 are abandoned, meaning that they are an environmental liability. The study area covers 2400 hectares corresponding to the microbasins of the Sorche and El Salado streams of the San Bartolome parish, Sig-sig province of the Azuay. For the elaboration of the model the soil samples were taken stratified in areas with slopes less than 20° and agricultural vocation with a density of at

least 2.5 samples per square kilometer; in total, 106 samples were collected. The laboratory analysis determined the concentration of heavy metals (Pb, Zn, Cd) by atomic absorption spectrometry, the method used in the laboratory allows to determine concentration in ppm. We proceeded to the analysis and treatment of the information that includes the generation of the predictive model of dispersion of heavy metals in the zone of interest through the use of GIS software. This model allowed to establish the areas on which the concentration of heavy metals subject to the investigation exceeds the thresholds of risk according to the Ecuadorian environmental regulations and to map the results that can be used as input of parochial territorial ordering. Alternatives to the management of identified environmental liabilities are proposed.

Keywords: *geostatistical, geochemistry, heavy metals, tailings deposits.*

I. INTRODUCCIÓN

La minería es una de las actividades antrópicas más impactantes al Ambiente y ha sido declarada como sector estratégico por el gobierno ecuatoriano, los denominados proyectos estratégicos y su próximo arranque han generado una significativa conflictividad social respecto al tema de la minería a gran escala en nuestro país, de las pocas experiencias se han conseguido siempre resultados negativos referidos al impacto ambiental como el caso de Nambija, Ponce Enríquez, San Gerardo, San Bartolomé en la provincia del Azuay entre otros.

Considerando la movilidad geoquímica de metales pesados y su importancia al ser contaminantes de agua y suelo, es importante conocer la dinámica de los mismos hacia los estratos indicados. Investigaciones recientes utilizan la geoquímica y la geoestadística para la modelación de la contaminación por metales pesados sobre suelo y agua sobre zonas rurales y urbanas (Islam, Ahmed, Raknuzzaman, Habibullah -Al- Mamun, & Islam, 2015), especial interés demarcan las investigaciones sobre zonas de relaveras abandonadas (Khalil et al., 2013), los principales metales pesados de interés por su incidencia en la salud humana son el Pb, Cd, Zn, y el Hg, los dos primeros tienen especial interés en el estudio de la bio-absorción de los vegetales y la incidencia en la cadena trófica incluyendo la humana (Rehman, Khan, Brusseau, & Shah, 2017).

Los estudios realizados procuran también la definición de la incidencia del background natural de concentraciones de metales pesados y la acción antrópica como generadora de anomalías geoquímicas, vale destacar que algunas actividades antrópicas diversas a la minería se identifican también como importante fuente de generación de contaminación por metales pesados (Wu et al., 2015).

La naturaleza de los suelos andinos resultan de especial interés en cuanto a la respuesta sobre la contaminación de metales pesados, experiencias de investigación sobre zonas de altura (Yang et al., 2014) muestran comportamientos particulares sobre depósitos y relaveras de yacimientos de Cu.

Las herramientas de análisis de datos, considerando la movilidad geoquímica de metales pesados como valores que se comportan como variables regionalizadas, son los interpoladores geoestadísticos de mucha utilidad en minería para procesos de evaluación de reservas y ahora aplicados también en la generación de modelos de dispersión geoquímica (Tapoglou, Karatzas, Trichakis, & Varouchakis, 2014).

II. MÉTODO

Para realizar la zonificación de contaminación por metales pesados se ha procedido con la recolección de 106 muestras de suelo ubicadas sobre áreas de vocación agrícola y homo-

géneamente distribuidas sobre el área de estudio, las mismas han sido sometidas a análisis de laboratorio para determinar la concentración de metales pesados en las mismas (Pb, Zn, Cd), y con el apoyo de software SIG proceder a la generación de modelos de dispersión geoquímica.

Área de estudio.- corresponde a las microcuencas hidrográficas de las quebradas Sorche y El Salado, han sido elegidas por representar unidades naturales de respuesta ante dinámica de disolución y transporte (movilidad de minerales) y estar el depósito mineral y relavera sobre la parte alta cerca de las dos microcuencas. La zona cubre 2440 hectáreas y se ubica a 20.5 km en línea recta al sureste de la ciudad de Cuenca, ver Figura 1, mayoritariamente ubicadas sobre la parroquia San Bartolomé del cantón Sígsig provincia del Azuay. Su acceso se lo puede realizar por las vías de primer orden: Cuenca, El Valle, Santa Ana, San Bartolomé o Cuenca, El Descanso, Gualaico, Chordeleg, La Unión, San Bartolomé. Ver Figura 1. El punto más alto se encuentra a los 3320 y el más bajo a los 2300 msnm su relieve es accidentado por la incidencia erosiva de los drenajes marcando significativamente las márgenes de las quebradas aunque las pendientes indican que existe más del 85% de superficie por debajo de los 30° de inclinación, terrazas muy atractivas desde el punto de vista agrícola productivo se pueden observar en toda el área de estudio.

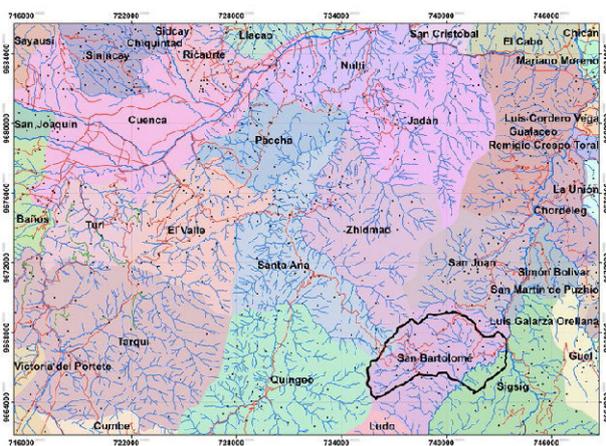


Figura 1.- Ubicación regional de la zona de estudio, en colores la división parroquial.

Geología.- Geológicamente se ubica a la formación Tarqui como la dominante en la zona de estudio, estos materiales son volcánicos eólicos en su mayoría fuertemente degradados, es considerada como el manto volcánico que cubre extensas regiones en la sierra sur del Ecuador en discordancia sobre capas más antiguas. En la secuencia hay depósitos de piroclastos y aglomerados de composición riolítica a andesiti-

ca; tobas, cenizas volcánicas e ignimbritas y localmente lavas. (PRECUA, 1998)

En las inmediaciones del centro parroquial de San Bartolomé se identifica la presencia de la Unidad Maguazo, consiste principalmente de filitas, micaesquistos, pizarras y cuarcitas intensamente plegadas. Estas rocas fueron producidas por el metamorfismo de rocas volcánicas y volcanodetritos (andesitas, tobas, conglomerados y aglomerados volcánicos), rocas que están expuestas también en el valle del río Paute, aguas abajo de La Josefina. Este metamorfismo ocurrió hace 86 a 90 millones de años (Ma), Cretácico Superior-Senoniano. (PRECUA, 1998).

Hacia la parte media de la microcuenca de la quebrada El Salado se ha mapeado la Unidad Chiguinda, estos materiales forman parte de la denominada serie Loja y domina la parte Sur de la Cordillera Real, litológicamente encontramos cuarcitas y filitas negras, vale mencionar que resulta particular la aparición de esta formación sobre la zona de estudio puesto que se trata de rocas muy antiguas. Hacia la parte baja de la microcuenca se identifican materiales mayoritariamente volcánicos conformando tobas estratificadas de grano fino, lapilli correspondientes a la denominada formación Nabón. Sobre las márgenes del río Pamar podemos encontrar depósitos aluviales de pequeña extensión y potencia, formados por clastos decimétricos hasta arenas.

Planificación de intervención en campo y logística.- El estrato muestral definido fueron áreas de uso agrícola con pendientes inferiores a 20°, una vez definidas cartográficamente estas áreas se procedió a la ubicación de posibles sitios de muestreo, ver Figura 2.

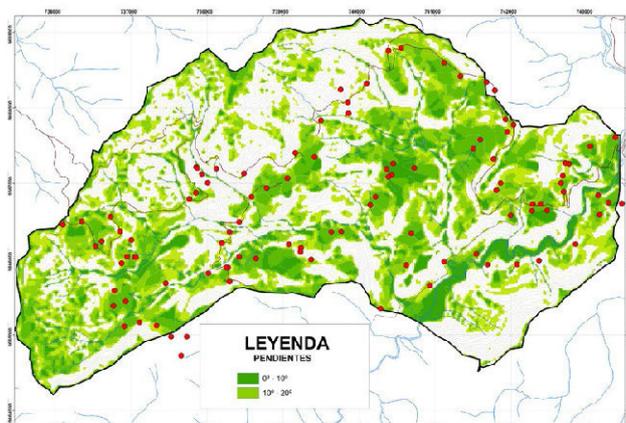


Figura 2.- Zonas de pendiente menor a 20° y puntos de muestreo

Toma de muestras en suelos.- Las muestras fueron tomadas previo el consentimiento de los propietarios sobre suelo de uso agrícola a treinta centímetros bajo la superficie por lo que fue necesaria la excavación respectiva. La muestra en cantidad de 3 kilos aproximadamente fue enfundada y etiquetada con un código secuencial del toma y los datos de ubicación espacial tomada con GPS en el sistema WGS 84, ver Figura 3. Fueron necesarios 10 días para la obtención de los 106 muestras de suelo que incluyen dos muestras tomadas sobre el material en el sitio de la relavera que finalmente fueron excluidos del posterior análisis estadístico por no pertenecer al estrato definido.

Preparación mecánica de muestras.- Las muestras previo a su análisis de laboratorio fueron objeto de una preparación que incluyó:

- Secado en un horno eléctrico;
- Conminución del material recolectado en un molino de suelos y mortero;
- Clasificación, se utilizó el material pasante de la malla número 200 (75um); cuarteo y lixiviación, preparación química de la muestra.



Figura 3.- Toma y etiquetado de muestras.

Ensayos de laboratorio.- para la determinación de la presencia de metales pesados Pb, Zn, Cd, las muestras de suelo fueron analizadas en polarógrafo para determinar los índices de Cd, mientras las concentraciones de Pb y Zn fueron determinadas por adsorción atómica.

Validación de muestras - análisis exploratorio de datos.- las muestras tomadas incluyeron dos datos que se los excluyó por no corresponder al estrato muestral definido (suelos agrícolas), estas muestras fueron tomadas de la relavera de la mina (M105, M106) como referencias de concentración de sitio.

Los resultados de laboratorio fueron analizados estadísticamente de modo de definir parámetros descriptivos como fase previa a la definición del método geoestadístico a aplicar, ver Figura 4, 5 y 6. Para el Pb y Zn fueron validados todos los puntos muestrales, estadísticamente no siguen una distribución normal pero los datos pueden ser normalizados mediante ajuste logarítmico. Para el caso del Cd se excluyeron dos puntos por presentar valores extremos que no pueden ser justificados técnicamente.

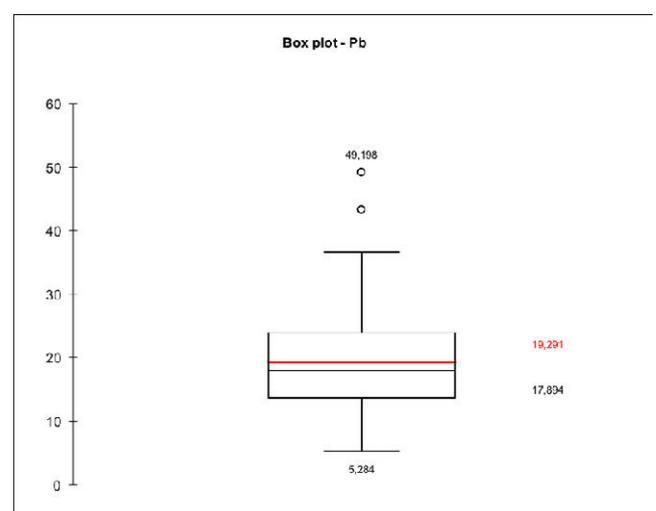


Figura 4.- Diagrama de caja para valores muestrales de Pb.

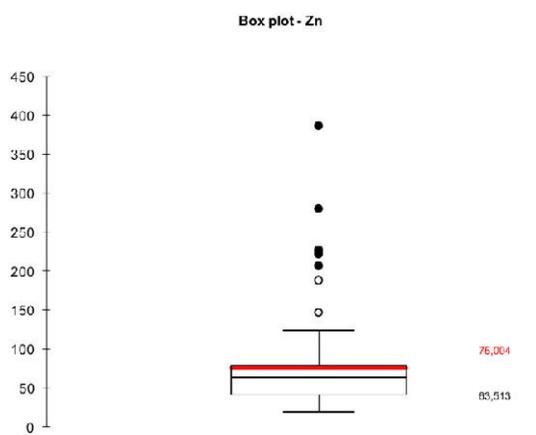


Figura 5.- Diagrama de caja para valores muestrales de Zn.

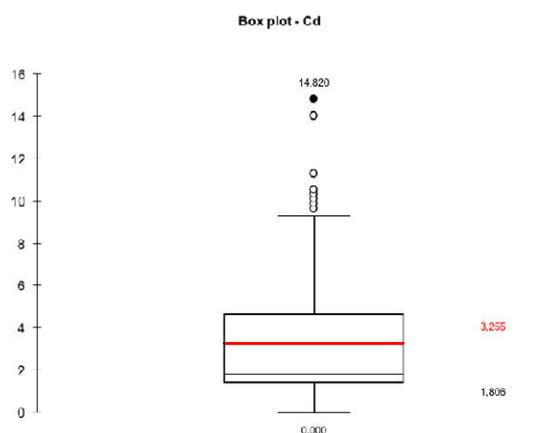


Figura 6.- Diagrama de caja para valores muestrales de Cd.

Análisis y tratamiento de la información.- Los criterios para la selección del método geoestadístico consideraron la distribución y comportamiento espacial de los datos (anisotropía) definiéndose como mejor alternativa la utilización del interpolador krigin universal para el Pb y Zn y el interpolador inverso de la distancia (IDW) para el Cd, vale aclarar que este último método no es considerado como geoestadístico pero su aplicación asemeja más a éstos que los métodos clásicos de interpolación.

Los resultados obtenidos fueron trabajados hasta obtener una delimitación espacial de rangos de concentraciones para los metales pesados analizados de acuerdo a la normativa ambiental ecuatoriana indicada en el Libro VI Anexo 2 “Norma de Calidad Ambiental del Recurso Suelo y Criterios de Remediación para Suelos Contaminados”, en este mismo cuerpo legal se indican los “Factores Indicativos de Contaminación” mediante el cual se define el grado de perturbación sobre cada parámetro, ver Tabla I.

TABLA I
FACTORES INDICATIVOS DE CONTAMINACIÓN, TULAS, LIBRO VI ANEXO 2.

FACTOR DE CONTAMINACIÓN (CONCENTRACIÓN PRESENTE/ VALOR DE FONDO)	GRADO DE PERTURBACIÓN	DENOMINACIÓN
< 1,51	0	Cero o perturbación insignificante
1,5 - 3,0	1	Perturbación evidente
3,0 - 10,0	2	Perturbación severa
> 10,0	3	Perturbación muy severa

III. RESULTADOS

Dispersión de Pb.- el modelo de dispersión de Pb mostró un comportamiento razonable con valores entre 25 y 30 ppm sobre las inmediaciones de la mina y relavera e inferiores a 15 ppm hacia las partes medias y bajas de la zona de estudio, la anisotropía es marcada en dirección Noroeste - Sureste.

El mapa de interpolación fue reclasificado considerando el valor máximo permitido para calidad de suelos del Libro VI Anexo 2 que para Pb indica 25 ppm. Ver Figura 7.

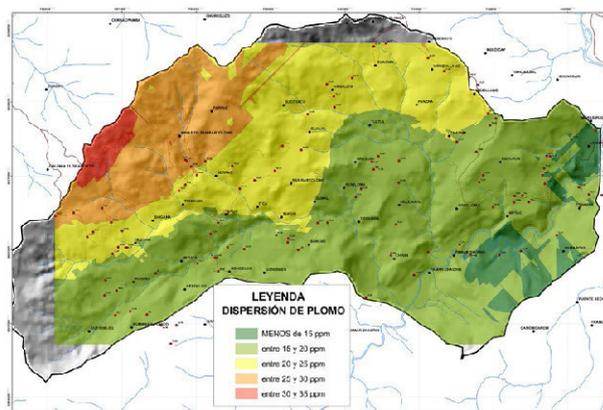


Figura 7.- Mapa de concentraciones esperadas de Pb.

Considerando como valor de fondo la concentración mínima esperada (13.53 ppm) se ha determinado que el valor máximo de concentración presente/valor de fondo es de 2.8.

El área correspondiente a perturbación insignificante alcanza los 1329 ha y perturbación evidente 918 ha. Ver Figura 8.



Figura 8.- Mapa de clasificación por Factor de Contaminación de Pb.

Dispersión de Zn.- de similar forma que con el plomo, el modelo de dispersión de Zn mostró un comportamiento razonable con valores mayores a 130 ppm sobre las inmediaciones de la mina y relavera y parte baja de la microcuenca Sorche, valores menores a 60 ppm se muestran hacia las partes bajas de la zona de estudio, la anisotropía es marcada en dirección Noroeste - Sureste.

El mapa de interpolación fue reclasificado considerando el valor máximo permitido para calidad de suelos del Libro VI Anexo 2 que para Zn indica 60 ppm. Ver Figura 9.

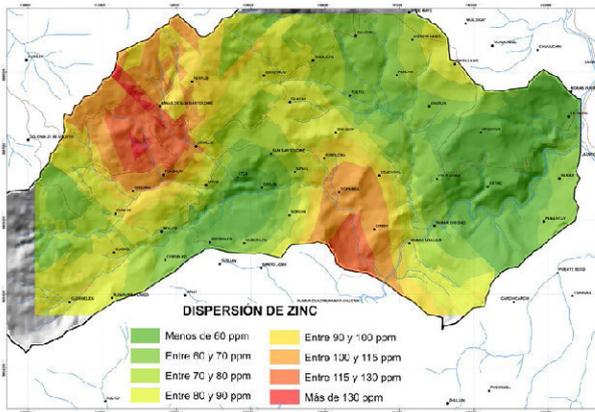


Figura 9.- Mapa de concentraciones esperadas de Zn.

Considerando como valor de fondo la concentración mínima esperada (40.16 ppm) se ha determinado que el valor máximo de concentración presente/valor de fondo es de 3.7.

El área correspondiente a perturbación insignificante alcanza las 432 ha, perturbación evidente 1733 ha y con perturbación severa 81ha. Ver Figura 10.

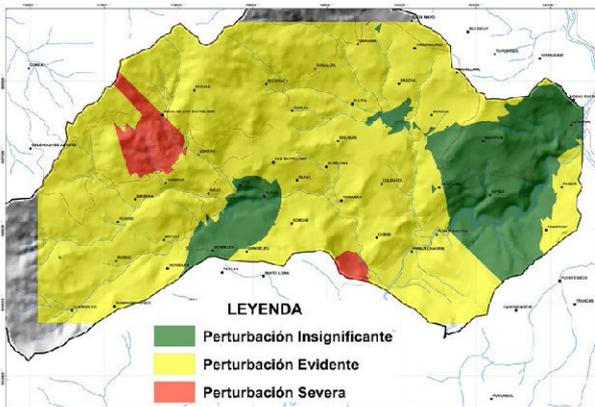


Figura 10.- Mapa de clasificación por Factor de Contaminación de Zn.

Dispersión de Cd.- el modelo de dispersión de Cd mostró concentraciones anómalas de forma dispersa, lo que no pudo ser justificado de forma razonable vinculándolo con la presencia de la mina y zona de relaveras. Las concentraciones encontradas muestran varios puntos con valores sobre los 10 ppm ubicados de forma dispersa sobre el área de estudio. Ver Figura 11.

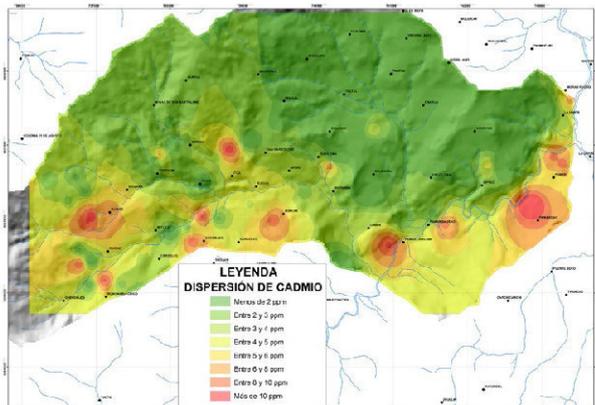


Figura 11.- Mapa de concentraciones esperadas de Cd.

Considerando como valor de fondo la concentración base indicada en Libro VI Anexo 2, Criterios de Calidad de Suelo, (0,5 ppm) se ha determinado que el valor máximo de concentración presente/valor de fondo es de 29.62.

El área correspondiente a perturbación insignificante alcanza las 733 ha, perturbación evidente 756 ha, con perturbación severa 639 ha y con perturbación muy severa 118 ha. Ver Figura 12.

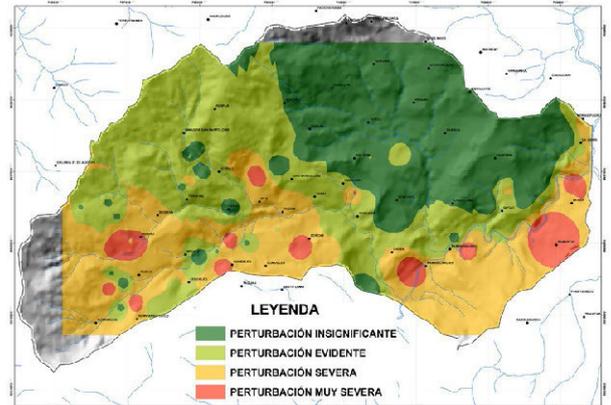


Figura 12.- Mapa de clasificación por Factor de Contaminación de Cd.

Zonificación por concentración de metales pesados.- se elaboró una zonificación de riesgo por concentración de metales pesados combinando los pesos de clases de rangos de concentraciones de Pb, Cd, y Zn, se consideraron para cada metal pesado los límites máximos permisibles en la normativa ecuatoriana, el producto final define tres zonas: Riesgo Alto, Medio y Bajo, ver Figura 13. Por el estrato muestral utilizado (áreas de uso agrícola), el riesgo asociado se refiere a la posibilidad que los metales presentes en el suelo puedan introducirse a la cadena trófica humana por medio de los cultivos.

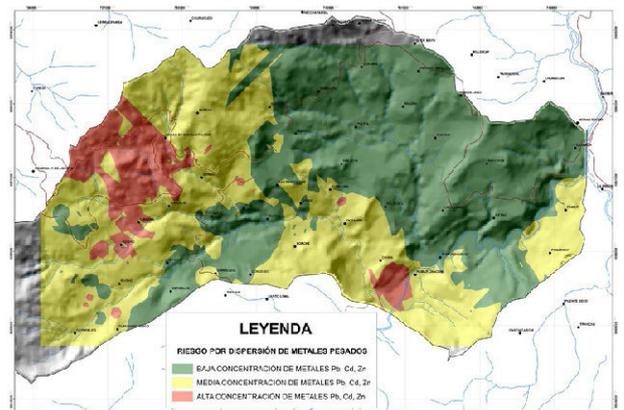


Figura 13.- Zonificación de riesgo de contaminación por presencia de metales pesados.

IV. CONCLUSIONES

La dispersión de minerales y la formación del paisaje geoquímico es un proceso natural relacionado con la dinámica geológica de la corteza terrestre, la presencia de concentraciones anómalas de minerales y en este caso específico de metales pesados pueden ser relacionados también a procesos antrópicos como la minería.

Los factores de contaminación indicados en el Libro VI Anexo 2 han resultado relevantes para el Zn y el Cd en donde se encuentran caracterizaciones de perturbación severa y muy severa.

Los modelos de dispersión de Pb sigue una lógica espacial respecto a la ubicación de la relavera de la mina de San Bartolomé, los valores alcanzados por la interpolación Krigin Universal muestran zonas con concentraciones esperadas de hasta 35 ppm que comparados con investigaciones similares en otras localidades se muestran relativamente bajos (Beane, 2016), y siendo los valores superiores de concentración de Pb en la corteza continental de 17 ppm (Khalil, 2012).

Los modelos de dispersión geoquímica generados por interpolación geoestadística muestran valores coherentes y correlacionados para y entre el Pb y el Zn, esta coherencia se basa en el hecho de encontrar la fuente de emisión de metales pesados en la zona del depósito mineral y la relavera, aquí con concentraciones relativamente altas y más bajas conforme se aleja del sitio. Mientras tanto los valores de Cd muestran un comportamiento caótico al encontrarse valores anómalos altos sin relacionarse con la fuente de emisión indicada anteriormente. El modelo de dispersión generado y los valores proyectados sugiere la existencia de un mecanismo no relacionado con la mina y relavera de San Bartolomé como fuente de dispersión de Cd.

La normativa ambiental ecuatoriana establece el límite de calidad en suelos para remediación en 25 ppm para el Pb, considerando esta última referencia el área en la zona de estudio en donde se espera superar este límite alcanza el 48% de cobertura, sin embargo de aquello vale indicar también que el límite máximo permisible para suelos de uso agrícola es de 100 ppm, encontrándose toda el área por debajo de este valor.

Similares comportamientos encontramos para los resultados de Zn, su modelo de dispersión muestra valores de predicción máximos de 130 ppm, estos valores también se ubican en los alrededores de la mina y relavera, el valor en la corteza es de 71 ppm, relativamente en comparación con estudios en otras minas son valores bajos (Islam, 2015).

Los valores definidos por el modelo predictivo de Cd aplicando el método inverso de la distancia muestran concentraciones altas hacia las riberas de la quebrada Sorche y Río Bolo, la norma de calidad de suelos indicada en el TULSMA indica como valor de referencia 0.2 ppm, el límite máximo permisible para suelos en remediación y uso agrícola en 2.0 ppm. Varios puntos de muestreo indican valores sobre los 14 ppm. Estas lecturas no se pueden justificar por la influencia de la fuente fija (relavera) por lo que deben realizarse comprobaciones de los datos referidos.

El mapa de riesgo por concentración de metales pesados delimita la zona con mayor incidencia de concentraciones medidas por lo que representa el espacio sensible en función de desarrollar actividades de tipo agrícola, es decir esta zona debería ser objeto de control sanitario por la incidencia a la fijación y absorción de metales pesados en especies vegetales.

Los valores de concentración de metales pesados encontrados para Pb y Zn no superan los valores máximos permisibles para suelo de uso agrícola en la zona de estudio a excepción de las inmediaciones de la relavera.

Los resultados de la muestra tomada en la relavera mostraron concentraciones elevadas de Pb, Cd y Zn, lo que sumado a la inexistencia de un manejo ambiental de control de lixiviados hacen imprescindible la necesidad de contar con un plan de acción tendiente a la recuperación ambiental de la zona de incidencia (zonas de producción agrícola). Componentes principales del plan de acción incluiría la realización de un monitoreo permanente de la concentración de metales pesados en sedimentos fluviales y el agua de los drenajes a la salida de la relavera. La caracterización de la piscina de relaves facilitaría la determinación de medidas de manejo sobre el pasivo ambiental existente y que evidentemente es la fuente de generación de la dispersión de metales Pb y Zn presentes en la zona de estudio.

AGRADECIMIENTOS

Manifestamos el agradecimiento al Vicerrectorado de Investigaciones de la Universidad del Azuay por el apoyo brindado para la elaboración del presente estudio.

REFERENCIAS

- Islam, M. S., Ahmed, M. K., Raknuzzaman, M., Habibullah -Al- Mamun, M., & Islam, M. K. (2015). Heavy metal pollution in surface water and sediment: A preliminary assessment of an urban river in a developing country. *Ecological Indicators*, 48, 282-291. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.08.016>
- Khalil, A., Hanich, L., Bannari, A., Zouhri, L., Pourret, O., & Hakkou, R. (2013). Assessment of soil contamination around an abandoned mine in a semi-arid environment using geochemistry and geostatistics: Pre-work of geochemical process modeling with numerical models. *Journal of Geochemical Exploration*, 125, 117-129. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.11.018>
- PRECUPA. (1998). Informe final, componente B, geología. Cuenca.
- Rehman, Z. U., Khan, S., Brusseau, M. L., & Shah, M. T. (2017). Lead and cadmium contamination and exposure risk assessment via consumption of vegetables grown in agricultural soils of five-selected regions of Pakistan. *Chemosphere*, 168, 1589-1596. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.152>
- Tapoglou, E., Karatzas, G. P., Trichakis, I. C., & Varouchakis, E. A. (2014). A spatio-temporal hybrid neural network-Kriging model for groundwater level simulation. *Journal of Hydrology*, 519, Part, 3193-3203. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.040>
- Wang, X. L., Chen, H., Wu, Y., & Feng, Y. (2010). New Techniques for the Detection and Adjustment of Shifts in Daily Precipitation Data Series. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2416-2436. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2376.1>
- Wu, Q., Leung, J. Y. S., Geng, X., Chen, S., Huang, X., Li, H., ... Lu, Y. (2015). Heavy metal contamination of soil and water in the vicinity of an abandoned e-waste recycling site: Implications for dissemination of heavy metals. *Science of The Total Environment*, 506, 217-225. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.10.121>
- Yang, S., Zhang, H., Kong, M., Liu, Y., Liu, H., & Xu, R. (2014). Study on surficial soil geochemistry in the high-elevation and -frigid mountainous region: A case of Qulong porphyry copper deposit in Tibet. *Journal of Geochemical Exploration*, 139, 144-151. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.06.001>
- Zhang, X., & Srinivasan, R. (2009). GIS-Based Spatial Precipitation Estimation: A comparison of Geostatistical approaches, 45(4), 894-906.