

# Influence of time on the effectiveness of vitrification for the inertization of agricultural soils contaminated by heavy metals (Pb, Cd and Fe)

Haniel Josue Torres Joaquin, MSc.<sup>1</sup>, Marco Alonso Pedro Vásquez, B. Sc.<sup>2</sup>, and Mary Linda Cárdenas de la Cruz, B. Sc.<sup>1</sup>

<sup>1,2,3</sup>Universidad Privada del Norte, Perú, [Haniel.torres@upn.pe](mailto:Haniel.torres@upn.pe), [n00167348@upn.pe](mailto:n00167348@upn.pe), [n00172099@upn.pe](mailto:n00172099@upn.pe)

*The influence of time on the vitrification process was evaluated for the inertization of agricultural soils contaminated by Pb, Cd and Fe, in the district of Sayapullo, province of Gran Chimú, La Libertad. For the analysis, 3 times (6, 8 and 12 hours) of vitrification were taken into account, whose processes were carried out ex situ. The samples were subjected to 900° C in a muffle furnace. In this way, it was obtained that the time with the best results was 12 hours, thus reducing 70.41% (Pb), 98.70% (Cd) and 59.78% (Fe). Likewise, through the Spss program, the hypothesis was validated and the bivariate evaluation test was carried out, presenting a high evaluation between the variables. Through linear regression, it was demonstrated that 98.3% of the dependent variable is explained thanks to the independent variable. Thus concluding that time significantly influences the vitrification process.*

**Keywords-** Vitrification, heavy metals, influence and inerting.

# Influencia del tiempo en la efectividad de la vitrificación para la inertización de suelos agrícolas contaminados por metales pesados (Pb, Cd y Fe)

Haniel Josue Torres Joaquin, MSc.<sup>1</sup>, Marco Alonso Pedro Vásquez, B. Sc.<sup>2</sup>, and Mary Linda Cárdenas de la Cruz, B. Sc.<sup>1</sup>

<sup>1,2,3</sup>Universidad Privada del Norte, Perú, [Haniel.torres@upn.pe](mailto:Haniel.torres@upn.pe), [n00167348@upn.pe](mailto:n00167348@upn.pe), [n00172099@upn.pe](mailto:n00172099@upn.pe)

**Resumen**– Se evaluó la influencia del tiempo en el proceso de vitrificación para la inertización de suelos agrícolas contaminados por Pb, Cd y Fe, en el distrito de Sayapullo, provincia de Gran Chimú, La Libertad. Para los análisis se tomaron en cuenta 3 tiempos (6; 8 y 12 horas) de vitrificación, cuyos procesos fueron realizados de manera ex situ. Las muestras fueron sometidas a 900° C en un horno mufla. De esta manera se obtuvo que el tiempo con mejores resultados fue el de 12 horas, reduciendo así el 70.41 % (Pb), el 98.70 % (Cd) y el 59.78 % (Fe). Así mismo por medio del programa Spss, se validó la hipótesis y se realizó la prueba de correlación bivariada, presentando una alta correlación entre las variables. Por medio de la regresión lineal quedó demostrado que el 98.3% de la variable dependiente es explicado gracias a la variable independiente. Concluyendo así que el tiempo influye significativamente en el proceso de vitrificación.

**Palabras claves**- Vitrificación, metales pesados, influencia e inertización.

## I. INTRODUCCIÓN

Principalmente en los países en vías de desarrollo, la minería ilegal es una de las actividades antropogénicas más contaminantes [1], estas actividades arrojan residuos tóxicos al medio ambiente, como los metales pesados [2]. Estos tienen la capacidad de bioacumularse y biomagnificarse a través de la cadena trófica [3]. Aproximadamente el 20% de la producción mundial del oro, diamantes, estaño, tantalio y el 80% de piedras preciosas provienen de la minería ilegal [4]. Estas actividades arrojan contaminantes, cuyo destino final son los recursos hídricos, terminando así por contaminar el agua, aire y suelo. Por consiguiente, la acumulación de metales pesados en el suelo aumenta velozmente, perjudicando así la fertilidad, rendimiento, calidad y productividad del suelo agrícola y los cultivos presentes [5]. Una de estas áreas perjudicadas por la minería ilegal y sus desechos es Sayapullo, ubicado en la provincia de Gran Chimú, la Libertad.

Existen diversas técnicas de remediación para inertizar suelos contaminados, entre ellas la vitrificación. La vitrificación es un procedimiento térmico, donde mediante altas temperaturas se destruyen los contaminantes orgánicos e inertizan los contaminantes inorgánicos, formando sólidos semejantes al vidrio [6].

Así mismo los metales pesados son encapsulados en esta matriz vítrea [7]. Sin embargo, en este proceso influyen varios parámetros, entre ellos la humedad del suelo, contenido de materia orgánica, temperatura y tiempo. Diversas investigaciones, estudiaron la influencia de estos factores, así mismo también analizaron la eficiencia del proceso de vitrificación, para remediar suelos a grandes escalas.

El recurso suelo tiene una gran importancia, por esta razón es indispensable mantenerlo saludable, libre de contaminantes, entre ellos los metales pesados y estudiar métodos de inertización del suelo. Esta investigación tiene como objetivo principal evaluar la influencia del tiempo en el proceso de vitrificación para la inertización de suelos agrícolas contaminados por Pb, Cd y Fe. Así mismo se pretende analizar la variación de la eficacia de la vitrificación en la inertización de suelos agrícolas contaminados por Pb, Cd y Fe, a lo largo del tiempo de tratamiento. También se busca determinar la existencia o no existencia de cambios significativos en las propiedades fisicoquímicas del suelo en función del tiempo de tratamiento con el proceso de vitrificación y se busca determinar el tiempo con mejores resultados para la correcta inertización del suelo contaminado por Pb, Cd y Fe. Así mismo se buscó determinar el costo aproximado del proceso de vitrificación para 1000 kg de suelo agrícola contaminado por Pb, Cd y Fe.

## II. PROCESO DE VITRIFICACIÓN

### 2.1 Procedimiento

Se recolectaron 3 muestras, de 1 kg cada una, del área aproximadamente de 0.5 hectáreas de potencial interés contaminada por la minería ilegal en el distrito de Sayapullo, provincia de Gran Chimú, departamento de la Libertad. En la tabla 1 se pueden observar los puntos de muestreo.

Tabla 1.  
Puntos de muestreo

Puntos de muestreo	Coordenadas UTM Zona 17 – WGS 84	
	E	N
P1	778393.00 m E	9159946.00 m S
P2	778408.00 m E	9159979.00 m S

P3	778394.00 m E	9159966.00 m S
----	---------------	----------------

Las muestras fueron trasladadas cuidadosamente a la ciudad de Trujillo para su posterior análisis.

La caracterización de las muestras se llevó a cabo teniendo como guía la Marcha EPA 3050-Método 3050- Digestión ácida de sedimentos, lodos y suelos, la cual se recomienda dentro de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) 2017 para suelos y metales a tratar.

Posteriormente se tomaron tres cantidades iguales de suelo contaminado (M1, M2 y M3), cantidades equivalentes a 15 g, cuyas muestras fueron vitrificadas a tiempos diferentes (6, 8 y 12 horas). Las muestras fueron ingresadas al horno mufla a 900° C y retiradas en el tiempo indicado anteriormente. Así mismo los resultados obtenidos en los diferentes tiempos fueron evaluados por medio de análisis estadístico para determinar el impacto del tiempo sobre el proceso de vitrificación y su influencia. Observar el diagrama de flujo en la figura 1.

Se tuvo en cuenta la prueba de validación de hipótesis, media, desviación estándar, media de error estándar, correlación existente entre las variables (dependiente e independiente), resumen del modelo de la variable ANOVA (prueba Fisher), regresión lineal y diagrama de dispersión, esto para cada uno de los tiempos y sus resultados.



Fig. 1 Diagrama de flujo del proceso

### III.RESULTADOS

Físicamente el suelo presentó un color marrón pálido, con pequeños tonos rojizos, así mismo presentó textura agrietada,

sin presencia de organismos vivos y la humedad era prácticamente nula. Observar tabla 2.

Tabla 2  
Parámetros fisicoquímicos del suelo

Parámetros	Valores
PH	2.03
Conductividad	7.72 $\mu$ S / cm

\*ECA suelo no cuenta con valores para el pH y conductividad.

El pH del suelo es ácido afectando de esta manera la disponibilidad de nutrientes y otros procesos.

Así mismo los valores iniciales de los metales pesados en la muestra recolectada son comparados respecto a los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo (ver tabla 3), donde se observa que el Pb y Cd tienen concentraciones excesivas respecto a los estándares establecidos. De igual forma el Fe permanece en cantidades elevadas, aunque no presenta un valor estándar en los ECA suelo para comparar, por consiguiente, la tierra evaluada se encuentra en un pésimo estado tanto físico como químico.

Tabla 3  
Concentración final de Pb, Cd y Fe (6h, 8h y 12h)

Metales	ECA (mg/kg)	C. Inicial (mg/kg)	C.Final (mg/kg)		
			M1 (6h)	M2 (8h)	M3 (12h)
Pb	70	500	239.166	206.150	147.952
Cd	1.4	16.936	0.900	0.523	0.220
Fe	-	436.051	198.001	194.460	175.375

El tiempo evaluado que presenta mejores resultados es el de 12 horas en la M3 donde se obtuvo el mejor porcentaje de remoción para cada metal. (ver tabla 4)

Tabla 4  
Porcentajes de remoción de Pb, Cd y Fe (6h, 8h y 12h)

Metales	Remoción final (%)		
	M1 (6h)	M2 (8h)	M3 (12h)
Pb	52.17	58.77	70.41
Cd	94.68	96.91	98.70
Fe	54.49	55.40	59.78

El porcentaje final de remoción obtenido después de cada tiempo es determinado con respecto a la concentración final y la concentración inicial, obteniendo que el mayor porcentaje de remoción se presenta en 12h, para Pb (70.41%), para Cd (98.70%) y Fe (59.78%).

Mediante el software estadístico SPSS se hizo la regresión lineal donde se identificó la fórmula para evaluar diferentes

tiempos de vitrificación buscando la concentración final mínima para cada metal. Así mismo, para determinar la influencia de las variables, se procedió a hacer el resumen del modelo. Ver Figuras 2, 3 y 4.

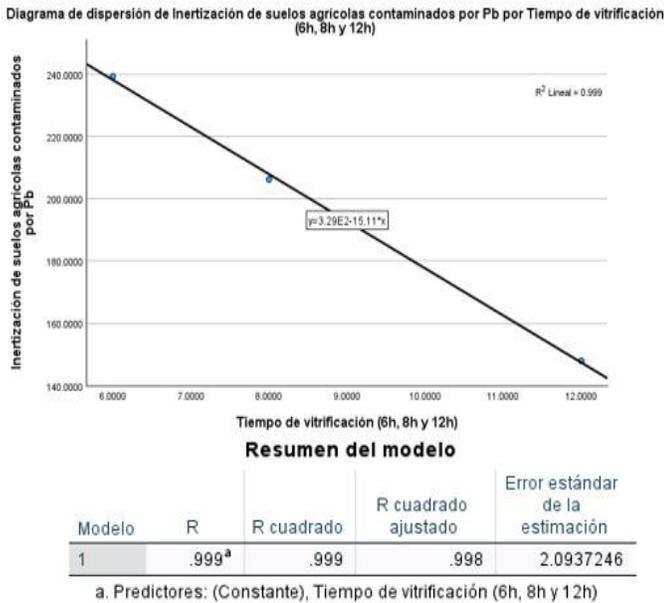


Fig. 2. Regresión lineal y resumen modelo para Pb

La ecuación de regresión lineal para Pb (1) es producto del diagrama de dispersión en base al tiempo de vitrificación (6h, 8h y 12h) con respecto a la inertización de suelos agrícolas contaminados por Pb inicial y final (M1, M2 y M3) según la tendencia de los mismos donde el valor lineal ( $R^2$ ) es 0.999.

$$y = 3.29 E2 - 15.11 * x \quad (1)$$

Donde:

y = concentración final de Pb  
x = tiempo de vitrificación

Así mismo, presenta una alta relación entre las variables (0.999), demostrando que el 99.9% de la variable dependiente es explicado gracias a la variable independiente.

Fig. 3. Regresión lineal y resumen modelo para Cd

De igual forma la ecuación de regresión lineal para Cd (2) es mostrada en el diagrama de dispersión en base al tiempo de vitrificación (6h, 8h y 12h) con respecto a la inertización de suelos agrícolas contaminados por Cd inicial y final (M1, M2 y M3) y el valor lineal ( $R^2$ ) es 0.937.

$$y = 1.48 - 0.11 * x \quad (2)$$

Donde:

y = concentración final de Cd  
x = tiempo de vitrificación

Así mismo presenta una alta relación entre las variables (0.968) y muestra que el 93.7% de la variable dependiente es explicado gracias a la variable independiente.

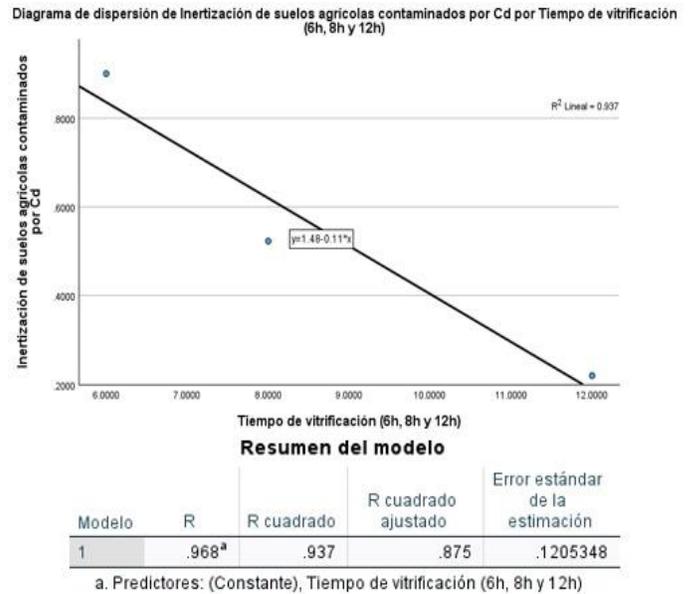


Fig. 3. Regresión lineal y resumen modelo para Cd

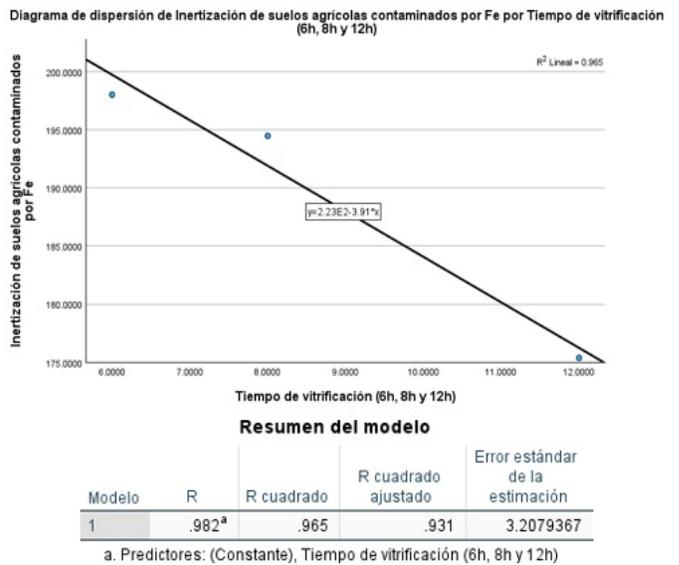


Fig. 4. Regresión lineal y resumen modelo para Fe

Por último, la ecuación de regresión lineal para Fe (3) es mostrada en el diagrama de dispersión en base al tiempo de vitrificación (6h, 8h y 12h) con respecto a la inertización de suelos agrícolas contaminados por Fe inicial y final (M1, M2 y M3) y el valor lineal ( $R^2$ ) es 0.965

$$y = 2.23E2 - 3.91 * x \quad (3)$$

Donde:

y = concentración final de Fe  
x = tiempo de vitrificación

Así mismo, presenta una alta relación entre las variables (0.982), de igual forma se muestra que el 96.5% de la variable

dependiente es explicado gracias a la variable independiente.

### III. DISCUSIÓN

#### 4.1 El tiempo de vitrificación de metales pesados

La investigación mostró resultados favorables respecto al objetivo de evaluar la influencia del tiempo en el proceso de vitrificación para la inertización de suelos agrícolas contaminados por metales pesados. Se redujo hasta 70.41 % de Pb, 98.70 % de Cd y 59.78 % de Fe, muestras que fueron sometidas durante el tiempo de 12 horas. En los otros tiempos evaluados, de 6 y 8 horas, los resultados para Pb son de 52.17 % y 58.77 %, para Cd son de 94.68 % y 96.91 % y finalmente para Fe son 54.49 % y 55.40 % de inertización respectivamente. Estos resultados se dieron debido a que la principal ventaja del proceso de vitrificación es que produce un material vítreo. [8] producto amorfo, que posee rápida ordenación de moléculas para tener posiciones definidas, caracterizándose por presentar un aspecto sólido con dureza y rigidez, que posee gran estabilidad química, incorporando así de forma homogénea los metales pesados [9] y creando así una relación directa entre el tiempo y el proceso de vitrificación de contaminantes inorgánicos [10]. En un estudio realizado anteriormente [11] se encontró similitud con los resultados obtenidos, la autora evaluó dos tiempos, 1 y 5 horas, donde a mayor tiempo obtuvo mejores resultados respecto a la inertización del suelo estudiado, reduciendo así de 1500 mg/kg a 200 mg/kg de Pb y el As de 2000 mg/kg a 200 mg/kg, debido a que en altas temperaturas los enlaces del material vítreo se rompen y su estructura incorpora metales pesados [12].

#### 4.2 Cambios en las propiedades fisicoquímicas del suelo durante el proceso de vitrificación

Tanto los parámetros físicos como los parámetros químicos del suelo cambiaron drásticamente, la tierra paso de tener un color marrón oscuro a un rojizo claro, con una pequeña capa de grumos, producto del proceso de vitrificación, el pH, pasó de ácido a menos ácido, con un pH inicial de 2.03 a 3.67, así mismo la concentración de metales pesados también redujo, pero no se eliminaron en su totalidad. Esto debido a que los metales pesados una vez depositados en el suelo son permanentes y altamente resistentes a la degradación inducida biológica o químicamente. [9]. En particular, el plomo, es difícil de reducir debido a que presenta un alto grado de persistencia en el suelo, de 150 a 5000 años. [13]. De igual forma, el Cd tiene una vida media biológica de 18 años aproximadamente. [14]. Así mismo el hierro es un metal persistente, pero es difícil encontrarlo en su estado puro.

La vitrificación es el proceso mediante el cual se busca remediar los suelos, sin embargo, algunas propiedades se ven afectadas, ya que la tierra es sometida a altas temperaturas constantes durante un tiempo determinado, algunos parámetros como la humedad, el contenido de materia orgánica e inorgánica se vuelven prácticamente escasos [15]. Los parámetros químicos del suelo son muy diferentes después del proceso de vitrificación, obteniendo así un suelo nuevo prácticamente

[16], quedando inerte después del proceso de vitrificación, donde los valores de los parámetros fisicoquímicos son casi inexistentes.

#### 4.3 Tiempo con mejores resultados para la correcta inertización de suelo contaminado

Uno de los objetivos planteados fue encontrar el tiempo que presente los mejores resultados para la correcta vitrificación e inertización del suelo contaminado por metales pesados. Según los resultados, se observa que, a mayor tiempo de exposición a la temperatura, los metales pesados estudiados muestran mayor reducción. Siendo el tiempo de 12 horas el que presentó mejores resultados con respecto a los tres tiempos evaluados, presentando porcentajes de reducción de hasta un 70.41 % de Pb, 98.70 % de Cd y 59.78 % de Fe, a diferencia de los otros tiempos. Se afirma que el tiempo adecuado para la vitrificación de suelos, oscila entre las 5 a 24 horas [17] dado que, con el progresivo calentamiento durante el tiempo adecuado, la fusión del suelo produce la destrucción de los contaminantes orgánicos, la eliminación de los compuestos metálicos volátiles y semivolátiles [18], mientras que al enfriarse la masa fundida da como producto final la formación de un vidrio que inmoviliza los contaminantes inorgánicos, como los metales pesados [9]. El tiempo tiene una relación directa con el proceso estudiado. [11] En otra investigación se logró reducir hasta el 92.78% de plomo en 18 horas, afirmando así la relación directa del tiempo con la vitrificación [19].

#### 4.4 Costo aproximado del proceso de vitrificación

Se estimó el costo aproximado del proceso de vitrificación para 1000 kg de suelo agrícola contaminado por Pb, Cd y Fe. Según los procesos realizados se observa que para vitrificar 15 gramos de cada muestra el costo es de S/ 4.692, S/ 6.256 y S/ 9.384 para los tiempos de 6h, 8h y 12h respectivamente, así también para una muestra de 1000 kg de suelo contaminando el costo sería de S/ 312,800 (6h), S/ 417,066.7 (8h) y S/ 625,600 (12h). Así mismo cabe recalcar que depende de la capacidad del horno mufla, las muestras se pueden vitrificar en simultaneo, tomando en cuenta que el tiempo que presenta mejores resultados es de 12 horas. Estos costos se dan debido a que el proceso de vitrificación representa el costo según la energía eléctrica usada y el equipo para vitrificar. En la ciudad de Trujillo el precio del Kw es de S/ 0,782 por Kw consumido, para este proceso el equipo usado es una mufla modelo (Muffle furnace F0110CR), la cual tiene un consumo de 1 Kw/h de uso, a estos datos se le agrega el tiempo que requiere cada muestra para poder ser vitrificada [9], se afirma que existen diversas tecnologías disponibles para la remediación de suelos contaminados por metales pesados, sin embargo, el costo de las mismas muchas veces es elevado. La vitrificación no es considerada una técnica clásica para la remediación de metales pesados, pero es comparativamente fácil de aplicar en comparación de otros métodos de remediación física [14], sin embargo, es un método muy costoso, debido a que requiere mucha energía para la fusión [11]. Así mismo se considera que la vitrificación es una técnica de remediación de suelos muy efectiva, pero el costo es muy elevado, aproximadamente entre 800 a 1000 dólares el metro cúbico, para vitrificación ex situ [20].

#### IV. CONCLUSIONES

- El tiempo tiene un grado de influencia de 99.9% (Pb), 93.7% (Cd) y 96.5% (Fe); en el proceso de vitrificación, de igual forma en promedio el tiempo presenta una influencia del 98.3% para los metales estudiados, de esta manera incide significativamente en la inertización de suelos agrícolas contaminados por metales pesados, mediante el proceso de vitrificación, siendo sumamente cercana a 100%.
- Se evidenció cambios drásticos en los parámetros evaluados después del proceso de vitrificación, como en el color, pasando de marrón oscuro a rojizo, contenido de materia orgánica, la cual se eliminó durante la vitrificación, pH, pasando de un pH ácido de 2.03 a un pH menos ácido de 3.67, así mismo la concentración de metales pesados disminuyó.
- El tiempo que presenta mejores resultados para la correcta inertización del suelo agrícola contaminado por metales pesados es de 12 horas, los cuales presenta reducciones de hasta un 70.41 % de Pb, 98.70% de Cd y 59.78 % de Fe, concluyendo de esta manera que el tiempo tiene una relación directa con el proceso estudiado.
- El costo estimado para el proceso de vitrificación para 1000 kg de suelo agrícola contaminado por Pb, Cd y Fe, sería de S/ 312,800, S/ 417,066.7 y S/ 625,600; para 6, 8 y 12 horas respectivamente.

#### V. REFERENCIAS

- [1] Salguero, K. (2017). Inertización de relaves mineros utilizando la vitrificación para su aprovechamiento en la construcción. [Tesis de Título, Universidad Internacional SEK]
- [2] Rodríguez, J. (2008). La contaminación de suelos la herencia que no cesa, *Universidad Autónoma de Madrid*,
- [3] Loza, C., Angeles, J., De la Cruz, L., Angeles, R. y López, G. (2023). Fitorremediación de plomo por tres especies vegetales con una enmienda orgánica, (1).
- [4] Leal, Y. (2019). Minería ilegal, conflicto armado y vulneración al medio ambiente, *Infométrica*, 2, (1).
- [5] Escobar, O, Espín, D. y Jarrín, J. (2017). Manejo, gestión, tratamiento y disposición final de relaves mineros generados en el proyecto Rio Blanco, 2, *Revista de Ciencias de Seguridad y Defensa*, (4), 141-154.
- [6] Kim, D. y Kruger, A. (2018). Especies volátiles de tecnecio y renio durante la vitrificación de residuos, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 481, 41-50.
- [7] Liu, L., Li, W. y Song, W. y Gou, M. (2018). Técnicas de remediación de suelos contaminados con metales pesados: principios y aplicabilidad, *Science of The Total Environment*, 633, 206-219.
- [8] Martínez, S., Nogués, J. y García, M. (2010). La vitrificación un ejemplo de sostenibilidad ambiental, *Española para la Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 18, (3), 321-328.
- [9] Khalid, S., Shahid, M., Khan, N., Murtaza, B., Bibi, I. y Dumat, C. (2017). Una comparación de tecnologías para la remediación de suelos contaminados con metales pesados, *Journal of Geochemical Exploration*, 182, 247-268.
- [10] Varitis, S., Kavouras, P., Pavlidou, E., Pantazopoulou, E., Vourlias, G., Chrissafis, K., Zouboulis, A., Karakostas, Th. y Komninou, Ph. (2016). Vitrificación de lodos de curtiduría incinerados en matrices de silicato para estabilización con cromo, *Waste Management*. Aroni, M. (2023).

Vitrificación ex situ para la inertización de relaves mineros con aplicación de enmiendas en la cuenca del río moche, Quiruvilca, 2022. [Tesis de Título, Universidad Privada del Norte].

- [11] Aroni, M. (2023). Vitrificación ex situ para la inertización de relaves mineros con aplicación de enmiendas en la cuenca del río moche, Quiruvilca, 2022. [Tesis de Título, Universidad Privada del Norte].
- [12] Esquina, J., Calles, P., Sánchez, P y Jordania, M (2018). Vitrificación y vitrocerámicas derivadas de residuos mineros que contienen vermiculita y fosfato de litio y aluminio, *Letras materiales*, (227), 86-89.
- [13] Kavouras, P., Kaimakamis, G., Ioannidis, A., Kehagias, Th., Komninou, Ph., Kokkou, S., Pavlidou, E., Antonopoulos, I., Sofoniou, M., Zoubulis, A., Hadjiantoniou, CP., Nouet, G., Prakouras, A., y Karakostas, Th. (2003). Vitrificación de cenizas sólidas ricas en plomo procedentes de la incineración de residuos industriales peligrosos, *Waste Management*, 23, 361-371.
- [14] Karamanov, A., Paunovic, P., Rangelov, B., Ljatifi, E., Kamusheva, A., Nacevski, G., Karamanova, E. y Grozdanov, A. (2017). Vitrificación de residuos peligrosos de Fe-Ni en vitrocerámica con estructura cristalina fina y elevadas características de explotación, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5, 432-441.
- [15] Trifunović, V. (2021). La vitrificación como método de remediación de suelos, *Zaštita materijala*, 62 (3) 166 - 179.
- [16] Simbaña, K. y Arisqueta, L. (2021). Inertización de metales pesados de un lodo de la industria metalmeccánica, utilizando el proceso de vitrificación ex situ. [Tesis de Título, Universidad Internacional SEK].
- [17] Navarro, A., Cañadas, I., Martínez, D. y Rodríguez, J. (2009). Vitrificación solar de lodos de flotación de la zona minera de sierra almagrera (Almería), *Universidad Politécnica de Cataluña*, 19, (114), 50-57.
- [18] Dellisanti, F., Rossi, P. y Valdré, G. (2009). Remediación de materiales que contienen amianto mediante vitrificación por calentamiento Joule realizada en un aparato prepiloto, *International Journal of Mineral Processing*, 91 (3-4), 61-67.
- [19] García, A. (2021). Aspectos hidrológicos de las técnicas de remediación de suelos contaminados por metales pesados. [Tesis de Maestría, Universidad de Alcalá].
- [20] Dorronsoro, C. (2014). Módulo suelos. [Tesis de Master, Universidad de Granada].