

# Cinética de metales pesados en lixiviados de un relleno sanitario de Cajamarca, Perú

Kinetics of heavy metals in leachates from a landfill in Cajamarca, Peru

 Vera-Zelada, Persi<sup>1\*</sup>

 Vera-Zelada, Luis Alberto<sup>2</sup>

 Minchán-Sapo, Judith Rossmery<sup>3</sup>

 Quiliche-Culqui, Marta Isabel<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Jaén, Jaén, Perú

<sup>2</sup>Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca, Perú

<sup>3</sup>Universidad Privada Antonio Guillermo Urrelo, Cajamarca, Perú

Recibido: 10 Mar. 2023 | Aceptado: 13 May. 2023 | Publicado: 10 Jul. 2023

Autor de correspondencia\*: [persi.vera@unj.edu.pe](mailto:persi.vera@unj.edu.pe)

Como citar este artículo: Vera-Zelada, P., Vera-Zelada, L. A., Minchán-Sapo, J. R. & Quiliche-Culqui, M. I. (2023). Cinética de metales pesados en lixiviados de un relleno sanitario de Cajamarca, Perú. *Revista Amazónica de Ciencias Ambientales y Ecológicas*, 2(2), e512. <https://doi.org/10.51252/reacae.v2i2.e512>

## RESUMEN

Esta investigación propuso determinar la cinética de metales tóxicos del lixiviado de la infraestructura de tratamiento y disposición final de residuos sólidos de Cajamarca al entrar en contacto con el suelo. El estudio se ejecutó a nivel de laboratorio; se colocó en un recipiente de 150 L, 100 kg de suelo y un volumen de 60 L de lixiviado para generar el contacto de ambos, el experimento duró 60 días y se muestreo cada 10 días en los siguientes lapsos de 0, 10, 20, 30, 40 y 50 días para luego ser recirculado. El lixiviado no aporta contaminantes al suelo, el suelo se comporta con un adsorbente puesto que el arsénico, el cadmio, el cromo, el hierro, el plomo y el zinc, son metales retenidos o adsorbidos en adición, el cobre y el mercurio son metales que el suelo no retiene. Con respecto a la cinética, se demostró que la velocidad de reacción del hierro es mayor a los demás con 0,012 mg/días y una adecuación promedio de todos los metales al modelo de pseudo segundo orden del 99,58%. Se concluye que los metales tóxicos del lixiviado tienen una baja velocidad de reacción en el suelo.

**Palabras clave:** biodigestión anaeróbica; metales; tratamiento de lixiviados

## ABSTRACT

This research proposed to determine the kinetics of toxic metals from the leachate from the infrastructure for the treatment and final disposal of solid waste in Cajamarca when it comes into contact with the soil. The study was carried out at the laboratory level; 100 kg of soil and a volume of 60 L of leachate were placed in a 150 L container to generate the contact of both, the experiment lasted 60 days and was sampled every 10 days in the following periods of 0, 10, 20, 30, 40 and 50 days to later be recirculated. The leachate does not contribute contaminants to the soil, the soil behaves with an adsorbent since arsenic, cadmium, chromium, iron, lead and zinc are metals retained or adsorbed in addition, copper and mercury are metals that the ground does not hold. Regarding the kinetics, it was shown that the reaction rate of iron is higher than the others with 0.012 mg/day and an average adequacy of all metals to the pseudo second order model of 99.58%. It is concluded that the toxic metals in the leachate have a low reaction rate in the soil.

**Keywords:** anaerobic biodigestion; metals; treatment of leachate

## 1. INTRODUCCIÓN

La lixiviación es una operación de extracción primaria en el procesamiento hidrometalúrgico, mediante la cual un metal de interés se transfiere de minerales naturales a una solución acuosa. En esencia, implica la disolución selectiva de minerales valiosos, donde el mineral, el concentrado o la mata se ponen en contacto con una solución química activa conocida como solución de lixiviación (Meshram et al., 2016).

Debido a los muchos estudios realizados, los lixiviados se consideran un tema muy importante y serio, no solo en el campo de la ingeniería, sino que también es un tema de educación y manejo integral de residuos sólidos (Abdel-Shafy & Mansour, 2018). El lixiviado es un líquido negro o marrón con fuerte olor desagradable, alto contenido orgánico y toxicidad (Peng, 2017).

Es por esto por lo que los propios lixiviados son considerados un contaminante altamente peligroso y tóxico, ya que son producto de la degradación de la materia orgánica biodegradable presente en los residuos sólidos urbanos. Tiene las características de sales, nitrógeno amoniacal, metales pesados, sales inorgánicas, etc. (Jayawardhana et al., 2016).

Los lixiviados a menudo se forman al combinar grandes cantidades de materia orgánica con diferentes contaminantes que pueden ser tóxicos, por lo que detallan impactos significativos en el medio ambiente y no solo en los cuerpos de agua (Propp et al., 2021). Los lixiviados en los vertederos llevan sustancias diluidas, suspendidas, fijas o volátiles, lo que hace que tengan una alta carga orgánica (Cárdenas-Ferrer et al., 2020). El lixiviado contiene a su vez altas concentraciones de sales inorgánicas (cloruro y carbonato de sodio) y metales pesados (Kapelewska et al., 2016).

“En Perú existen 12 rellenos sanitarios para abastecer a 1851 distritos, esto da a entender que más del 95% de residuos termina en botaderos. Según los últimos reportes, son 18, 131 toneladas de residuos que se generan en el país día a día. Esta cantidad hace referencia a llenar 3 veces todo el estadio nacional en una sola jornada” (¿Sabías Que Perú Genera 18 131 Toneladas de Basura Al Día?) (PUCP, 2016).

Cajamarca no se encuentra ajeno al problema de la disposición final de sus residuos sólidos, por lo que, en la infraestructura de tratamiento y disposición final de residuos sólidos de Cajamarca se genera gran cantidad de lixiviados y en épocas de lluvia éstas tienden a rebalsar entrando en contacto con el suelo, generando impactos negativos en los suelos de alrededor la infraestructura de tratamiento y disposición final de residuos sólidos.

Además, mencionamos que no solo daña los suelos, sino que también genera impacto sobre las aguas tanto superficiales como subterráneas (Sasakova et al., 2018). Debido a la problemática que existe en el relleno sanitario de Cajamarca, hemos considerado que existe un aumento de los metales en forma disueltos en los lixiviados, y por ello planteamos el estudio cinético de los metales tóxicos al estar en contacto con el suelo.

El objetivo fue determinar la cinética de adsorción de metales tóxicos del lixiviado de la infraestructura de tratamiento y disposición final de residuos sólidos de Cajamarca al entrar en contacto con el suelo.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Investigación descriptiva de corte transversal, las muestras ambas tanto suelo como lixiviado han sido extraídas de la infraestructura de tratamiento y disposición final de residuos sólidos de Cajamarca, y transportadas al laboratorio donde se realizó dicho experimento.

Se usaron suelos presentes en la parte periférica de las pozas de lixiviación del relleno sanitario de la provincia de Cajamarca. Y se extrajeron lixiviados de las pozas de lixiviación de la infraestructura de tratamiento y disposición final de residuos sólidos de la provincia de Cajamarca. Se obtuvo de muestra 150 mL de lixiviado filtrado o el escurrido del contacto con el suelo.

## 2.1. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se recogieron muestras del lixiviado de la infraestructura de tratamiento y disposición final de residuos sólidos de Cajamarca. Luego se implementó un reactor de contacto entre el suelo y el lixiviado, el cual debe tener un caño en la parte inferior para recircular la parte líquida, debido a que el experimento se realiza en un sistema tipo "batch" (Depósito de 150 L).

Se vertieron los lixiviados con un circuito cerrado de recirculación y con un sistema Batch. Se extrajeron muestras semanalmente para la determinación de metales disueltos tóxicos por 2 meses. El análisis se realizó considerando los metales según los Límites máximos permisibles y según la carga metálica total.

En la investigación se tomaron muestras iniciales del lixiviado antes de drenarlo al suelo, dado que el propósito es determinar si el suelo retiene o aporta metales al lixiviado.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se midieron las características iniciales del lixiviado (Tabla 1).

**Tabla 1.**

*Variables estudiadas de las muestras de M. Oleifera*

Parámetros	Unidad	Inicial
Arsénico Disuelto	(mg/L)	0,18613
Cadmio Disuelto	(mg/L)	0,00211
Cobre Disuelto	(mg/L)	0,08614
Cromo Disuelto	(mg/L)	1,6938
Hierro Disuelto	(mg/L)	20,5911
Mercurio Disuelto	(mg/L)	0,00105
Plomo Disuelto	(mg/L)	0,0295
Zinc Disuelto	(mg/L)	0,8383

La Tabla 2, indica el análisis de varianza de la concentración del arsénico en relación con los diferentes tiempos (0, 10, 20 y 30 días), la cual nos manifiesta que las medias no son iguales, es decir, existe una diferencia entre los grupos de tiempo, pues el valor P es menor al 0,05 y confirmamos con el valor F. Adicionalmente, la diferencia entre la concentración del arsénico del tiempo inicial (0) con respecto a la concentración de los tiempos siguientes (10, 20, 30 días) son diferentes pues se visualiza en las gráficas la dispersión esto quiere decir que el valor inicial es significativamente diferente a los demás.

Esto demuestra que el arsénico disuelto es retenido por el suelo, ya que, las concentraciones siguientes son menores a la inicial y no solo eso, sino que en los tres días las concentraciones son iguales. Por lo tanto, el suelo se comporta como un adsorbente para el arsénico disuelto.

**Tabla 2.**

*Comparación de los resultados iniciales en relación con los días asignados y su réplica*

Parámetros	Inicial	10 (días)	10-R	20 (días)	20-R	30 (días)	30-R
Arsénico Disuelto (mg/L)	0,18613	0,02682	0,02996	0,02427	0,01621	0,01632	0,01791
Cadmio Disuelto (mg/L)	0,00211	0,00102	0,00064	0,00021	0,00042	0,00037	0,0003
Cobre Disuelto (mg/L)	0,08614	0,03291	0,1282	0,09826	0,07683	0,0881	0,08922
Cromo Disuelto (mg/L)	1,6938	0,0307	0,1003	0,0717	0,0496	0,0521	0,0639
Hierro Disuelto (mg/L)	20,5911	0,1803	0,6126	0,2583	0,187	0,1732	0,1833
Mercurio Disuelto (mg/L)	0,00105	0,00106	0,00077	0,00043	0,00053	0,00052	0,00039
Plomo Disuelto (mg/L)	0,0295	0,0006	0,0015	0,0014	0,0024	0,0022	0,0008
Zinc Disuelto (mg/L)	0,8383	0,0679	0,1644	0,1004	0,0403	0,0337	0,0496
Carga metálica (mEq/L)	279,95	220,24	146,53	172,19	132,15	146,60	181,37

El análisis de varianza de la concentración del cadmio en relación con los diferentes tiempos (0, 10, 20 y 30 días), la cual nos manifiesta que las medias no son iguales, es decir, existe una diferencia entre los grupos de tiempo.

Los drenados en diferentes tiempos son iguales, es decir, que las medias de los resultados son iguales (p 0,997) lo que quiere decir que no existe una diferencia significativa. En conclusión, el cobre disuelto no es retenido ni aportado por el suelo.

Existe diferencia entre la concentración inicial y las concentraciones en el tiempo. Adicionalmente, las muestras de los diferentes tiempos son iguales, es decir, que se mantienen estables. Esto quiere decir que el suelo se comporta como un adsorbente que retiene el cromo disuelto presente en el lixiviado.

Existe diferencia entre la concentración inicial y las concentraciones en el tiempo. Adicionalmente, las muestras de los diferentes tiempos son iguales, es decir, que se mantienen estables. Esto quiere decir que el suelo se comporta como un adsorbente que retiene al hierro disuelto presente en el lixiviado. El mercurio disuelto del lixiviado no es retenido ni aportado por el suelo (p 0,064). El suelo se comporta como un adsorbente que retiene el plomo disuelto presente en el lixiviado.

El suelo se comporta como un adsorbente que retiene el zinc disuelto presente en el lixiviado. También se observa que la carga metálica se encuentra en equilibrio ya que no ha disminuido.

Del análisis anterior se deduce que de los ocho metales disueltos estudiados solamente dos permanecen con medias iguales, en otras palabras; el arsénico, el cadmio, el cromo, el hierro, el plomo y el zinc, son metales que son retenidos o adsorbidos por el suelo en las diferentes recirculaciones con tiempos distintos. En cambio, el cobre y el mercurio son metales que no son adsorbidos por la porosidad del suelo. Adicionalmente, se calculó la sumatoria total de la carga metálica en los diferentes tiempos, el resultado fue una igualdad de medias (Tabla 3); lo que demuestra que el suelo no aporta metales al lixiviado cuando estos están en contacto.

En la Tabla 3, se presenta la capacidad de adsorción del arsénico ( $q_{As}$ ) y el logaritmo neperiano de la concentración para determinar la linealidad de los resultados experimentales con respecto a la ecuación de pseudo primer y segundo orden y determinar la relación  $R^2$  de ambas ecuaciones. Asimismo, se halló la constante de reacción.

**Tabla 3.**

*Análisis de la cinética del Arsénico disuelto en los 60 días*

Arsénico Disuelto					
Tiempo	Concentración (mg/L)	X (mg/L)	$q_{Ar}$ (mg/g)	t/qt	Ln As disuelto
0	0,1861	0,0000	0,000000	0,000000	-1,6813
10	0,0268	0,1593	0,000096	104617,83	-3,6186
20	0,0300	0,1562	0,000094	213442,62	-3,5079
30	0,0243	0,1619	0,000097	308908,93	-3,7185
40	0,0162	0,1699	0,000102	392341,49	-4,1221
50	0,0163	0,1698	0,000102	490744,56	-4,1154
60	0,0179	0,1682	0,000101	594459,64	-4,0224

La cinética del arsénico se resume en la Tabla 4, pues, la constante de reacción o velocidad de reacción del arsénico disuelto con relación a la ecuación de pseudo primer orden es de 0.0308 mayor al del segundo orden 0,000102, indicando que la reacción entre el suelo y el lixiviado es mayor, sin embargo, la linealización del pseudo primer orden es menor al del segundo orden, es decir, el  $R^2$  del primero es 60,52 % y del segundo es 99,89 % mostrándonos que los datos se alinean mejor a la segunda ecuación.

**Tabla 4.***Linealización de la ecuación de pseudo primer y segundo orden para arsénico disuelto*

Pseudo primer orden		Pseudo segundo orden		
Linealización		Linealización		Valor de k
y=	Ln C <sub>t</sub>	y=	t/qt	
-0,0308x	k	585971x=	1/(k*qe <sup>2</sup> )	0,000102
		459571=	t/qe	

La cinética del Cadmio se resume en la Tabla 5, pues, la constante de reacción o velocidad de reacción del cadmio disuelto con relación al suelo es 0.0000011 indicando que su reacción es demasiado baja, en cambio, para el pseudo primer orden es alto (0,0296), sin embargo, el valor R<sup>2</sup> del pseudo segundo orden (98,32%) es mayor al del primer orden (65,91%) mostrándonos que la ecuación se adecua al segundo modelo.

**Tabla 5.***Análisis de la cinética del Cadmio disuelto en los 60 días*

Cadmio Disuelto					
Tiempo	Concentración (mg/L)	X (mg/L)	qCd (mg/g)	t/qt	Ln Cd disuelto
0	0,00211	0,0000	0	0.00	-6,1611
10	0,00102	0,0011	0,000000654	15290519,88	-6,8880
20	0,00064	0,0015	0,000000882	22675736,96	-7,3540
30	0,00021	0,0019	0,00000114	26315789,47	-8,4684
40	0,00042	0,0017	0,000001014	39447731,76	-7,7753
50	0,00037	0,0017	0,000001044	47892720,31	-7,9020
60	0,0003	0,0018	0,000001086	55248618,78	-8,1117

Como se visualiza en la Tabla 6, la concentración del cromo disuelto en el tiempo disminuye, es decir que, a diferencia del cadmio, el cromo disuelto es adsorbido por el suelo en un tiempo de 10 días y que luego permanece constante. En efecto, el cromo disuelto es retenido con mayor prontitud para el pseudo primer orden (0,0339) en contraposición al pseudo segundo orden (0,0009847). En efecto, el cromo es adsorbido por el suelo según el modelo de pseudo segundo orden.

**Tabla 6.***Linealización de la ecuación de pseudo primer y segundo orden para el Cromo disuelto*

Pseudo primer orden		Pseudo segundo orden		
Linealización		Linealización		Valor de k
y=	Ln C <sub>t</sub>	y=	t/qt	
-0,0339x	K	1018.5x=	1/(k*qe <sup>2</sup> )	0,0009847
		78,504=	t/qe	

La adsorción de Hierro es el que tiene mayor reacción, ya que, la constante de reacción es 0,0123 para el pseudo segundo orden y 0,0551 para el pseudo primer orden (Tabla 7), por tal razón, el hierro es un metal que tiene mayor reacción con el suelo.

**Tabla 7.***Linealización de la ecuación de pseudo primer y segundo orden para el Hierro disuelto*

Pseudo primer orden		Pseudo segundo orden		
Linealización		Linealización		Valor de k
y=	Ln C <sub>t</sub>	y=	t/qt	
-0.0551x	k	81.531x=	1/(k*qe <sup>2</sup> )	0.0122653
		10.188=	t/qe	

El plomo disuelto es similar a los dos metales anteriores, ya que, como se visualiza en la Tabla 8, la concentración del plomo disuelto en el tiempo disminuye, es decir que, el plomo disuelto es adsorbido por el suelo en un tiempo de 10 días y que luego permanece constante. En efecto, el plomo disuelto es retenido con mayor prontitud para un pseudo primer orden (0,0277) y más lenta para un pseudo segundo orden (0,0000168), y con una relación lineal para el primero del 21,96 % y el segundo con el 99,8 %; perteneciendo, por tanto, a la ecuación de pseudo segundo orden.

**Tabla 8.**

*Linealización de la ecuación de pseudo primer y segundo orden para el Plomo disuelto*

Pseudo primer orden		Pseudo segundo orden		
Linealización		Linealización		Valor de k
y=	Ln Ct	y=	t/qt	
-0,0277x	K	59550x=	1/(k*qe^2)	0,0000168
		5400=	t/qe	

Finalmente, los datos experimentales del Zinc disuelto (Tabla 9) se adecuan a la ecuación de pseudo segunda orden según la relación R<sup>2</sup>: 99,51% mayor a la relación de R<sup>2</sup>: 61,6% del pseudo primer orden. Adicionalmente, la constante de reacción del pseudo segundo orden es 0,0004841 menor al del primer orden: 0,04. En consecuencia, la reacción del Zinc es muy lenta más en el tiempo logra estabilizarse en el suelo.

**Tabla 9.**

*Análisis de la cinética del Zinc disuelto en los 60 días*

Zinc Disuelto					
Tiempo	Concentración (mg/L)	X (mg/L)	qPb (mg/g)	t/qt	Ln Zn disuelto
0	0,8383	0	0	0	-0,1764
10	0,0679	0,7704	0,000462	21633,78	-2,6897
20	0,1644	0,6739	0,000404	49463,32	-1,8055
30	0,1004	0,7379	0,000443	67759,86	-2,2986
40	0,0403	0,7980	0,000479	83542,19	-3,2114
50	0,0337	0,8046	0,000483	103571,13	-3,3903
60	0,0496	0,7887	0,000473	126790,92	-3,0038

La cinética de los metales disueltos en relación con el suelo demuestra que el factor suelo se comporta como un adsorbente, ya que, el arsénico, el cadmio, el cromo, el hierro, el plomo y el zinc son retenido en diferentes lapsos de tiempo (días) para luego estabilizarlos (Puga, 2006). Una de las razones por la que el suelo retiene metales, se debe a su capacidad de intercambio catiónico además del tipo de suelo, ya que, un suelo franco arcilloso retiene más compuestos en su estado disuelto que un suelo arenoso, por ello, la textura del suelo es importante (Chowdhury et al., 2021).

En suma, el suelo no aporta contaminantes o metales al lixiviado, ya que, las concentraciones de metales del lixiviado se mantienen (cobre y el mercurio) o son adsorbidos por el suelo (el arsénico, el cadmio, el cromo, el hierro, etc.) pero no aporta (Wuana & Okieimen, 2011). Otro punto para considerar es la velocidad de reacción, ya que, de los 6 metales analizados solamente el hierro tiene una constante de reacción mayor a los de los demás metales, dado que, el valor es 0,0122653, lo que indica que la adsorción del hierro es más rápida que las demás. En otro estudio se investigaron las isotermas y la cinética de adsorción, y los datos de equilibrio concordaron muy bien con el modelo de Langmuir y el modelo de pseudo segundo orden pudo describir el proceso de adsorción mejor que el modelo de pseudo primer orden (Dai et al., 2012).

Finalmente, el modelo de pseudo segundo orden es el modelo cinético con mayor adecuación a los datos experimentales, dado que, el promedio del R<sup>2</sup> es 99,58% indicando una alta relación de adecuación en

contraposición al pseudo primer orden que tiene una relación menor al 60 %. En otro estudio se encontró que el modelo de pseudo-segundo orden explica la cinética de adsorción de manera más efectiva. También se encontró que la difusión de poros jugó un papel importante en la adsorción (Li et al., 2009).

Por lo tanto, existe una creciente necesidad de desarrollar soluciones novedosas, implementar prácticas ambientalmente sostenibles en la recuperación de estos valiosos y preciosos metales, con particular referencia a los metales críticos, que son aquellos incluidos en los materiales que son indispensables para la vida moderna y para los cuales un aumento exponencial del consumo ya es una realidad o lo será a corto plazo (antimonio, indio, vanadio, etc.). En consecuencia, la economía de los procesos, que está íntimamente ligada a la cinética de lixiviación, es de gran importancia.

## CONCLUSIONES

El suelo es un factor que naturalmente adsorbe metales en su estado disuelto o iónico y no aporta metales al estar en contacto con el lixiviado dado que las concentraciones de los metales (As, Cd, Cr, Fe, Pb y Zn) permanecen iguales, estadísticamente hablando, durante los 60 días de prueba. Existen metales disueltos que el suelo no puede adsorber, tales como el Cu y el Hg; estos permanecen sin cambio de inicio a fin (según Tukey y Fisher).

El balance total de los metales disueltos, haciendo uso de su equivalencia (mEq/L), no ha sufrido cambio; pues según la comparación estadística no existe diferencia significativa. El suelo es un factor que retiene metales y no aporta contaminantes al lixiviado de los residuos sólidos urbanos. La cinética del arsénico, cadmio, cromo, hierro, plomo y zinc, demuestran que el suelo se comporta con un adsorbente y no aporta metales al lixiviado. La velocidad de reacción del hierro es mayor que los demás y por ende el más rápido en ser retenido; sin embargo, todos los metales se estabilizan después de los 10 días.

## FINANCIAMIENTO

Ninguno

## CONFLICTO DE INTERESES

El presente artículo no presenta conflicto de intereses.

## CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Vera-Zelada, P., Vera-Zelada, L. A., Minchán-Sapo, J. R. y Quiliche-Culqui, M. I.: Conceptualización, análisis formal, metodología, redacción-borrador, revisión y edición.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdel-Shafy, H. I., & Mansour, M. S. M. (2018). Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization. *Egyptian Journal of Petroleum*, 27(4), 1275–1290. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2018.07.003>
- Cárdenas-Ferrer, T. M., Santos-Herrero, R. F., Contreras-Moya, A. M., Rosa-Domínguez, E., & Correa-Cortés, Y. (2020). Diseño de una planta para el tratamiento del lixiviado en Vertedero de Sagua La Grande. *Tecnología Química*, 40(2). [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2224-61852020000200413&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852020000200413&lng=es&tlng=es)
- Chowdhury, S., Bolan, N., Farrell, M., Sarkar, B., Sarker, J. R., Kirkham, M. B., Hossain, M. Z., & Kim, G.-H. (2021). *Role of cultural and nutrient management practices in carbon sequestration in agricultural*

- soil (pp. 131–196). <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.10.001>
- Dai, J., Ren, F., & Tao, C. (2012). Adsorption Behavior of Fe(II) and Fe(III) Ions on Thiourea Cross-Linked Chitosan with Fe(III) as Template. *Molecules*, *17*(4), 4388–4399. <https://doi.org/10.3390/molecules17044388>
- Jayawardhana, Y., Kumarathilaka, P., Herath, I., & Vithanage, M. (2016). Municipal Solid Waste Biochar for Prevention of Pollution From Landfill Leachate. In *Environmental Materials and Waste* (pp. 117–148). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803837-6.00006-8>
- Kapelewska, J., Kotowska, U., & Wiśniewska, K. (2016). Determination of personal care products and hormones in leachate and groundwater from Polish MSW landfills by ultrasound-assisted emulsification microextraction and GC-MS. *Environmental Science and Pollution Research*, *23*(2), 1642–1652. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5359-9>
- Li, K., Zheng, Z., Huang, X., Zhao, G., Feng, J., & Zhang, J. (2009). Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies on the adsorption of 2-nitroaniline onto activated carbon prepared from cotton stalk fibre. *Journal of Hazardous Materials*, *166*(1), 213–220. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.11.007>
- Meshram, P., Pandey, B. D., & Mankhand, T. R. (2016). Process optimization and kinetics for leaching of rare earth metals from the spent Ni–metal hydride batteries. *Waste Management*, *51*, 196–203. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.12.018>
- Peng, Y. (2017). Perspectives on technology for landfill leachate treatment. *Arabian Journal of Chemistry*, *10*, S2567–S2574. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.09.031>
- Propp, V. R., De Silva, A. O., Spencer, C., Brown, S. J., Catingan, S. D., Smith, J. E., & Roy, J. W. (2021). Organic contaminants of emerging concern in leachate of historic municipal landfills. *Environmental Pollution*, *276*, 116474. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116474>
- PUCP. (2016). ¿Sabías que Perú genera 18 131 toneladas de basura al día? *Clima de Cambios PUCP*. <https://www.pucp.edu.pe/climadecambios/noticias/sabias-que-peru-genera-18-131-toneladas-de-basura-al-dia/#:~:text=ElPerúestágenerando18,residuossólidosdelINTE-PUCP>
- Puga, S. (2006). Contaminación por metales pesados en suelo provocada por la industria minera: Heavy metals pollution in soils damaged by mining industry. *Ecología Aplicada*, *5*(1–2), 149–155. [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1726-22162006000100020&script=sci\\_abstract](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1726-22162006000100020&script=sci_abstract)
- Sasakova, N., Gregova, G., Takacova, D., Mojziso,va, J., Papajova, I., Venglovsky, J., Szaboova, T., & Kovacova, S. (2018). Pollution of Surface and Ground Water by Sources Related to Agricultural Activities. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *2*. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2018.00042>
- Wuana, R. A., & Okieimen, F. E. (2011). Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation. *ISRN Ecology*, *2011*, 1–20. <https://doi.org/10.5402/2011/402647>