

Aplicación de drenaje electroosmótico a pasivos ambientales mineros

Application of electroosmotic drainage to mining environmental liabilities

Julio Valenzuela¹, Manuel Cánovas¹, Paul González¹, Cristian Cuevas¹

¹Metallurgical and Mining Department, Universidad Católica del Norte, Avda. Angamos 0610, CP: 1240000, Antofagasta, Región de Antofagasta, Chile
email: manuel.canovas@ucn.cl, jvalenzuela01@ucn.cl, paulgonzalez0194@gmail.com, ccr063@alumnos.ucn.cl

RESUMEN

Chile es el mayor exportador de cobre del mundo. Sin embargo, este liderazgo tiene importantes costos medioambientales como la generación de enormes cantidades de residuos sólidos procedentes del tratamiento de las menas de cobre. Con objeto de abordar esta problemática, se propone la aplicación de la técnica de drenaje electroosmótico a ripios y relaves. La parte experimental del trabajo consiste en un diseño experimental con matrices sólidas sintéticas. El porcentaje de finos y la humedad inicial se definen como factores de tres niveles. El volumen de líquido drenado se define como la variable respuesta. Los resultados muestran que el drenaje electroosmótico es más eficiente que el drenaje gravitacional cuando el contenido de humedad y el porcentaje de finos se encuentran en su nivel más alto. Mediante un análisis de varianza del diseño experimental, se corrobora el efecto de los factores y su interacción en la variable de respuesta. Finalmente, se genera una ecuación que describe la relación entre las variables de respuesta y los factores del modelo.

Palabras claves: pasivos medioambientales mineros, drenaje electroosmótico, ANOVA, porcentaje de finos y reducción de humedad.

ABSTRACT

Chile is the largest copper exporter in the world. However, this leadership has significant environmental costs, such as generating large amounts of solid waste from copper ore treatment. The application of the electroosmotic drainage technique to solid residues from leaching and tailings has been proposed to address this problem. The experimental part of this work consists of an experimental design with synthetic solid matrices. The percentage of fine particles and the initial moisture level were defined as factors with three levels. The volume of drained liquid was defined as the response variable. The results showed that electroosmotic drainage was more efficient than gravitational drainage when the moisture content and the percentage of fine material were at their highest levels. The effect of the factors and their interaction was corroborated by an analysis of variance. Finally, an equation was developed to describe the relationship between the response variables and the model factors.

Keywords: mining environmental liabilities, electroosmotic drainage, ANOVA, percentage of fine and moisture reduction.

1. INTRODUCCIÓN

La minería es una de las principales actividades económicas en Chile, siendo la región de Antofagasta una de las principales regiones mineras del país y el mundo. En ella se encuentran grandes depósitos de cobre, molibdeno, litio, plata y oro [1]. A raíz de la explotación de estos recursos naturales, la minería es responsable de daños al medioambiente, como contaminación del aire y de las aguas superficiales y subterráneas [2, 3]. El tratamiento de minerales de cobre, óxidos y sulfuros [4- 7], genera grandes volúmenes de residuos conocidos como pasivos ambientales mineros, que incluyen los rípios de lixiviación y relaves, según la Sociedad Nacional de Minería de Chile (SONAMI).

El contenido final de humedad de los residuos sólidos es elevado. Un volumen significativo de agua y soluciones derivadas de los tratamientos queda atrapado en los intersticios capilares del sólido, siendo difícil de extraer mediante técnicas de drenaje convencionales [8]. Reducir el alto contenido de humedad de los residuos sólidos puede ser económicamente atractivo y tecnológicamente factible para reducir los costos de transporte y el impacto ambiental [9]. Por ejemplo, es normal encontrar afloramientos de solución ácida a en botaderos de rípios de lixiviación, existiendo un riesgo para la salud humana y un riesgo potencial de contaminación del agua subterránea [10].

Este trabajo propone la técnica de drenaje electroosmótico para reducir el contenido final de humedad de los residuos del procesamiento de cobre y acelerar el drenaje del volumen de fluido. Existen varios fenómenos electrocinéticos relacionados con medios porosos: electroósmosis, electromigración, electroforesis y difusión. Los primeros tres están asociados con mecanismos de transporte desarrollados en la aplicación de un potencial eléctrico a través de una matriz sólida [11]. La electroósmosis es el principal mecanismo de transporte de agua a través de un medio poroso de grano fino bajo la influencia de un campo eléctrico de corriente continua [12, 13].

Los residuos del procesamiento de cobre tienen bajas cargas eléctricas en comparación con el agua y las partículas, que tienen carga negativa [14]. Para equilibrar estas cargas, una fila de cationes de la solución se alinea a lo largo de la partícula. El fenómeno de la carga superficial en la partícula y la correspondiente carga contra iónica en el fluido de los poros se conoce como doble capa. Bajo la influencia de una corriente continua, las filas de cationes en la superficie de la partícula comienzan a moverse hacia el cátodo por atracción eléctrica produciendo un flujo electroosmótico desde el ánodo al cátodo [15-17].

CASAGRANDE [18] demostró por primera vez la eficiencia del drenaje electroosmótico para acelerar el drenaje en suelos arcillosos consolidados con baja conductividad hidráulica. Desde entonces, esta técnica se ha extendido con éxito a procesos industriales y aplicaciones de ingeniería geoambiental, como el tratamiento de aguas residuales, desagüe de lodos, aplicaciones geotécnicas y remediación de suelos contaminados [19- 21].

El drenaje electroosmótico es más eficiente que las técnicas de drenaje convencionales en términos de tiempo de operación [22]. Esta técnica es más eficiente cuando el agua queda atrapada entre partículas sólidas finas y no se pueden eliminar eficientemente mediante la aplicación de presión o vacío [23, 24]. El costo de la implementación de esta técnica es más bajo en comparación a otras técnicas convencionales como secado térmico, además, es más eficiente respecto al consumo energético [25]. Para la aplicación de drenaje electroosmótico se necesita una fuente de corriente continua, cables conductores, electrodos de acero y una celda como la mostrada en la siguiente sección. Finalmente, cabe la posibilidad de recuperar metales de valor que se encuentren en la solución drenada.

El flujo electroosmótico puede expresarse en función de la permeabilidad electroosmótica del medio poroso. Este coeficiente es una medida del flujo por unidad de área del medio poroso y por unidad de gradiente eléctrico. Su valor depende del potencial zeta de la interfaz del fluido suelo-poro, la viscosidad del fluido poroso, la porosidad del suelo y la permeabilidad eléctrica del suelo, y es independiente del tamaño del poro [26]. El potencial zeta es un parámetro crítico que afecta el flujo electroosmótico. Según la teoría de HELMHOLTZ-SMOLUCHOWSKI [27], el flujo electroosmótico es proporcional al potencial zeta. El flujo total de fluido es causado principalmente por dos gradientes: el gradiente hidráulico (Ley de Darcy) y el gradiente eléctrico (electroósmosis).

Como se indicó anteriormente, la electroósmosis es efectiva para materiales con partículas finas. Sin embargo, se han realizado pocos estudios sobre la influencia de la cantidad de partículas finas y el contenido de humedad inicial en los volúmenes de drenaje. El objetivo de este trabajo es determinar el efecto de la granulometría y el porcentaje de humedad inicial en el volumen de la solución drenada por medio de un diseño experimental a muestras artificiales con material fino y distintos niveles de humedad.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Celdas de trabajo

Las pruebas se realizaron en recipientes plásticos acondicionados con una lámina de acrílico perforada sobre su base, la cual se cubre con un medio filtrante de material geotextil y se dispone con una leve inclinación para favorecer el proceso de drenaje. La solución drenada se recolecta en la parte baja de la celda, mediante envases plásticos; además, cada una de las celdas cuenta con una fuente de poder de corriente continua en la parte superior.

2.2 Caracterización física de la matriz sólida

La matriz sólida es sintética y se conforma por cuatro tipos de granulometrías: material grueso (gravilla, arena fina y arena gruesa) y material fino (arcilla). La cantidad de material fino se define de acuerdo a la normativa de seguridad minera (inferior a 20% fino) y el material grueso en virtud de la composición promedio de un relave real. La masa en sólidos se define con base en el volumen que ocupa en la celda. Finalmente, de acuerdo al porcentaje de composición y a la densidad característica, se determina la masa de cada material (Tabla 1).

Tabla 1. Distribución de materiales de la matriz sólida.

MATERIAL	10% DE FINOS		15% DE FINOS		20% DE FINOS	
	MASA (KG)	%	MASA (KG)	%	MASA (KG)	%
Gravilla	0,28	4	0,20	3	0,13	2
Arena gruesa	1,86	27	1,65	25	1,46	23
Arena fina	4,07	59	3,77	57	3,49	55
Arcilla	0,69	10	0,99	15	1,27	20

2.3 Preparación de la muestra y operación

Definidas las masas de cada una de las fracciones sólidas, el siguiente paso consiste en humedecer las muestras según los porcentajes definidos, para esto se utiliza agua desionizada con un pH de 8.5. Luego, la muestra es homogenizada antes de ser depositada en la celda; por último, la celda se pesa y se ubican los electrodos a una distancia de 20 cm, utilizando una configuración lineal. De forma paralela se realizan pruebas de drenaje natural con la finalidad de comparar la eficiencia del drenaje electrosmótico (Figura 1).



Figura 1: Operación de drenaje electrosmótico y drenaje natural.

2.4 Variables de diseño y condiciones de operación

Las variables de diseño a evaluar para la caracterización de la matriz sólida son el porcentaje de material fino y el porcentaje de humedad inicial. La normativa de seguridad minera del Servicio Nacional de Geología y

Minería (SERNAGEOMIN) establece que la operación de un depósito de relaves no debe superar el 20% de material fino (< 200 malla Tyler), para mantener una altura y ángulos de talud que maximicen la estabilidad del muro. Respecto a lo anterior y con objeto de dar una posible aplicación a la minería, se trabaja con matrices sólidas de 10, 15 y 20% de finos. Para el caso del porcentaje de humedad inicial, se toman en cuenta valores reales de rípos de lixiviación y relaves. En efecto, estos quedan definidos en 10, 20 y 30%, siendo 10 y 30% los porcentajes de rípos y relaves respectivamente.

Las condiciones de operación se definen con base a un estudio [4] previo realizado en el Centro de Investigación Tecnológico de Agua en el Desierto (CEITSAZA-UCN). Estas condiciones son: tiempo de 48 horas, voltaje de 24 V, electrodos de acero inoxidable, distancia de 20 cm entre electrodos, y una configuración lineal de los mismos. El objetivo de la última condición es lograr una distribución uniforme y paralela al flujo electrosmótico entre ánodos y cátodos.

2.5 Diseño experimental

Las pruebas se plantean de acuerdo a un diseño experimental que consta de dos factores con tres niveles cada uno (3^2). Los factores considerados son porcentaje de finos y humedad inicial; mientras que los niveles son 10, 15 y 20% para el caso de los finos y 10, 20 y 30% para la humedad inicial (Tabla 2). Para este diseño se define como variable de respuesta la reducción de humedad, para la cual se busca comprender la influencia entre factores e interacción de los mismos según sus distintos niveles.

Tabla 2: Diseño experimental de pruebas.

PRUEBA	% HUMEDAD INICIAL	% FINOS
1	10	10
2	20	
3	30	
4	10	15
5	20	
6	30	
7	10	20
8	20	
9	30	

Los resultados son analizados mediante un análisis de varianza (ANOVA) por medio del software computacional “*Statgraphics Centurion*”. El análisis se lleva a cabo con un intervalo de confianza del 95%. Se definen hipótesis de trabajo para determinar la influencia de los factores sobre la variable de respuesta. Además, se determina un modelo teórico-matemático para el caso de los factores, realizando una regresión no lineal.

La hipótesis nula (H_0) considera que los factores y sus interacciones no influyen en la reducción de humedad final, mientras que la hipótesis alternativa (H_1) considera que los factores y sus interacciones si influyen sobre la variable de respuesta. Las hipótesis se representan de la siguiente manera:

- $H_0: A = 0$ vs $H_1: A > 0$
- $H_0: B = 0$ vs $H_1: B > 0$
- $H_0: AB = 0$ vs $H_1: AB > 0$

El factor A se refiere al contenido de finos, el factor B al porcentaje de humedad inicial y el elemento AB es la interacción entre ambos factores. El valor p es el nivel de significancia más bajo que conduce a rechazar la hipótesis nula. Cuando el valor es menor a 0,05 la hipótesis nula es rechazada, mientras que se acepta cuando es mayor.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 Aplicación de drenaje electrosmótico

En las pruebas que cuentan con una humedad inicial del 10% no se consigue disminuir su contenido de humedad mediante la aplicación de drenaje electrosmótico. Esto se atribuye al bajo porcentaje de líquido presente en la matriz, provocando una consolidación que aumenta la resistencia del medio. Por ello, no se genera un flujo electrosmótico capaz de desplazar el líquido atrapado en la matriz. Este efecto se explica mejor con la teoría Helmholtz-Smoluchowski, la cual establece que el flujo electrosmótico depende del campo eléctrico generado, ya que al aumentar el líquido se incrementa la conductividad eléctrica. Cuando la humedad inicial está entre el 20-30% la matriz sólida se encuentra más dispersa, permitiendo de esta manera la existencia de un campo eléctrico que induce el movimiento del fluido. Esto queda demostrado en la prueba 9, en donde mediante la aplicación de corriente eléctrica se logra la mayor reducción en la variable de respuesta disminuyendo hasta un 14,80% (Figura 2).

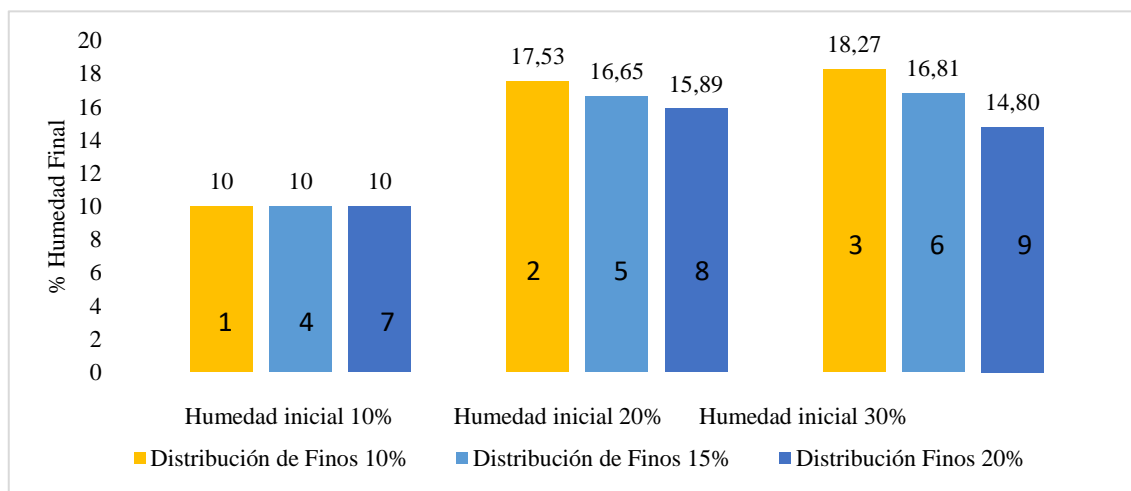


Figura 2: Comparación de resultados obtenidos mediante drenaje electrosmótico.

Con respecto al contenido de finos, las pruebas que poseen un mayor porcentaje de fino presentan en sus resultados la mayor diferencia de humedad. Esto se debe a que a mayor contenido de finos existe una mayor cantidad de partículas suspendidas en solución, las que promueven la migración del agua capilar hacia el cátodo. Lo anterior se refleja en la Tabla 3, en donde la prueba 9 (20% finos) presenta una reducción de humedad aproximada del 50% respecto a la humedad inicial.

Tabla 3: Reducción de humedad mediante la aplicación de drenaje electrosmótico.

PRUEBA	% HUMEDAD INICIAL	% HUMEDAD FINAL	Δ HUMEDAD
1	10	10	0
2	20	17,53	2,47
3	30	18,27	11,73
4	10	10	0
5	20	16,65	3,35
6	30	16,81	13,19
7	10	10	0
8	20	15,89	4,11
9	30	14,80	15,2

3.2 Comparación de drenaje electrosmótico con drenaje natural

En base a los resultados expuestos, al aplicar la técnica de drenaje electrosmótico se logra una mayor reducción de la variable de respuestas cuando aumenta la humedad inicial. Por otro lado, las pruebas realizadas mediante drenaje natural muestran un valor levemente superior en comparación al método electrosmótico, como evidencia la Tabla 4 (ver Tabla 7 en anexos). Esto se debe a que la matriz sólida tiene una permeabilidad relativamente baja, lo que provoca que al aplicar drenaje natural el líquido no pueda penetrar a través del suelo, es decir se evita el paso del flujo. Mientras que para el drenaje electrosmótico este factor no es una problemática, ya que su flujo es independiente.

Tabla 4: Comparación de resultado entre drenaje electrosmótico y drenaje natural.

PRUEBA	% FINOS	% HUMEDAD INICIAL	% HUMEDAD FINAL ELECTROÓSMOSIS	% HUMEDAD FINAL NATURAL	Δ HUMEDAD
1	10	10	10	10	0
2		20	17,53	18,01	0,48
3		30	18,27	19,49	1,22
4	15	10	10	10	0
5		20	16,65	18,03	1,38
6		30	16,81	21,10	4,29
7	20	10	10	10	0
8		20	15,89	18,11	2,22
9		30	14,80	21,20	6,40

3.3 Diseño experimental

En las Tablas 5 y 6 se muestran los resultados obtenidos por medio del ANOVA, los cuales permiten generar una ecuación que describe la relación entre la variable respuesta y los factores asociados al modelo.

Tabla 5: Resultados diseño factorial.

% HUMEDAD INICIAL	% FINOS		
	A1	A2	A3
B1	0	0	0
	0	0	0
B2	12,33	16,76	20,54
	11,80	16,95	19,98
B3	39,11	43,96	50,67
	36,37	41,20	50,01

Los factores A y B representan los distintos niveles de contenido en finos y humedad inicial, respectivamente. De la Tabla 4 se desprende la elevada interacción entre los niveles más altos de cada factor en función de la reducción de humedad, lo que se traduce en una alta eficiencia de trabajo.

Tabla 6. Resultados del ANOVA.

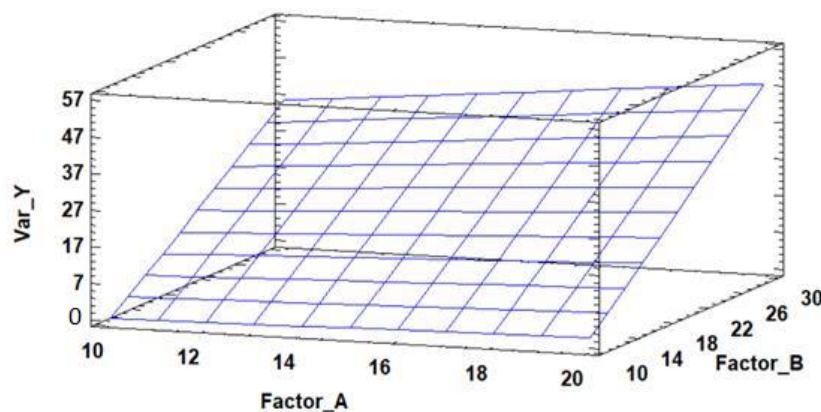
FUENTE DE VARIACIÓN	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	MEDIA CUADRÁTICA	F	P-VALOR
Factor A	144,41	2	72,21	80,27	0,0000
Factor B	5806,60	2	2903,30	3227,60	0,0000
Interacción AB	84,99	4	21,25	23,62	0,0001
Residual	8,10	9	0,90	-	-
Total	6044,09	17	-	-	-

Al ser p menor a 0,05; las hipótesis nulas son rechazadas y por tanto se concluye que ambos factores en sus niveles más altos son igual de influyentes, debido a que su interacción permite lograr resultados notoriamente mejores en comparación a las otras pruebas.

La ecuación característica del diseño experimental se obtuvo mediante regresión no lineal con el método Marquardt, que se muestra a continuación:

$$Y = -17,342 - 0,289 \cdot A + B^{1,096} + 0,049 \cdot AB \quad (1)$$

La Figura 3 muestra un gráfico de superficie de respuesta, donde se representa el valor de la variable de respuesta en función de los dos factores. A causa de que las variables independientes aumentan su valor, la variable respuesta Y incrementa, obteniéndose aproximadamente una reducción del 47% de la humedad inicial.

**Figura 3:** Gráfico de superficie de respuesta.

4. CONCLUSIONES

El aumento del contenido de humedad inicial tiene como efecto un incremento en el volumen recolectado y, por ende, mayor reducción en la humedad al finalizar las experiencias. Este efecto de la humedad se explica con el flujo electroosmótico de Helmholtz-Smoluchowski, parámetro que influye directamente en el proceso de drenaje electroosmótico.

La obtención de la ecuación teórica en base a regresión no lineal proporciona un mejor entendimiento de los factores que afectan a la variable respuesta. Cuando los factores se encuentran en sus niveles más altos, la ecuación arroja un valor aproximado del 48% de interacción, lo que se traduce en una mayor eficiencia de drenado.

Se prueba que el drenaje electroosmótico es más eficiente en matrices con mayor contenido de partículas finas. Esto se debe a que una mayor presencia de partículas en suspensión favorece el flujo electroosmótico.

Tanto el contenido de humedad inicial como la distribución de partículas finas son parámetros fundamentales. Esto se demuestra mediante el análisis de varianza, en donde se observa que ambos efectos y su interacción repercuten directamente en el proceso de drenado electroosmótico.

La permeabilidad para efectos del estudio impacta negativamente al drenaje natural, mas no al electroosmótico. Esto se debe a que sin la aplicación del campo eléctrico las partículas finas obstruyen el drenaje, mientras que este factor para el caso del drenaje electroosmótico lo favorece, dado que la presencia de éstas en suspensión aumenta la conductividad de la matriz.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por CONICYT (FONDECYT de Iniciación 11180329: “*Phenomenological aspects of electroosmotic drainage technique: application to copper leaching*”).

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] GHORBANI, Y., KUAN, S.H., “A review of sustainable development in the Chilean mining sector: Past, present and future”, *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, v. 31, n. 2, pp. 137-165, Feb. 2016.
- [2] ROMERO, H., MÉNDEZ, M., SMITH, P., “Mining development and environmental injustice in the Atacama Desert of Northern Chile”, *Environmental Justice*, v. 5, n. 2, pp. 70-76, Apr. 2012.
- [3] SORIANO-DISLA, J.M., SPILLE, U., GABARRÓN, M., *et al.*, “Evaluation of strategies for mitigating risks associated with metals in pyrite ash”, *Journal of Environmental Management*, v. 217, pp. 403-410, Jul. 2018.
- [4] VELÁSQUEZ-YÉVENES, L., QUEZADA-REYES, V., “Influence of seawater and discard brine on the dissolution of copper ore and copper concentrate”, *Hydrometallurgy*, v. 180, pp. 88-95, Sep. 2018.
- [5] BEIZA, L., QUEZADA, V., MELO, E., *et al.*, “Electrochemical behaviour of chalcopyrite in chloride solutions”, *Metals*, v. 9, 67, Ene. 2019.
- [6] VALENZUELA-ELGUETA, J., JIMÉNEZ, Y.P., DELGADO, A.V., *et al.*, “Electrokinetics and stability of sílica/clay mixtures at high copper concentrations. Implications in the mining of copper”, *Minerals Engineering*, v. 134, pp. 193-201, Abr., 2019.
- [7] VALENZUELA-ELGUETA, J., CÁNOVAS, M., GARCÍA, A., *et al.*, “Electrocoalescence of emulsions in raffinate from the solvent extraction phase under AC electrical fields”, *Journal of Materials Research and Technology*, v. 9, n. 1, pp. 490-497, Feb. 2020.
- [8] VALENZUELA, J., ROMERO, L., ACUÑA, C., *et al.*, “Electroosmotic drainage, a pilot application for extracting trapped capillary liquid in copper leaching”, *Hydrometallurgy*, v. 163, pp. 148-155, Apr. 2016
- [9] RAATS, M.H.M., VAN DIEMEN, A.J.G., LAVEN, J., *et al.*, “Full scale electrokinetic dewatering of waste sludge”, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 210, n. 2, pp. 231-241, Nov. 2002.
- [10] DOLD, B., FONTBOTÉ, L., “Element cycling and secondary mineralogy in porphyry copper tailings as a function of climate, primary mineralogy, and mineral processing”, *Journal of Geochemical Exploration*, v. 74, n. 1, pp. 3-55, Dec. 2001.
- [11] DI FRAIA, S., MASSAROTTI, N., NITHIARASU, P., “Modelling electro-osmotic flow in porous media: a review”, *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, v. 28, n. 2, pp. 472-497, Feb. 2017.
- [12] CHAKRABORTY, S., SRIVASTAVA, A. K., “Generalized model for time periodic electroosmotic flows with overlapping electrical double layers”, *Langmuir*, v. 23, n. 24, pp. 12421-12428, Aug. 2007.
- [13] WICK, L.Y., SHI, L., HARMS, H., “Electro-bioremediation of hydrophobic organic soil-contaminants: A review of fundamental interactions”, *Electrochimica Acta*, v. 52, n. 10, pp. 3441-3448, Feb. 2007.
- [14] ORSAT, V., RAGHAVAN, G.S.V., SOTORINAL, S., *et al.*, “Roller press for electro-osmotic dewatering of bio-materials”, *Drying technology*, v. 17, n. 3, pp. 523-538, Mar. 1999.
- [15] SAICHEK, R.E., REDDY, K.R., “Electrokinetically enhanced remediation of hydrophobic organic compounds in soils: a review”, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, v. 35, n. 2, pp. 115-192, 2005.
- [16] ACAR, Y.B., GALE, R.J., ALSHAWABKEH, A.N., *et al.*, “Electrokinetic remediation: basics and

- technology status”, *Journal of Hazardous Materials*, v. 40, n. 2. pp. 117-137, Feb. 1995
- [17] PROBSTEIN, R.F., *Physicochemical hydrodynamics: an introduction*, 2 ed., Massachusetts, John Wiley & Sons, Inc., Jul. 1994.
- [18] CASAGRANDE, L., “Electroosmotic stabilization of soils”, *Journal of the Boston Society of Civil Engineers*, v. 39, n. 1, pp. 51-83, 1952.
- [19] ROJO, A., HANSEN, H.K., AGRAMONTE, M., “Electrokinetic remediation with high frequency sinusoidal electric fields” *Separation and Purification Technology*, v. 79, n. 2. pp. 139-143, Jun. 2011.
- [20] CÁNOVAS, M., VALENZUELA, J., ROMERO, L., *et al.*, “Characterization of electroosmotic drainage: application to mine tailings and residues from leaching”, *Journal of Materials Research and Technology*, v. 9, n. 3, pp. 2960-2968, Jun. 2020.
- [21] YOSHIDA, H., YOSHIKAWA, T., KAWASAKI, M., “Evaluation of suitable material properties of sludge for electroosmotic dewatering”, *Drying Technology*, v. 31, n. 7, pp. 775-784, May. 2013.
- [22] YOSHIDA, H., “Practical aspects of dewatering enhanced by electro-osmosis”, *Drying Technology*, v. 11, n. 4, pp. 784-814, Jun. 1993.
- [23] VIJH, A.K., NOVAK, J.P., “A new theoretical approach to electroosmotic dewatering (EOD) based on non-equilibrium thermodynamics,” *Drying Technology*, v. 15, n. 2, pp. 699-709, Jan. 1997.
- [24] LOCKHART, N.C., “Combined field dewatering: bridging the science-industry gap”, *Drying Technology*, v. 10, n. 4, pp. 839-874, Sept. 1992.
- [25] MAHMOUD, A., OLIVIER, J., VAXELAIRE, J., *et al.*, “Electrical field: A historical review of its application and contributions in wastewater sludge dewatering”, *Water Research*, v. 44, n. 8, pp. 2381-2407, Jan. 2010.
- [26] ESRIG, M.I., “Pore pressures, consolidation, and electrokinetics”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, v. 94, n. 4, pp. 899-922, Jul. 1968.
- [27] SMOLUCHOWSKI, N., *Handbuch der Elektrizität und des Magnetismus*, 2 ed., Leipzig, JA Barth, 1921.

ORCID

Manuel Cánovas	https://orcid.org/0000-0003-4981-9271
Julio Valenzuela	https://orcid.org/0000-0001-8499-4599
Paul González	https://orcid.org/0000-0001-8150-5710
Cristian Cuevas	https://orcid.org/0000-0001-6285-2995

7. ANEXOS

Tabla 7. Volumen recolectado aplicando ambas técnicas.

TEST	% FINOS	% HUMEDAD	VOLUMEN ELECTROOSMOSIS (L)	VOLUMEN NATURAL (L)
1	10	10	0	0
2	10	20	0,26	0,21
3	10	30	1,41	1,29
4	15	10	0	0
5	15	20	0,33	0,19
6	15	30	1,50	1,07
7	20	10	0	0
8	20	20	0,39	0,18

9	20	30	1,62	1,01
---	----	----	------	------