

REPRESENTATIVIDAD DEL MUESTREO EN ACOPIOS DE SALES DE POTASIO: INFLUENCIA DE LA HUMEDAD Y EL ESCURRIMIENTO SOBRE LA DETERMINACIÓN DE LA LEY DE CABEZA

Pablo Andres Gumiel Rivera ¹

1. Facultad de Ingeniería, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia
14gumielpablinas@gmail.com

RESUMEN

El muestreo de sales de potasio acopiadas constituye una etapa crítica para obtener resultados analíticos confiables, debido a la heterogeneidad física y química propia de los materiales particulados almacenados a granel. La distribución granulométrica, la compactación, la humedad inicial y el escurrimiento pueden modificar la concentración local de los componentes principales, afectando la representatividad de la muestra y la determinación de la ley de cabeza. El objetivo del estudio fue evaluar la representatividad de cuatro métodos de muestreo aplicados a acopios de sales de potasio, considerando la concentración de potasio, sodio, magnesio, calcio, cloruros, sulfatos y humedad inicial. Se desarrolló un estudio experimental, descriptivo y comparativo. El procedimiento incluyó toma de incrementos en puntos definidos, extracción mediante sonda, recolección en recipientes identificados, homogeneización, cuarteo, codificación y análisis de laboratorio. Los resultados evidenciaron que el Método 3, basado en puntos altos y bajos del acopio, presentó la menor desviación absoluta para potasio, con 0,15 g/100 g respecto a la ley de cabeza referencial. Se concluye que el muestreo representativo de sales de potasio acopiadas debe considerar no solo la cantidad de puntos de toma, sino también su ubicación espacial, la variabilidad vertical del material, la humedad y el posible escurrimiento interno o superficial.

Palabras clave: sales de potasio, muestreo, acopio, humedad, escurrimiento, ley de cabeza.

1. INTRODUCCIÓN

La determinación de la ley de cabeza en sales de potasio depende directamente de la calidad del muestreo aplicado al material acopiado. En materiales particulados, una muestra representa adecuadamente al lote únicamente cuando el procedimiento de toma permite reducir los errores asociados a la heterogeneidad del material, la segregación granulométrica y la selección incorrecta de incrementos (1,2).

Las sales de potasio acopiadas pueden presentar diferencias entre zonas superiores, inferiores, centrales, laterales y periféricas del acopio. Estas diferencias se relacionan con el tamaño de partícula, compactación, exposición ambiental, humedad y desplazamiento de agua dentro del material. Por ello, el muestreo no debe limitarse a una toma superficial o a puntos de fácil acceso, sino que debe diseñarse considerando la distribución espacial del acopio.

La humedad inicial es una variable relevante en materiales salinos, debido a que puede favorecer procesos de disolución parcial, redistribución de componentes solubles y acumulación en zonas de menor drenaje. En este contexto, el escurrimiento puede entenderse como el desplazamiento superficial o sub-superficial del agua por acción de la gravedad. La U.S. Geological Survey describe que, cuando el agua cae sobre una superficie, una parte puede infiltrarse y otra desplazarse por gravedad como escurrimiento superficial; además, señala que el escurrimiento puede clasificarse según su velocidad de aparición y fuente de origen (3).

Desde la teoría del muestreo de materiales particulados, el objetivo principal es obtener una muestra que mantenga la composición del lote original, reduciendo sesgos de selección, preparación y división de muestra (1,4). En consecuencia, la toma de incrementos, la homogeneización y el cuarteo son operaciones fundamentales, pero su eficacia depende de que los puntos seleccionados representen adecuadamente la variabilidad del acopio.

El presente artículo evalúa cuatro métodos de muestreo aplicados a sales de potasio acopiadas, con énfasis en la concentración de potasio como componente principal y en la humedad inicial como factor asociado al posible escurrimiento y redistribución interna del material.

2. METODOLOGÍA

Se desarrolló un estudio experimental, descriptivo y comparativo. El material de análisis correspondió a sales de potasio acopiadas, evaluadas mediante cuatro métodos de muestreo. El

estudio se enfocó en la comparación de resultados analíticos obtenidos por cada método frente a una ley de cabeza referencial.

El procedimiento general de muestreo incluyó las siguientes etapas: selección de puntos de toma, extracción de incrementos mediante sonda, recolección en recipientes identificados, homogeneización, cuarteo, embolsado, codificación y análisis de laboratorio.

Las variables químicas evaluadas fueron magnesio, potasio, sodio, calcio, cloruros y sulfatos, expresadas en g/100 g. También se consideró la humedad inicial, expresada en g/100 g. El potasio fue tomado como componente principal para evaluar la representatividad de los métodos.

2.1. DESCRIPCIÓN TÉCNICA DE LOS MÉTODOS DE MUESTREO

Método 1: muestreo básico en cinco puntos.

Consistió en la toma de incrementos desde cinco puntos definidos del acopio. Este método permitió evaluar una estrategia básica de cobertura espacial. Los incrementos fueron extraídos mediante sonda, reunidos en un recipiente, homogeneizados y cuarteados antes del análisis.

Método 2: muestreo ampliado en nueve puntos.

Consideró nueve puntos de toma de incrementos. Su finalidad fue aumentar la cobertura espacial del acopio y reducir el efecto de la heterogeneidad lateral del material. Este método parte del criterio de que una mayor cantidad de puntos puede mejorar la representatividad, siempre que estos se encuentren adecuadamente distribuidos.

Método 3: muestreo en puntos altos y bajos.

Incluyó cinco puntos distribuidos en diferentes alturas del acopio, considerando zonas altas y bajas. Este método buscó captar la variabilidad vertical del material, tomando en cuenta que la humedad, la compactación y el escurrimiento pueden generar diferencias entre la parte superior e inferior del acopio.

Método 4: muestreo en aristas del acopio.

Consideró nueve puntos ubicados en zonas externas o aristas. Su propósito fue evaluar la representatividad de sectores periféricos del acopio. Sin embargo, al concentrarse en zonas externas, este método puede estar más influido por variaciones superficiales, segregación de partículas, exposición ambiental o acumulación localizada de humedad.

2.2. CRITERIOS DE EVALUACIÓN

Para evaluar la representatividad de los métodos se utilizaron tres criterios:

Diferencia absoluta respecto a la ley de cabeza:

$$\Delta X = |X_{\text{método}} - X_{\text{referencia}}|$$

Error porcentual: $E(\%) = \frac{X_{\text{referencia}} - X_{\text{método}}}{X_{\text{referencia}}} \times 100$

Criterio de representatividad para potasio:

Se consideró más representativo el método con menor desviación absoluta respecto al valor referencial de potasio, por ser el componente principal del estudio.

3. RESULTADOS

3.1. COMPOSICIÓN PROMEDIO DEL ACOPIO

Tabla 1.
Composición promedio del acopio de sales de potasio

PARÁMETRO	RESULTADO PROMEDIO
Magnesio	1,29 g/100 g
Potasio	12,33 g/100 g
Sodio	26,30 g/100 g
Calcio	0,07 g/100 g
Cloruros	51,93 g/100 g
Sulfatos	4,81 g/100 g
Humedad inicial	5,60 g/100 g

Fuente: Elaboración propia.

El material evaluado presentó predominio de cloruros, sodio y potasio. La humedad inicial promedio fue de 5,60 g/100 g, valor relevante para interpretar la distribución interna del material, ya que la humedad puede favorecer redistribución de componentes solubles dentro del acopio.

3.2. COMPARACIÓN DE MÉTODOS FRENTE A LA LEY DE CABEZA

Tabla 2.
Comparación de métodos de muestreo frente a la ley de cabeza referencial

PARÁMETRO	LEY DE CABEZA	MÉTODO 1	MÉTODO 2	MÉTODO 3	MÉTODO 4
Mg	1,51	1,23	1,07	1,25	1,15
K	11,68	12,18	11,96	11,53	13,12
Na	26,30	26,67	27,41	27,04	26,65
Ca	0,07	0,07	0,06	0,07	0,06
Cl	51,93	52,20	52,93	52,97	52,88
SO ₄	5,66	4,47	3,78	4,31	4,57
Humedad inicial	5,60	6,34	4,89	4,83	5,73
Nota: valores expresados en g/100 g.					

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran que el potasio presentó valores de 12,18 g/100 g en el Método 1, 11,96 g/100 g en el Método 2, 11,53 g/100 g en el Método 3 y 13,12 g/100 g en el Método 4, frente a una ley de cabeza referencial de 11,68 g/100 g.

3.3. EVALUACIÓN DE LA DESVIACIÓN ABSOLUTA DEL POTASIO

Tabla 3.
Desviación absoluta del potasio respecto a la ley de cabeza

MÉTODO	K OBTENIDO	LEY DE CABEZA K	DESVIACIÓN ABSOLUTA ΔK	RESULTADO TÉCNICO
Método 1	12,18	11,68	0,50	Desviación intermedia
Método 2	11,96	11,68	0,28	Buena aproximación
Método 3	11,53	11,68	0,15	Mejor aproximación
Método 4	13,12	11,68	1,44	Mayor desviación
Nota: valores expresados en g/100 g.				

Fuente: Elaboración propia.

La menor desviación absoluta para potasio correspondió al Método 3, con 0,15 g/100 g. Este resultado indica que el método con puntos altos y bajos presentó la mejor aproximación a la ley de cabeza referencial.

3.4. ERROR PORCENTUAL POR MÉTODO

Tabla 4.
Error porcentual de los métodos de muestreo

PARÁMETRO	MÉTODO 1	MÉTODO 2	MÉTODO 3	MÉTODO 4
Mg	18,59 %	29,14 %	17,22 %	23,84 %
K	-4,28 %	-2,40 %	1,28 %	-12,33 %
Na	-1,41 %	-4,22 %	-2,81 %	-1,33 %
Ca	0 %	14,29 %	0 %	14,29 %
Cl	-0,52 %	-1,93 %	-2,00 %	-1,83 %
SO ₄	21,02 %	33,22 %	23,85 %	19,26 %
Humedad inicial	-13,27 %	12,68 %	13,75 %	-2,32 %

Fuente: Elaboración propia.

El menor error porcentual para potasio correspondió al Método 3, con 1,28 %. Este comportamiento confirma que la ubicación vertical de los puntos de toma fue más relevante que el simple incremento del número de puntos de muestreo.

3.5. MATRIZ TÉCNICA DE DESEMPEÑO DE LOS MÉTODOS

Tabla 5.
Matriz interpretativa de desempeño

MÉTODO	DISEÑO DE MUESTREO	VENTAJA PRINCIPAL	LIMITACIÓN PRINCIPAL	EVALUACIÓN TÉCNICA
Método 1	Cinco puntos distribuidos	Procedimiento simple y rápido	Cobertura limitada de la variabilidad vertical	Representatividad intermedia
Método 2	Nueve puntos distribuidos	Mayor cobertura espacial	No garantiza captura de variabilidad vertical	Buena aproximación para K
Método 3	Puntos altos y bajos	Capta variabilidad vertical y posible efecto de humedad	Requiere criterio técnico en la selección de alturas	Mejor desempeño para K
Método 4	Nueve puntos en aristas	Evalúa zonas externas del acopio	Puede sobrevalorar zonas periféricas o superficiales	Menor desempeño para K

Fuente: Elaboración propia.

Esta matriz permite interpretar los resultados desde un enfoque técnico de muestreo. El Método 3 no fue superior por cantidad de puntos, sino por la ubicación estratégica de estos dentro del acopio.

3.6. VARIACIÓN DE HUMEDAD INICIAL

Tabla 6.
Humedad inicial según método de muestreo

REFERENCIA O MÉTODO	HUMEDAD INICIAL	DIFERENCIA ABSOLUTA RESPECTO A REFERENCIA
Ley de cabeza	5,60 g/100 g	—
Método 1	6,34 g/100 g	0,74
Método 2	4,89 g/100 g	0,71
Método 3	4,83 g/100 g	0,77
Método 4	5,73 g/100 g	0,13

Fuente: Elaboración propia.

La humedad inicial presentó variación entre métodos. Esta diferencia sugiere que la humedad no se distribuye de manera uniforme dentro del acopio. En materiales solubles, esta condición es relevante porque el agua puede favorecer disolución parcial, migración de componentes y acumulación en zonas bajas o de menor drenaje.

4. DISCUSIÓN

Los resultados muestran que la representatividad del muestreo en acopios de sales de potasio no depende únicamente del número de puntos de toma, sino también de su ubicación espacial. Aunque los métodos 2 y 4 consideraron nueve puntos, no presentaron la menor desviación para potasio. Esto demuestra que aumentar la cantidad de puntos no garantiza por sí solo una muestra más representativa.

El Método 3 presentó el mejor comportamiento para potasio, con una desviación absoluta de 0,15 g/100 g respecto a la ley de cabeza y un error porcentual de 1,28 %. Este resultado puede explicarse porque el método incluyó puntos altos y bajos del acopio, lo que permitió captar mejor la variabilidad vertical del material. En acopios salinos, dicha variabilidad puede estar influida por compactación, segregación granulométrica, humedad y escurrimiento.

La humedad inicial mostró variaciones entre los métodos, con valores entre 4,83 y 6,34 g/100 g. Esta diferencia es relevante porque, en materiales solubles, la humedad puede actuar como un factor de redistribución interna. El desplazamiento de agua por gravedad puede favorecer la disolución parcial de sales, la migración de componentes solubles y la acumulación en zonas bajas o de menor drenaje.

Los mayores errores observados en magnesio y sulfatos indican que estos componentes pueden presentar una distribución más irregular dentro del material. Por ello, cuando el objetivo analítico incluya componentes secundarios, el diseño de muestreo debe reforzarse mediante una mejor distribución espacial de los puntos y un control más estricto de la humedad.

El Método 4, aunque incorporó nueve puntos, presentó la mayor desviación para potasio. Esto sugiere que la concentración de puntos en aristas o zonas externas puede generar sesgo cuando dichas zonas no representan adecuadamente la composición interna del acopio. Las aristas pueden estar más expuestas a variaciones superficiales, pérdida o acumulación de humedad, segregación de partículas y cambios físicos por manipulación del material.

Desde el punto de vista técnico, un procedimiento adecuado de muestreo debe combinar tres elementos: distribución estratégica de puntos, inclusión de diferentes alturas del acopio y preparación cuidadosa de la muestra mediante homogeneización y cuarteo. Esta combinación permite reducir el sesgo asociado a la heterogeneidad del material y mejorar la confiabilidad de la ley de cabeza.

5. CONCLUSIONES

El muestreo de sales de potasio acopiadas es una etapa crítica para la determinación confiable de la ley de cabeza, debido a la heterogeneidad física y química del material.

El Método 3 presentó la mejor aproximación para potasio, con una desviación absoluta de 0,15 g/100 g y un error porcentual de 1,28 %, por lo que se considera el método más representativo entre los evaluados para el componente principal del estudio.

La ubicación de los puntos de muestreo fue más determinante que la cantidad de puntos. Los métodos con mayor número de puntos no necesariamente presentaron menor error.

La humedad inicial y el posible escurrimiento influyen en la representatividad del muestreo, ya que pueden modificar la distribución interna de componentes solubles dentro del acopio.

Los errores observados en magnesio y sulfatos sugieren una mayor irregularidad en la distribución de estos componentes, por lo que su evaluación requiere un diseño de muestreo más cuidadoso.

Se recomienda que el muestreo de sales de potasio acopiadas incluya puntos altos, bajos, centrales y laterales, además de una adecuada homogeneización y cuarteo antes del análisis de laboratorio.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. **Gy, P. (1979).** Sampling of particulate materials: Theory and practice. Elsevier Scientific Publishing Company.
2. **Pitard, F. F. (2019).** Theory of sampling and sampling practice (3.^a ed.). CRC Press.
3. **U.S. Geological Survey. (2018).** Runoff: Surface and overland water runoff. <https://www.usgs.gov/water-science-school/science/runoff-surface-and-overland-water-runoff>
4. **Gy, P. (1998).** Sampling for analytical purposes. John Wiley & Sons.
5. **Esbensen, K. H. (2020).** Introduction to the theory and practice of sampling. IM Publications Open.
6. **International Organization for Standardization. (2001).** Statistical aspects of sampling from bulk materials — Part 2: Sampling of particulate materials (Norma ISO No. 11648-2:2001).