



## GESTIÓN DE LODOS CON ARSÉNICO

### Fleitas Virginia (\*)

Química, orientación Agrícola y Medio Ambiente

Departamento de Ingeniería Ambiental, IMFIA, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República

### Franchi I., González E., López J., Ramírez C., Rezzano N., Rodríguez Núñez R.

Departamento de Ingeniería Ambiental, IMFIA, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República

### Godoy D., Lesa A., Novello D., Olivera G., Rodríguez Viacava I.

Instituto de Ensayo de Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República

### Gerencia de Agua Potable; Gerencia Litoral Norte; Personal de la Jefatura Técnica de Río Negro

Administración de las Obras Sanitarias del Estado

**TEMA:** Residuos sólidos: urbanos, industriales y peligrosos; recolección, disposición final, valorización y reciclaje. Biosólidos y su gestión. Normativa.



(\*): Av. Julio Herrera y Reissig 565 – Montevideo – 11300 – Uruguay - Tel.: 27115276 int. 206 – e-mail: [virginiaf@fing.edu.uy](mailto:virginiaf@fing.edu.uy)

### RESUMEN

En el presente trabajo se realizó un estudio del lodo generado en una planta potabilizadora de agua subterránea con arsénico, en la localidad de San Javier, Uruguay. Con el objetivo de evaluar su adecuada gestión, en consonancia con la normativa nacional, se realizó una caracterización del residuo enfocada en la presencia de arsénico. Los resultados obtenidos de la concentración de este elemento en el lodo y en el lixiviado resultaron menores que los límites establecidos por el Decreto N° 182/013 para residuos asimilables a residuos sólidos urbanos. Por otra parte, se realizaron mezclas incorporando cemento Portland en distintas proporciones, para evaluar su capacidad de estabilizar el arsénico. Los resultados obtenidos resultan alentadores, ya que en las mezclas, la lixiviación de arsénico resultó más de 60 veces menor que la del lodo sin estabilizar. Adicionalmente, con el objetivo de encontrar alternativas que eviten la disposición de residuos, se estudiaron distintas vías de valorización, incorporando el lodo en procesos de producción de elementos a base de cemento, obteniendo resultados con perspectivas positivas. Las exigencias ambientales, cada vez más rigurosas, y la necesidad de encontrar alternativas que sean sustentables a largo plazo desde los puntos de vista ambiental, social y económico abogan por soluciones de este tipo.

**Palabras Clave:** Arsénico, Estabilización, Lodos, Potabilización, Residuos.

### INTRODUCCIÓN

En el presente artículo se muestra parte del trabajo realizado entre el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA) y el Instituto de Ensayo de Materiales (IEM) de la Facultad de Ingeniería, y la Administración de las Obras Sanitarias del Estado (OSE), en el marco del acuerdo a través de la Fundación Julio Ricaldoni (FJR). El proyecto tuvo como objeto de estudio el proceso de potabilización de agua subterránea con presencia de arsénico en una planta instalada en la localidad de San Javier, con particular énfasis en la gestión del lodo generado como residuo.

### CARACTERIZACIÓN

El lodo deshidratado es un material semisólido, con un alto contenido de humedad, de consistencia plástica y color blanquecino. Su composición está principalmente asociada a los precipitados de hidróxido de aluminio que se generan en la etapa de coagulación, en conjunto con el polímero



dosificado. También lo integran los compuestos presentes en el agua bruta, principalmente de naturaleza inorgánica, que se logran precipitar en la sedimentación, o que se logran retener durante la filtración.

Con la finalidad de evaluar las alternativas de acondicionamiento y disposición final, se caracterizó el residuo para clasificarlo según lo expresado en el Decreto N° 182/013 que regula la gestión de residuos sólidos industriales y asimilables. En cuanto a la presencia de arsénico, para que el lodo pueda ser gestionado como un residuo sólido urbano (Categoría II del Decreto), debe presentar un contenido menor a 1.000 mg/Kg y una concentración en el lixiviado inferior a 1,0 mg/L, así como una ecotoxicidad EC50 > 100 %. Los residuos sólidos que presentan valores por fuera de estos límites son clasificados en la Categoría I y deben ser dispuestos en relleno de seguridad.

Se tomaron cuatro muestras asociadas a distintos días de operación de la planta de potabilización y se determinó la concentración de arsénico en base seca. A su vez, se realizó el ensayo estándar de lixiviación TCLP (US-EPA 1992) y se determinó la concentración de arsénico en el lixiviado. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 1.

**Tabla 1. Concentración de Arsénico.**

Muestra	As (mg/kg)	As lixiviado (mg/L)
1	907	0,9
2	965	0,3
3	816	< 0,005
4	872	0,5

La concentración media en el lodo resultó de 890 mg As/kg, mientras que la lixiviación fue variable, alcanzando como máximo una concentración de 0,9 mg As/L. De los resultados obtenidos, se observa que no existe una correlación entre los parámetros, por lo que no se puede asociar directamente la concentración de arsénico en el lodo con su concentración en el lixiviado.

Por otra parte, se realizaron ensayos de ecotoxicidad sobre *Daphnia Magna* y *Vibrio Fischeri*, cuyos resultados se muestran en la Tabla 2. Los resultados arrojaron una gran incertidumbre; si bien sería esperable encontrar una relación entre este parámetro y la lixiviación de arsénico, los resultados no permiten establecerla.

Otros posibles componentes del lodo que por su naturaleza o por su cantidad relativa pudieran influir en la toxicidad, son el aluminio, el cloro y el polímero. El contenido de aluminio fue determinado en las cuatro muestras y no se observó correlación con el resultado de ecotoxicidad. El contenido de cloro estaría asociado a la concentración de cloro residual presente en el agua contenida dentro del lodo deshidratado, lo que se estima menor. Respecto del polímero, la información toxicológica del producto utilizado indica que los efectos agudos sobre organismos los origina la carga catiónica del polímero, pero que ésta se neutraliza rápidamente por adsorción de partículas (producto de su aplicación para la coagulación del lodo). En consecuencia, para poder asociar la ecotoxicidad obtenida a las características del lodo, sería necesario un análisis más profundo.

**Tabla 2. Ecotoxicidad del lodo deshidratado.**

Muestra	Toxicidad agua <i>Daphnia Magna</i>	Toxicidad aguda <i>Vibrio Fischeri</i>
1	> 100 %	> 100 %
2	< 1 %	< 1 %
3	> 100 %	84,30 %
4	67,30 %	93,10 %

Los resultados obtenidos asociados al arsénico son menores que los límites inferiores de la Categoría I según lo dispuesto en el Decreto N° 182/013. En virtud de ello, la consideración aislada de esos parámetros permitiría la clasificación del lodo deshidratado como residuo Categoría II. Sin embargo, los



resultados obtenidos respecto a la ecotoxicidad del residuo implicarían su clasificación como Categoría I; no obstante, estos resultados no parecen estar vinculados a la presencia de arsénico.

Adicionalmente, a cada muestra se le determinó su contenido de humedad. El valor medio de los resultados obtenidos para las cuatro muestras fue de 93 %. A su vez, no se registró una variación apreciable de humedad en el geotubo de prueba a lo largo de 2 meses. Por lo general, los sitios de disposición final no admiten residuos con un contenido de humedad mayor al 80 %.

## ESTABILIZACIÓN

La estabilización/solidificación (S/S) con cemento Portland es una técnica ampliamente utilizada para el tratamiento previo a la disposición final de residuos.

Con el objetivo de evaluar la estabilización del arsénico con cemento, se realizaron cinco mezclas con proporciones lodo deshidratado:cemento entre 9:1 y 7:3, utilizando cemento Portland Compuesto (CPC40). Las mezclas fueron curadas, conservándolas durante 7 días en bolsas herméticas. Luego, se realizó el ensayo estándar de lixiviación TCLP, y posterior determinación de la concentración de arsénico en el lixiviado. Los resultados se presentan en la Tabla 3; en todos los casos la concentración de arsénico resultó menor que 0,005 mg/L. Teniendo en consideración que el lodo utilizado fue el que se correspondía con la muestra 2, que había arrojado una concentración de arsénico en el lixiviado de 0,3 mg/L, se pone de manifiesto la capacidad del cemento Portland de inmovilizar el arsénico, ya sea por medio de reaccionar con él y generar compuestos de baja solubilidad, o a través de un mecanismo de encapsulación. Una adición de cemento del 10% en peso ya es suficiente para lograr la estabilización.

**Tabla 3. Arsénico lixiviado para distintas mezclas de lodo y cemento.**

	70 %	75 %	80 %	85 %	90 %
<b>As lixiviado (mg/L)</b>	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005

Las mezclas con menos cemento incorporado evidenciaron una consistencia plástica más similar al lodo en comparación con las mezclas con mayor proporción de cemento, que se mostraron más endurecidas. Debido a que presentaba la mejor consistencia, se seleccionó la proporción de 75 % de lodo deshidratado y 25 % de cemento Portland para realizar análisis de ecotoxicidad y humedad. A los 10 días de realizada la mezcla, se tomó una muestra y se le realizaron ensayos de ecotoxicidad. Estos se reiteraron a los 34 días de realizada la mezcla, de modo de observar posibles cambios asociados al endurecimiento. Los resultados se presentan en la Tabla 4. Los ensayos de ecotoxicidad realizados a los 34 días no mostraron una mejoría respecto a los resultados anteriores. Sin embargo, si se lo compara con la ecotoxicidad de la muestra 2 de lodo deshidratado (< 1 %), se observa un cambio favorable.

**Tabla 4. Ecotoxicidad de la mezcla lodo-cemento.**

Toxicidad aguda <i>Daphnia Magna</i>		Toxicidad agua <i>Vibrio Fischeri</i>	
10 días	34 días	10 días	34 días
71,5 %	37,6 %	45,5 %	64,0 %

Con respecto a la humedad, la mezcla con cemento Portland provoca una disminución significativa. Se determinó a los 11 y a los 25 días de la elaboración de la mezcla, obteniéndose resultados de 60 y 37 % respectivamente. La humedad original del lodo utilizado fue de 89 %. En conclusión, ya a los 11 días la humedad obtenida es inferior al valor máximo admitido en los sitios de disposición final, incluso con 7 días de curado.

A partir de los ensayos y las observaciones realizadas, se puede concluir que la técnica de estabilización con cemento surge como una solución adecuada para los casos en los cuales la alternativa de disposición final como residuo Categoría II no fuera viable.



## VALORIZACIÓN

Se estudió la viabilidad de valorizar el residuo generado, incorporándolo a morteros como sustituto de agregado fino, sustituto de cemento Portland o sustituto del agua. Se evaluaron parámetros como la consistencia de las mezclas en estado fresco y la resistencia a compresión en estado endurecido. Para fabricar las mezclas de mortero se utilizó el lodo correspondiente a la muestra 1.

Para ser incluido como agregado fino, el lodo fue secado en horno a 103 °C hasta peso constante y molido de forma manual hasta lograr su pasaje a través de tamiz de 4,75 mm. La composición granulométrica del lodo seco y tamizado se comparó con los límites establecidos por la norma UNIT 82-51 para áridos en morteros, observándose que en su porción más fina se supera el máximo de la norma. El material obtenido se aproxima más a la clasificación de "arena gruesa", producto de haber realizado el molido en forma manual.

Luego, se elaboraron mezclas de mortero conforme con las cantidades y el procedimiento descrito en la Norma UNIT-ISO 679 (1 parte de agua, 2 partes de cemento, 6 partes de arena). Se ensayaron 10 mezclas contemplando diferentes variables: distinto porcentaje de sustitución en peso de lodo por arena (0, 1, 2, 3, 6 y 9 %), diferentes relaciones agua/cemento ( $a/c = 0,50; 0,525; 0,55$ ), y el uso de aditivo para mejorar la consistencia. Los materiales empleados para su fabricación fueron: lodo seco y tamizado, cemento Portland Compuesto (CPC40), arena normalizada (ISO 679), aditivo Viscocrete 6 y agua destilada. Para esas dosificaciones se evaluó la consistencia del mortero en estado fresco (IRAM 1570, NCh 2256/1) y la resistencia a compresión de los morteros en estado endurecido (UNIT-ISO 679).

En relación con la consistencia de los morteros en estado fresco, la norma NCh 2256/1 establece 3 clases de consistencia según el diámetro de extendido del mortero obtenido a partir del ensayo de escurrimiento: seca  $\leq 18$  cm; plástica entre 18 - 22 cm; fluida  $\geq 22$  cm. Con el mortero de referencia se obtuvo una consistencia fluida (221 mm), mientras que para las sustituciones de lodo por arena de 1 % (209,3 mm – plástica), 2 % (194,3 mm – plástica) y 3 % (173,3 mm - seca) se obtuvieron resultados aceptables en relación con el desempeño del mortero de referencia. Las sustituciones de 6 y 9 % presentaron consistencias muy secas, con escurrimientos mínimos o, en el caso de la sustitución de 9 %, una disgregación excesiva de la masa del mortero. Para mejorar la consistencia en las sustituciones más altas se evaluaron dos alternativas, por un lado, aumentar la cantidad de agua de amasado (aumentar la relación  $a/c$ ), pero la incorporación de más cantidad de agua a la mezcla tuvo efectos negativos ya que se observaron indicios de exudación y segregación. Por otro lado, se evaluó mantener la relación  $a/c$  e incorporar un aditivo superplastificante (Viscocrete 6), en este caso se obtuvieron buenos resultados de consistencia sin segregación o exudación de importancia, lo cual resulta ventajoso si se quieren utilizar porcentajes altos de sustitución de lodo por arena.

Con respecto a los resultados de propiedades mecánicas de los morteros en estado endurecido, la de mayor relevancia es la resistencia a compresión, donde se realizaron ensayos para 2 y 28 días de edad a modo de obtener una muestra representativa del proceso de endurecimiento y aumento de resistencia de los morteros. Para ello, se elaboraron 3 probetas de 4 x 4 x 16 cm por mezcla de mortero y se ensayaron de acuerdo a la norma UNIT-ISO 679. En la Figura 1 se presentan los resultados obtenidos.

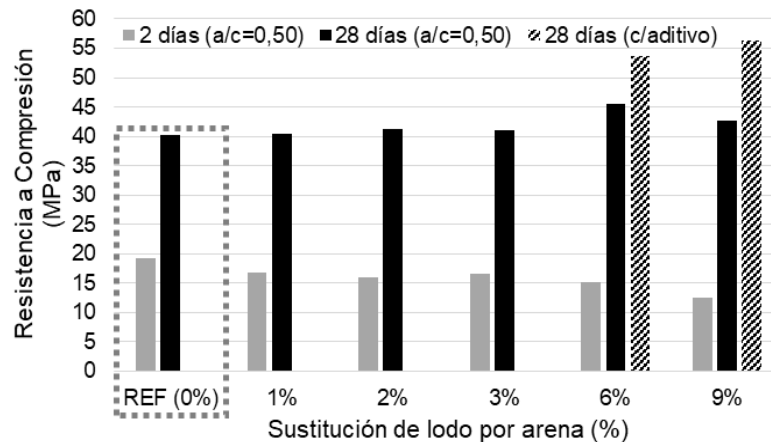


Figura 1. Resistencia a compresión a los 2 y 28 días.

Puede observarse que, a los 2 días de edad, los resultados de resistencia a compresión de las mezclas con sustitución de lodo por arena alcanzaron valores menores al del mortero de referencia. Mientras que, a los 28 días de edad, con porcentajes de sustitución de 1, 2 y 3 % se obtienen valores de resistencia a compresión similares a los de la referencia, y con 6 y 9 % dan valores levemente mayores. Por otro lado, en relación con los valores obtenidos para las mezclas con 6 y 9 % de sustitución, donde se mantuvo la relación a/c en 0,50 pero se agregó aditivo para mejorar la consistencia, puede observarse que los valores de resistencia a compresión a los 28 días aumentaron en relación con esas mismas mezclas pero sin aditivo.

A modo de conclusión, en relación con la consistencia de los morteros en estado fresco, los porcentajes bajos de sustitución de lodo por arena (1, 2 y 3 %) presentan resultados próximos al comportamiento de la mezcla de referencia, no presentando ni disgregación, ni exudación, mientras que los porcentajes altos de sustitución (6 y 9%) requirieron del uso de aditivo para lograr los mismos resultados. En cuanto a la resistencia a compresión a la edad de 2 días se mostró menor que la referencia para todas las sustituciones analizadas. No obstante, para la edad de 28 días dichas diferencias se redujeron y se aproximaron a la resistencia de la referencia. Es decir, que la sustitución de arena por lodo en los mencionados porcentajes no reduce la resistencia del mortero a los 28 días de edad. En caso de requerirse valores de resistencias aún mayores, podría disminuirse la relación agua/cemento, y agregar aditivo para contrarrestar la pérdida de consistencia.

Por otro lado, para ser incluido como sustituto de cemento Portland, el lodo que había sido secado, molido de forma manual y tamizado, fue nuevamente molido en molino de bolas para aproximar la granulometría a la del cemento Portland. La resistencia a flexión y a compresión a los 2 y 28 días de edad de las mezclas analizadas (2,5 y 5 % de sustitución en peso de polvo de lodo por cemento, manteniendo una relación a/c = 0,5) resultaron similares a la referencia, por lo que la adición de polvo de lodo como filler en el cemento no afectaría sustantivamente ambas propiedades.

Adicionalmente, se estudió la alternativa de incorporar lodo como sustituto del agua, con el objetivo de evaluar una opción más viable desde el punto de vista técnico y económico, y de más fácil aplicación en planta. Se elaboraron 3 hormigones con la misma dosificación base, realizando un hormigón de referencia sin lodo y dos hormigones con 40 y 50 % de sustitución en peso de lodo por el agua de amasado (considerando una relación a/c = 0,60 y que el lodo tiene un 90 % de humedad), y el uso de aditivo para mejorar la consistencia. Los materiales empleados para su fabricación fueron: lodo sin ningún tratamiento previo, cemento Portland Compuesto (CPC40), arena fina (Módulo de Finura 1,955), arena gruesa (Módulo de Finura 3,563), como agregado grueso se utilizó el gravillín de origen granítico (TMA = 6,35 mm), aditivo Viscocrete 6 y agua potable de la red de OSE. Para esos 3 hormigones se evaluó la consistencia del hormigón en estado fresco a través del asentamiento del tronco de cono de Abrams (UNIT-NM 67) y la resistencia a compresión del hormigón en estado endurecido a los 14 días de edad (UNIT-NM 101) de 3 probetas cilíndricas de 10 x 20 cm por cada hormigón elaborado.



En relación con la consistencia de los hormigones en estado fresco, la norma UNIT 1050 establece 4 clases de consistencia según el asentamiento del hormigón obtenido a partir del ensayo de tronco de cono (UNIT-NM 67): seca 0 - 2 cm  $\pm$  0 cm; plástica 3 - 5 cm  $\pm$  1 cm; blanda 6 - 9 cm  $\pm$  1 cm; fluida 10 - 15 cm  $\pm$  2 cm. Con el hormigón de referencia se obtuvo una consistencia fluida (asiento de 13 cm) sin uso de aditivo, mientras que para las mezclas con 50 y 40 % de lodo se debió utilizar aditivo superplastificante para alcanzar una consistencia de tipo plástica (asiento de 3,5 y 5 cm respectivamente).

Con respecto a los resultados de resistencia a compresión de los hormigones en estado endurecido, a los 14 días con el hormigón de referencia se obtuvo una resistencia promedio de 21,1 MPa, mientras que con 50 % y 40 % de lodo se obtuvieron resistencias promedio de 23,3 MPa y 25,4 MPa respectivamente. A los 28 días, con el hormigón de referencia se obtuvo una resistencia promedio de 24,8 MPa, mientras que con 50 % y 40 % de lodo se obtuvieron resistencias promedio de 26,9 MPa y 28,7 MPa respectivamente. Es decir que la resistencia de los hormigones con lodo y aditivo aumentó en relación con el hormigón de referencia, permitiendo observar que la adición de lodo en mezclas de hormigones presenta perspectivas positivas.

## EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE GESTIÓN

Se realizó una evaluación de distintas alternativas contempladas para la gestión del residuo generado en el proceso de potabilización para remoción de arsénico, aplicada a la planta potabilizadora de San Javier. A continuación se muestran las tres alternativas consideradas:

**A1: Disposición final.**- Desde el punto de vista del contenido y lixiviación de arsénico, el lodo deshidratado obtenido en San Javier cumple con los límites establecidos por el Decreto N° 182/013 para ser catalogado como Categoría II. Sin embargo, el parámetro ecotoxicidad no cumple con dicha categoría. A efectos del presente análisis comparativo se plantean dos escenarios: a) lodo asimilable a Categoría I en cuyo caso la disposición debería realizarse en el Sitio de Disposición Final de Residuos Sólidos Industriales, de la Cámara de Industrias del Uruguay (SDF-CIU), ubicado en Montevideo; b) lodo asimilable a Categoría II, en cuyo caso la disposición podría realizarse en el sitio de disposición final de la Intendencia departamental de Paysandú.

**A2: Estabilización y disposición final.**- Esta alternativa refiere a la disposición final, en vertedero o relleno sanitario, del residuo obtenido tras un tratamiento, el cual consiste en la estabilización con cemento del lodo deshidratado. A efectos del presente análisis comparativo se plantea como escenario que el lodo estabilizado pueda ser categorizado como un residuo Categoría II, en cuyo caso podría ser dispuesto en el vertedero municipal de Paysandú.

**A3: Valorización.**- La valorización implica la introducción del residuo como materia prima de un proceso productivo. En este caso, se evalúa la producción de adoquines de hormigón. La propuesta pretende lograr la valorización y la inertización conjunta del residuo.

Para evaluar las alternativas, se fijaron criterios técnicos, económicos y ambientales, considerando un horizonte hasta el año 2028. Se le otorgó una calificación al desempeño de cada alternativa para cada subcriterio, lo cual luego fue ponderado considerando un peso de los criterios económicos y ambientales del 40 % cada uno y un peso del criterio técnico del 20 %.

En el criterio técnico se analizaron los requerimientos de infraestructura y de operación que implica la ejecución de las distintas tareas a desarrollar desde la apertura de geotubos. Por un lado, se consideró el acondicionamiento del sitio necesario para el desarrollo de las distintas actividades involucradas y el acceso de vehículos del porte requerido. Por otra parte, se evaluaron las actividades de procesamiento primario, es decir toda actividad a ser realizada tras la generación del residuo hasta su transporte.

El criterio económico corresponde al Valor Actual Neto (VAN) de los costos de inversión y los costos operativos. Como costos de inversión se consideraron el acondicionamiento del sitio y la adquisición de equipos, mientras que en los costos de operación se consideraron la mano de obra, los materiales, la energía, el transporte y el vertido.

Bajo el criterio ambiental se evaluaron los riesgos o posibles impactos al ambiente y la salud que implica la ejecución de cada alternativa. Por un lado, se estimaron los riesgos asociados a las etapas de procesamiento y transporte. Influyen primordialmente las características del residuo en cada etapa, que determinan el grado del daño provocado ante el eventual suceso de accidentes o imprevistos, y el tiempo



que conlleva la realización de cada actividad. Por otro lado, cada alternativa trae asociado un posible impacto ambiental. Se consideraron principalmente las características del residuo y las del sitio de disposición final o las características del producto y su utilización, según el caso.

Se plantea el análisis multiobjetivo de las tres alternativas, con la aplicación de los criterios de evaluación definidos y determinando una ponderación por criterios y luego por subcriterios, según el grado de importancia de cada uno a la hora de la evaluación. Se estableció una escala de calificación del 1 al 5, adjudicando el valor 5 al mejor desempeño posible (excelente) y el valor 1 al peor (deficiente). En la Tabla 5 se presenta la matriz de comparación entre las alternativas.

**Tabla 5. Matriz de comparación de alternativas.**

<b>Criterio</b>	<b>P</b>	<b>A1a)</b>	<b>A1b)</b>	<b>A2</b>	<b>A3</b>
<b>Técnico</b>	20 %	92	92	60	28
Acondicionamiento del sitio	8	4	4	3	2
Actividades de procesamiento primario	12	5	5	3	1
<b>Económico</b>	40 %	80	200	120	40
Valor actual neto	40	2	5	3	1
<b>Ambiental</b>	40 %	140	120	160	160
Riesgos asociados a la operación y/o transporte	20	3	3	4	3
Impacto asociado a la disposición final/utilización	20	4	3	4	5
<b>Total</b>	<b>100 %</b>	<b>312</b>	<b>412</b>	<b>340</b>	<b>228</b>

Del procedimiento de evaluación realizado, surge que la alternativa que presenta el mejor desempeño en los criterios establecidos es la disposición final en el vertedero municipal de Paysandú (A1 b)). Dado que esta opción está sujeta a la confirmación de la viabilidad de considerar al lodo deshidratado como un residuo Categoría II, resulta interesante observar que la siguiente alternativa en orden de desempeño es la estabilización con cemento Portland del lodo deshidratado y su disposición final en el vertedero municipal de Paysandú (A2).

Si bien este resultado no es directamente extrapolable al caso de otras instalaciones que no sea la planta potabilizadora de OSE en San Javier, al considerarse especialmente las particularidades del caso, es probable que instalaciones similares presenten resultados semejantes.

Asimismo, se debe tener en cuenta que el proceso de evaluación no es exhaustivo. El alcance de los estudios realizados no permite la evaluación de todo el espectro de posibilidades, sino que sirve a base de guía para establecer lineamientos generales que luego pueden ser profundizados.

## CONCLUSIONES

En relación al arsénico, el contenido de este elemento en el lodo resulta inferior al límite establecido por el Decreto N° 182/013 para ser catalogado como residuo Categoría II. La lixiviación muestra variabilidad, siendo el valor máximo obtenido ligeramente inferior al límite de 1 mg As/L expresado en el Decreto. En consecuencia, y para la cantidad de muestras analizadas, el arsénico presente en el lodo no generaría inconvenientes desde el punto de vista de la clasificación del residuo.

El parámetro de mayor incertidumbre es la ecotoxicidad. Los resultados obtenidos no permiten catalogar al lodo deshidratado como un residuo Categoría II, ni se logra establecer una relación entre éste y otros parámetros de caracterización considerados.

Por otro lado, el porcentaje de humedad final obtenido en los geotubos de prueba resultó elevado, pero se considera que con una adecuada operación del sistema a escala real se obtendrán resultados adecuados de contenido final de humedad.

En cuanto a las alternativas de acondicionamiento del lodo, la estabilización con cemento Portland surge como una alternativa eficaz en el control de la lixiviación de arsénico. Incluso para proporciones bajas de cemento Portland, la eficiencia obtenida es alta: la lixiviación de arsénico representó un valor más de 60



veces menor que la del lodo sin estabilizar. Sin embargo, si bien se observa una mejoría en los resultados de ecotoxicidad, ésta no es suficiente.

En cuanto a los estudios de valorización, la adición de lodo en mezclas de morteros u hormigones presenta perspectivas positivas. Para asegurar la utilización del lodo en productos elaborados a base de cemento Portland es necesaria la realización de ensayos complementarios que permitan verificar la lixiviación de arsénico en los productos elaborados y que el lodo a incorporar no afecte la resistencia y durabilidad del material y/o producto a elaborar. Asimismo, es conveniente profundizar en la incorporación del lodo bruto, tal como se extrae del geotubo, siendo preciso encontrar dosificaciones adecuadas que permitan obtener las condiciones requeridas de consistencia, resistencia y durabilidad de la mezcla según el/los producto/s buscado/s, así como su viabilidad económica.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Akther, H., Cartledge, F. K., Amitava, R. (1997). Solidification/stabilization of arsenic salts: Effects of long cure times. *Journal of Hazardous Materials* 52 247-264.
2. Clancy, T. M., Snyder, K. V., Reddy, R., Lanzirrotti, A., Amrose, S. E., Raskin, L., Hayes, K. F. (2015). Evaluating the cement stabilization of arsenic-bearing iron wastes from drinking water treatment. *Journal of Hazardous Materials* 300 522–529.
3. Decreto Nº 182/013, del 27 de junio del año 2013, reglamentación del artículo 21 de la Ley 17.283 (Ley General de Protección del Medio Ambiente). Dirección Nacional de Impresiones y Publicaciones Oficiales, República Oriental del Uruguay. Diario Oficial Nº 28.744, del 27 de junio del año 2013, documentos 13 a 19.
4. Instituto Argentino de Normalización y Certificación (1994). Morteros para mampostería. Determinación de la consistencia. Método de escurrimiento. IRAM 1570.
5. Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (1951). Hormigón y áridos. Granulometría de agregados finos para hormigones. UNIT 82.
6. Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (1998). Hormigón. Determinación de la consistencia mediante el asentamiento del tronco de cono. UNIT-NM 67.
7. Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (1998). Hormigón. Ensayo de compresión de probetas cilíndricas. UNIT-NM 101.
8. Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (2005). Proyecto y ejecución de estructuras de hormigón en masa o armado. UNIT 1050.
9. Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (2009). Métodos de ensayo de cementos. Determinación de resistencias mecánicas. UNIT-ISO 679.
10. Maghalaes, M. C. F (2002). Arsenic. An environmental problem limited by solubility. *Pure Appl. Chem.*, Vol. 74, No. 10, pp. 1843–1850.
11. Normas Chilenas (2001). Morteros – Parte 1: Requisitos Generales. NCh 2256/1.
12. U.S. Environmental Protection Agency, Center For Remediation Technology and Tools (1996). Stabilization/solidification processes for mixed waste.
13. U.S. Environmental Protection Agency (1992). Method 1311. Toxicity Characteristic Leaching Procedure.