

VALORACIÓN DEL INTERÉS DEL ESPESAMIENTO DE RESIDUOS MINEROS COMO HERRAMIENTA DE MEJORA AMBIENTAL

Rocío Luiña Fernández

Francisco Ortega Fernández

Gemma Martínez Huerta

David Pecharomán Clemente

Universidad de Oviedo. Área de Proyectos

Abstract

Mining extraction by flotation generates huge amounts of liquid waste stored in large ponds. This is a reasonably safe, low cost storage which presents, however, a series of major issues. Firstly, it cannot recover all the water used in the process. In addition, tailing disposal involves a great environmental risk of dam failure, and water migration from the disposal site to water courses. Finally, this storage system does not prepare the mining for dismantling phase, requiring in the closing phase a major investment in pond drainage for subsequent repopulation.

Tailing thickening poses an alternative. The thickening up to concentrations of more than 65% of solids allows the improvement of water recovery, the reduction of storage site and facilitates the revegetation of deposit areas or mine refilling. It also removes the potential risk of dam failure.

The drawbacks come with the need for building specific installations, which involves a high cost and environmental impacts. It is convenient to assess the convenience of this treatment from an environmental perspective. This is only possible with a total Life Cycle Analysis of tailing treatments.

Keywords: *Mining; Life Cycle Assessment; Waste Management; Tailings, Thickened; Paste*

Resumen

En minería, la extracción por flotación genera enormes cantidades de residuos líquidos que se almacenan en grandes balsas. Este almacenamiento tiene un coste bajo y es razonablemente seguro, pero no consigue recuperar todo el agua utilizada en el proceso y su acumulación implica un gran riesgo ambiental ante la posibilidad de fallo de la presa, junto con posibles filtraciones a cursos de agua. Además, esta forma de almacenamiento no prepara la explotación para la fase de desmantelamiento, requiriéndose una gran inversión en drenaje de las balsas para una posterior repoblación.

El espesamiento de tailings hasta concentraciones superiores al 65% de sólidos se presenta como alternativa dado que permite mejorar la recuperación de agua, reducir el espacio de almacenamiento y facilita el revegetado de las zonas de depósito o bien utilizarlo como relleno de la mina. Además, desaparece el peligro potencial de fallo de la presa.

No obstante, requiere la construcción de instalaciones específicas e implica un consumo energético, lo que supone un coste económico y unos impactos ambientales. Es necesario evaluar la conveniencia de este tratamiento desde un punto de vista ambiental, siendo sólo posible con un análisis de la totalidad del ciclo de vida del tratamiento del residuo.

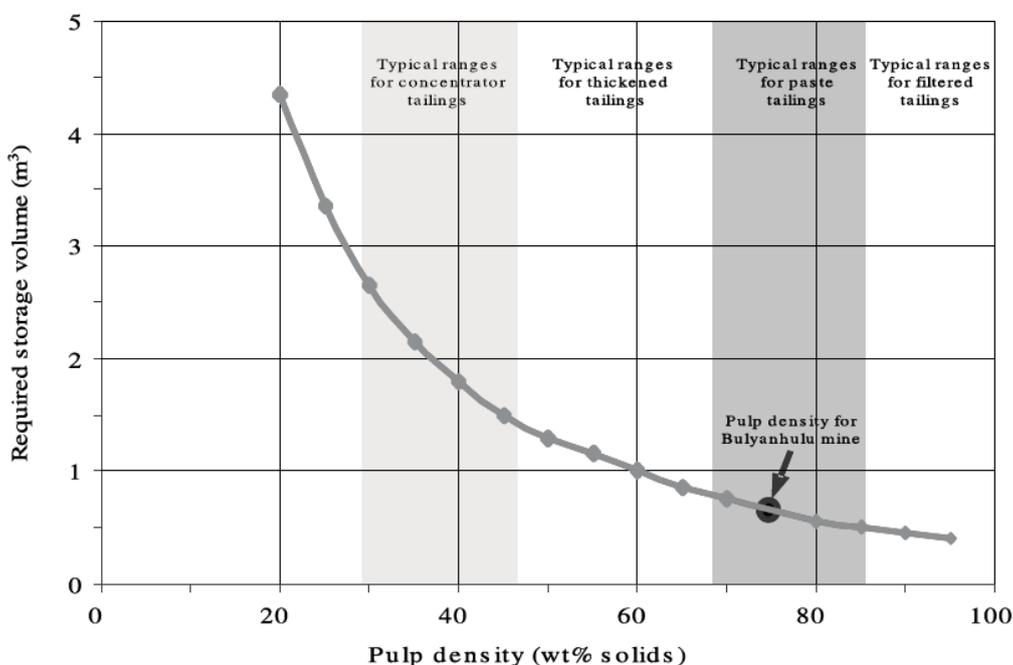
Palabras clave: Minería; Análisis de Ciclo de vida; Gestión de Residuos; Tailings, Espesado

1. Introducción

Los procesos de extracción de minerales suelen llevar asociados una etapa de flotación por espumas en que la ganga es separada de la mena por la acción un floculante añadido al agua. La flotación se ha convertido en el método de extracción más competitivo, ya que proporciona una buena separación ganga-mena, con un coste energético específico muy rentable. Sin embargo, este proceso eleva de manera considerable el consumo de agua, generando una cantidad importante de colas o *tailings* (Gurdeep, 2005).

Precisamente, el excesivo uso de agua en el proceso de flotación fue el impulsor de las tecnologías de *tailings* espesados y paste. Dicho espesamiento logra eliminar una parte importante del agua de los *tailings* mediante la técnica de separación gravimétrica en un tanque llamado espesador. Las partículas sólidas más densas, decantan de manera natural acumulándose en la parte inferior del tanque, lo que permite retirar una cantidad importante de agua por la parte superior.

Figura 1. Relación entre las necesidades de almacenamiento y la densidad del lodo (Martin et al. 2005)



Al igual que los *tailings* sin tratar, los *tailings* espesados se vierten a una balsa pero en este caso forman un suelo con una consistencia similar a un suelo arcilloso que reduce drásticamente la presión ejercida sobre el muro de contención. De esta forma se logra un

embalse más estable y de menores dimensiones y un importante ahorro de agua (Verburg, 2001) (Newman, White & Cadden).

2. Objetivo

Ante las importantes ventajas aparentes tanto desde el punto de vista ambiental como de seguridad que presenta la técnica de espesado de *tailings*, el objetivo es comprobar que dicha técnica supone una alternativa real sostenible, lo que se valorará mediante la metodología de Análisis de Ciclo de Vida.

En este estudio se presenta la evaluación de esta alternativa y se compara con el sistema tradicional de vertido de *tailings* sin espesar para determinar si realmente la técnica de espesado es rentable en términos ambientales.

3. Metodología utilizada

Para realizar este estudio se va a utilizar la metodología del Análisis del Ciclo de Vida (ACV), que es definida por la norma UNE-EN ISO 14.040 como: “una técnica para evaluar los aspectos medioambientales y los potenciales impactos asociados con un producto proceso, o actividad mediante: la recolección de un inventario de las entradas y salidas relevantes de un sistema; la evaluación de los potenciales impactos medioambientales asociados con esas entradas y salidas; y la interpretación de los resultados de las fases de análisis y evaluación de impacto de acuerdo con los objetivos del estudio” (AENOR 2006).

Como se deduce de la definición utilizada, el ACV es una herramienta que se puede emplear para evaluar las cargas de tipo ambiental asociadas a un producto teniendo en cuenta su ciclo completo. En este caso permitirá realizar una comparativa entre dos formas de gestionar los residuos de minería. Este enfoque comparativo permite aliviar además parte de los problemas derivados de la falta de información en etapas puntuales que quedará diluida por su aparición en ambos procesos.

Tras una revisión bibliográfica se ha comprobado que si bien existe una extensa experiencia en la aplicación de ACV en el campo de la minería, esta está restringida a la fase de extracción y a la fase industrial, olvidándose de evaluar precisamente los procesos de gestión de los residuos provocados en la obtención del mineral, así como la clausura de la explotación y todos los cuidados necesarios de vigilancia tras esta etapa final (Durucan, Korre & Munoz-Melendez, 2006).

Sin embargo, si existen varias referencias a la validez de esta herramienta para la toma de decisiones en pro de un uso sostenible de los recursos naturales y de una gestión óptima de los residuos generados en la minería (Kulczycka, 2008) (Reid et al., 2008) (Stewart & Petrie, 1999).

4. Definición del análisis a realizar

El Análisis de Ciclo de Vida comienza con la definición de los límites del sistema, la unidad funcional y las directrices para la selección de los datos.

En este caso se evaluarán dos escenarios diferentes de una mina de hierro a cielo abierto. El escenario 1 se corresponde con el vertido tradicional de *tailings* y el escenario 2 con el espesado de los *tailings* hasta una proporción del 70% antes de su deposición final. A pesar

de que una de las ventajas que presenta esta técnica es la posibilidad de relleno de la mina para su clausura, en este caso no se contemplará esta opción, ya que se evaluará como una mina a cielo abierto. En ambos casos se tendrán en cuenta las instalaciones necesarias y sus consumos energéticos.

Todos los procesos e instalaciones necesarios en la extracción del mineral quedan fuera de los límites del sistema por ser comunes a ambos escenarios. También se consideran fuera de los límites del sistema las instalaciones de suministro de energía.

Para hacer posible la comparación entre el escenario 1 y el escenario 2, se toma como Unidad Funcional 1.000 m³ de *tailings* a la salida de la mina, con una densidad de 1.157 kg/m³ y con un 20% en peso de sólidos.

Para realizar el inventario se han empleado principalmente datos bibliográficos y de fabricantes que han permitido modelizar todo el proceso, utilizando para ello la base de datos de Ecoinvent (Classen et al., 2009).

5. Inventario del Ciclo de Vida

Para los inventarios del ciclo de vida se toma como punto de partida un flujo de 4.323 m³/h de *tailings* de mineral de hierro con una concentración del 20% en peso. Estos *tailings* son residuos inertes y se acumulan durante toda la vida de la explotación que se considera de 20 años.

5.1. Escenario 1

Se corresponde con el escenario de referencia, en el que se estudia el impacto generado por el modo de tradicional de almacenamiento de los residuos de la minería extractiva.

El vertido de *tailings* o su deposición final en balsas, supone el segundo mayor impacto de las actividades mineras, aun tratándose de residuos no tóxicos como es el caso de la extracción de mineral de hierro.

Este escenario consta de una fase en la que el material residual procedente de la etapa de flotación para obtención del mineral, se bombea hasta el punto de descarga. Aunque si existen ejemplos de vertidos directos al río, hay recomendaciones expresas para que se cambie esta práctica adoptándose técnicas menos agresivas. Por lo tanto, en este caso se estudiará los impactos ambientales relacionados con la descarga y almacenamiento en embalse.

Los *tailings* han de ser bombeados hasta la balsa de almacenamiento situada a 10 km. de distancia de la instalación. Para ello se cuenta con una tubería de 80 cm de diámetro. Se considera una eficiencia en el bombeo del 70% Y un desnivel total de 50 metros. Se estima que se deberían utilizar invierten 450 kWh por cada 1.000 m³ transportados. Se ha considerado un flujo no newtoniano con flujo laminar. (Díaz & Hechavarría, 1999), durante la vida útil de 20 años a 7200 horas de funcionamiento al año (BOE, 2004).

Este volumen de *tailings* transportado durante 7.200 h al año y durante 20 años, tiempo de funcionamiento que se estima para la instalación, requiere una balsas con una extensión máxima de 8,64 m³

Normalmente, en este tipo de balsas los muros están contruidos con el propio relave, por crecidas sucesivas a base de tongadas y compactación. Las balsas de *tailings* no

espesados sufren un mayor empuje hidrostático por parte del fluido, por lo que los muros de las presas tienen que ser de mayor dimensión, requiriendo la impermeabilización del suelo de la balsa para evitar infiltraciones de lixiviados y aguas ácidas al subsuelo, tanto por razones ambientales como para evitar daños en la cimentación.

Para el Análisis de Ciclo de Vida se tiene en cuenta una vida útil de bombas y tuberías de 20 años y de 50 años para la balsa. Este último valor depende del tipo de clausura que se proyecte para la mina, ya que si no se drena para su posterior sellado y repoblación o rehabilitación, el terreno seguiría estando ocupado de forma indefinida (BOE, 2004).

5.2. Escenario 2

En este escenario se evalúa el tratamiento de las colas residuales mediante la técnica de espesamiento de *tailings*, que comienza, al igual que en el caso anterior, a la salida del tanque de flotación y se lleva a cabo en 4 etapas (Peck, 2007) (Jewel & Fourie, 2011).

La primera etapa consiste en el transporte los *tailings* hasta un tanque, espesador, donde comienza la segunda etapa. Este bombeo que se realiza a lo largo de 8 km de distancia salvando un desnivel de 50 m, supone un coste energético de 298 kWh por cada 1.000 m³. Se considera una velocidad de 2,4 m/s, un diámetro de tubería de 80 cm y una eficiencia de transporte del 70% (Wes Tech Engineering, 2011).

Una vez en el espesador, mediante la adición de un floculante se favorece la agregación de las partículas sólidas, formando aglomerados que decantan de forma natural, depositándose sobre el fondo del tanque. La elección del floculante depende fundamentalmente del tanto por ciento de sólidos inicial, de la concentración final deseada, del pH del proceso y del tiempo de residencia. El porcentaje de sólidos a la entrada suele ser del 20%, llegando a concentraciones de salida del 70%. Una vez transcurrido el tiempo de residencia, los *tailings* espesados se evacúa por el fondo y el agua limpia se extrae por la parte superior (Wesh Tech Engineering, 2011).

Existen varios tipos de espesadores, pero suele ser común un mecanismo de raquetas giratorias que favorecen la decantación y reducen el tiempo de residencia del relave en el tanque. Este sistema supone un consumo eléctrico de 12 kWh por cada 1.000 m³ de *tailing* a la entrada del tanque (Wes Tech Engineering, 2011). Para la instalación es necesario realizar una cimentación que supone la excavación de 6.725 m³ y 1.691 t de hormigón. El espesador se contabiliza como 124.356 kg de acero con una vida útil de 20 años.

La tercera etapa se refiere al bombeo de los *tailings* espesados hasta la balsa con una longitud de 3 km y con una diferencia de cota de 40 m, demandando 273 kWh por cada unidad funcional. Son necesarias 2 unidades de bombeo. Se considera una velocidad de transporte de 2,5 m/s, un diámetro de tubería de 25 cm y una eficiencia del 50 % (Weir Minerals, 2007).

La cuarta etapa consiste en la descarga del fluido en la balsa. Esta descarga está condicionada por el tipo de embalse seleccionado, escogiéndose el más conveniente en función de la orografía del terreno, del volumen total a depositar, de las condiciones climatológicas (pluviosidad, evapotranspiración y regímenes de vientos) y de la geología y sismicidad de la ubicación. Los embalses más típicos son los de cono, con descarga central y los de ladera con descarga aguas arriba, y con dique aguas abajo. Se consideran 16 kWh para la impulsión del paste en la balsa y 18 kWh para el bombeo de retorno del agua recuperada, siempre por unidad funcional.

Figura 2. Esquema de un Embalse de *Tailings* Espesados Tipo Ladera

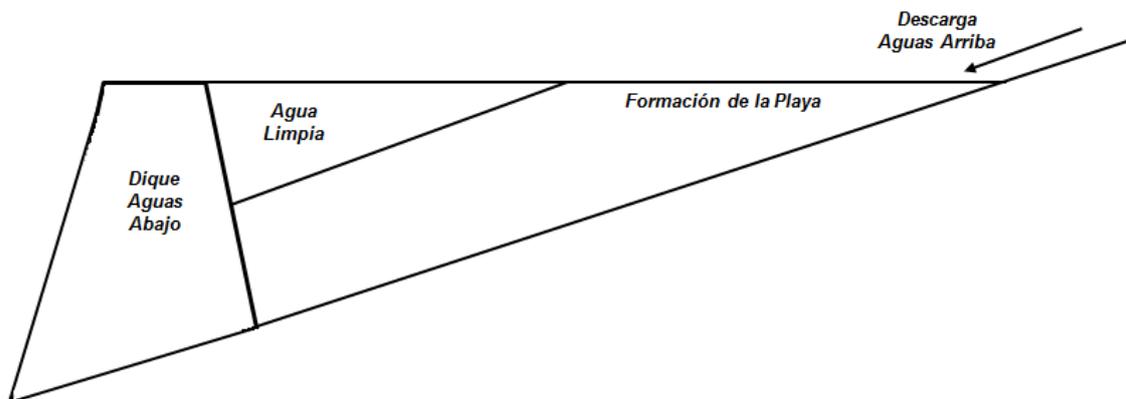
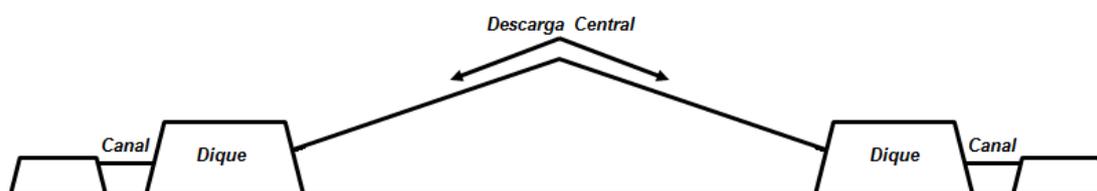


Figura 3. Esquema de un Embalse de *Tailings* Espesados Tipo Cono.



En este escenario se selecciona el embalse tipo cono, que a pesar de requerir la construcción de un canal perimetral de drenaje, presenta mayor estabilidad, ya que para evitar avalanchas de *tailings* la pendiente del cono se limita a sólo un 5% (Jewell & Fourie, 2006). La superficie final del embalse será de 3,68 millones de m². Al igual que en el escenario 1 se considerará una vida útil de 50 años (BOE, 2004), aunque en este caso se podría reducir a 25, ya que tras el cese de la actividad de la mina, es posible realizar una repoblación del terreno devolviéndole la categoría de suelo forestal.

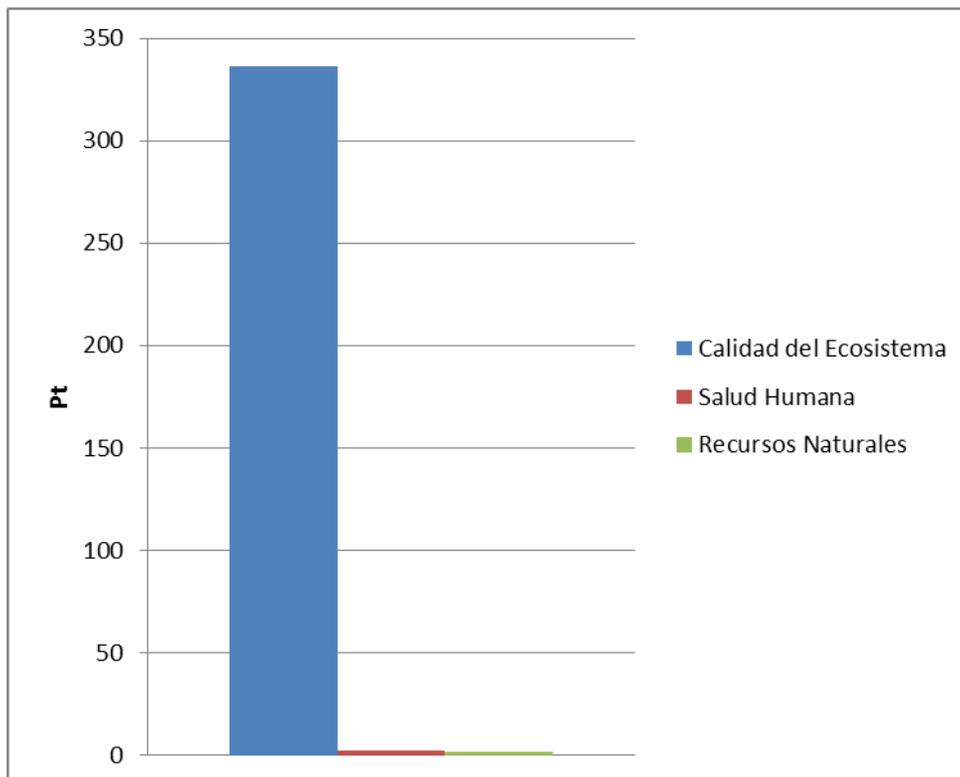
6. Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida

Para realizar la Evaluación del Impacto se ha seleccionado Eco-Indicador 99, método de valoración de puntos finales que permite agrupar en tres categorías de daño: daño a la salud humana medida en años de vida de incapacidad, daño a la Calidad del ecosistema expresados como el porcentaje de especies desaparecidas en un área concreta a causa de la carga medioambiental, y uso de recursos expresado como el incremento de energía necesario para compensar el incremento de dificultad en obtener los mismos recursos (Goedkoop, Effting, Collignon, 2009).

6.1. Evaluación del Impacto del escenario 1

En el análisis las categorías finales de daño de este escenario, se aprecia claramente el fuerte impacto que tiene el uso del suelo en la categoría final de calidad del ecosistema. Esta transformación y uso del suelo debido a la presa que se prolonga durante 50 años está fuertemente penalizado en Ecoindicador 99.

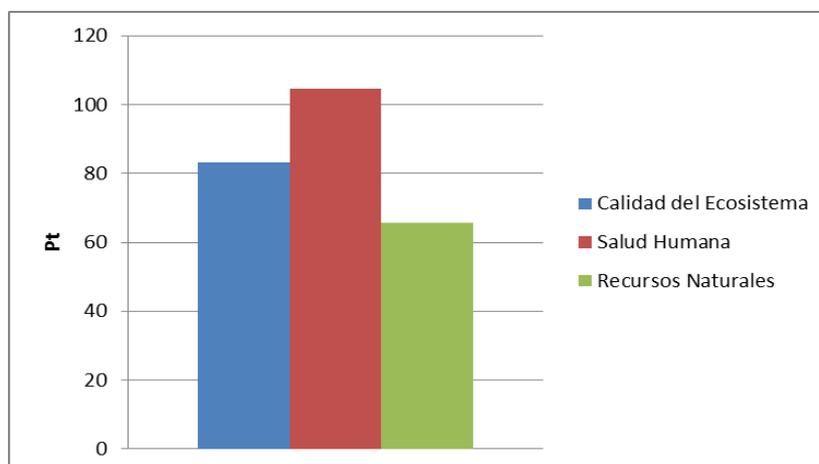
Figura 4. Evaluación del Impacto del escenario 1



6.2. Evaluación del Impacto del escenario 2

A diferencia del escenario 1, en el caso de la técnica del espesado de *tailings*, el impacto global se encuentra equilibrado entre las tres categorías finales de daño. Esto se debe al fuerte consumo eléctrico que es necesario para el impulso de los *tailings* espesados y que se traduce en una importante puntuación en la categoría de salud humana. El valor de la categoría de uso de los recursos también directamente relacionado con la demanda energética, ya que se ha estimado como fuente de electricidad un mix energético en el que están representadas las diferentes formas de obtención de energía, entre ellas las centrales térmicas. Además, el espesador utilizado en este escenario supone la demanda de recursos minerales, lo que contribuye a aumentar la puntuación de la categoría final de uso de recursos.

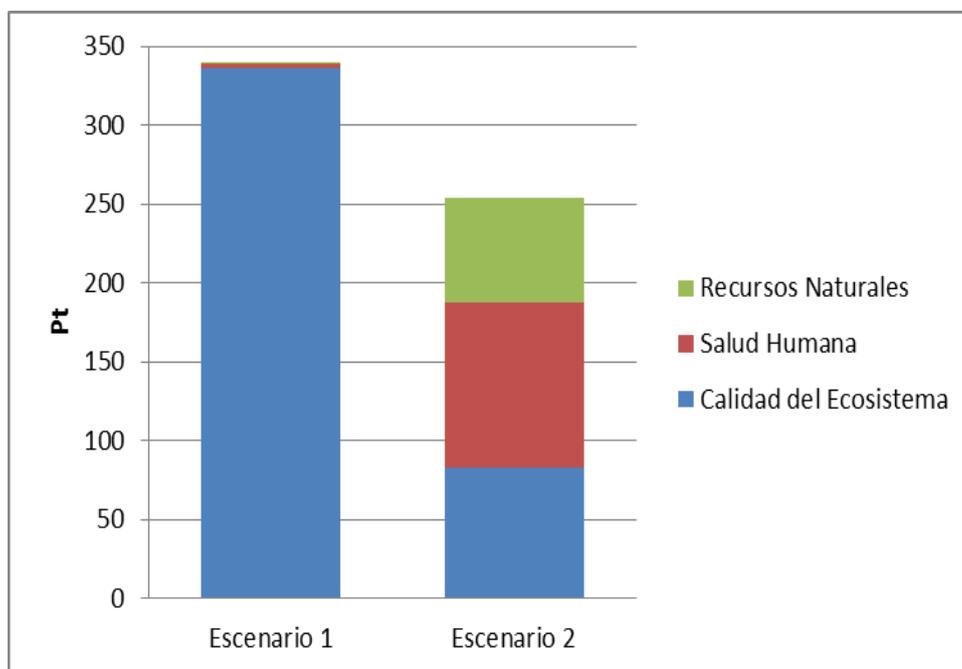
Figura 5. Evaluación del Impacto del escenario 2



6.3. Comparativa entre escenarios

La Figura 6 muestra el espesado de *tailings* como mejor solución ambiental, ya que su impacto global es significativamente menor. Sin embargo, cabe plantearse qué ocurriría en el caso de que se tratara de un entorno muy degradado, donde el terreno no tuviera ningún valor y donde no existiera escasez de agua (aunque en este caso, por utilizar EI99, no se está evaluado el ahorro de agua, si no que penaliza al espesado de *tailings* por requerir un bombeo de agua). Sería necesario modificar la ponderación de la categoría de uso de suelo, lo que disminuiría drásticamente el impacto de la categoría de calidad del ecosistema. Ante esa hipótesis, el escenario 2 saldría claramente peor para el medioambiente, ya que los beneficios otorgados por el menor tamaño del embalse y su posterior revegetación y la recirculación de agua hacia el proceso productivo no compensarían el gasto energético ni de materiales que agravan las categorías de salud humana y de calidad de recursos naturales (Gunson et al., 2012).

Figura 6. Comparación del impacto global de los escenarios 1 y 2



7. Conclusiones

Una vez analizados la evaluación de impacto ambiental de los dos escenarios se concluye que la técnica del espesado de *tailings* lleva a la minería extractiva a ser una actividad más sostenible, aun cuando requiera de una mayor demanda de energía y materiales (Franks et al., 2011).

Sólo en el caso en que el uso del suelo y la escasez de agua no fueran un problema, se vería penalizado el espesamiento de los *tailings*. Sin embargo, aún en esa circunstancia, el tradicional sistema de almacenamiento de *tailings* seguiría siendo desfavorable si se contemplara en el inventario del ciclo de vida el hecho de que un fallo en la presa tendría un impacto enorme. Este impacto sería mucho mayor en el caso de tratarse de residuos

mineros de pirita como ocurrió en Aznalcóllar o más recientemente, de aluminio, en Hungría. En el caso de que se produjera un fallo en el dique que retiene los *tailings* espesados, el riesgo de catástrofe sería mucho menor, ya que se espera que se comporte como un sólido. Además, su textura permite una rápida y sencilla revegetación, garantizando así un terreno estable (Böhm et al., 2005).

No obstante estos aspectos no son contemplados en la técnica de ACV, de modo que se puede concluir que para obtener una evaluación real de la sostenibilidad ambiental sería necesario utilizar simultáneamente las metodologías de Análisis de Ciclo de Vida y de Risk Assessment (Kizil & Muller, 2011).

8. Referencias

- AENOR (2006). ISO14040 Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Principios y Marco de referencia. ISO14044 Gestión Ambiental. Análisis del Ciclo de Vida. Requerimientos.
- Böhm, J., Debreczeni, A., Faitli, J., & Gombkötö, I. (2005). Tailings Management Facilities. Water Management and the Use of Thickened Tailings. Sustainable Improvement in Safety of Tailings Facilities TAILS SAFE. University of Miskolc, Faculty of Earth Science and Engineering.
- Boletín Oficial del Estado, BOE nº 189. (2004). Real Decreto 1777/2004, de 30 de Julio, por el que se aprueba el Reglamento del Impuesto sobre Sociedades. Anexo: División 1. Energía y agua. Agrupación 11, extracción, preparación y aglomeración de combustibles sólidos y coquerías.
- Classen, M., Althaus, H. J., Blaser, S., Doka, G., Jungbluth, N., & Tuchschnid, M. (2009). Life Cycle Inventories of Metals. Final report Ecoinvent Data v2.1 No.10. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH.
- Díaz, A.A., & Hechavarría, T.L. (1999). Selección de diámetro óptimo de tuberías para fluidos no newtonianos viscosos (tercera parte). Método generalizado. Régimen laminar. Tecnología química, vol. XIX, nº 2.
- Durucan, S., Korre, A., & Munoz-Melendez, G. (2006). Mining life cycle modelling: a cradle-to-gate approach to environmental management in the minerals industry. *Journal of Cleaner Production*, 14, 1057-1070.
- European Commission. Institute for Prospective Technological Studies, Sustainability in Industry, Energy and Transport. (2004). Reference Document in Best Available Techniques for Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities. 2009.
- Franks, D.M., Boger, D.V., Côté, C.M., & Mulligan, D.R. (2011). Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes. *Resources Policy*, 36, 114-122.
- Goedkoop, M., Effting, S., & Collignon, M. (2009). Anexo Eco-indicador'99. Método para evaluar el impacto ambiental a lo largo del Ciclo de Vida. Manual para diseñadores. PRé Consultants. IHOBE, Sociedad Pública Gestión Ambiental.
- Gunson, A.J., Klein, B., Veiga, M., & Dunbar, S. (2011). Reducing mine water requirements. *Journal of Cleaner Production*, 21, 71-82.
- Gurdeep, S. A. (2005). Newsletter of the ENVIS Centre on Environmental Problems of Mining Area. Minervis.

- Jewell, R., & Fourie, A. (2006). Above ground disposal. Australian centre for geomechanics (Ed.), Paste and thickened tailings - A guide.
- Jewell, R., & Fourie, A. (2011). Proceedings of the 14th International Seminar on Paste and Thickened Tailings. Paste 2011. Australian Centre for Geomechanics. (Jewel & Fourie, 2011)
- Kizil, M.S., & Muller, B. (2011). A Numerical Approach for Prefeasibility Analysis of Tailings Disposal Options.
- KSB Chile S.A. (2008). Catálogo general de bombas y válvulas.
- Kulczycka, J. (2008). LCA for Minimisation of environmental Impact of Wastes from Zinc and Lead Industry. Polish Academy of Sciences, Mineral and Energy Economy Research Institute, Poland.
- Martin V., McMullen J., Aubertin M., 2005 – Les résidus en pâte et la déposition en surface des rejets de concentrateur. In: Proceedings of the 2nd International Symposium on Mining and the Environment, Rouyn-Noranda, Quebec, Canada, pp. 56–71.
- Newman, P., White, R., & Cadden, A. Paste - The future of Tailings Disposal?. Golder Associates (UK) Ltd., England.
- Peck, P. (2007). Avoiding Tailings Dam Failures. Good Practice in Prevention. Lund University.
- Reid, C., Bécaert, V., Aubertin, M., Rosenbaum, R.K., & Deschênes, L. (2008). Life cycle assessment of mine tailings management in Canada. Journal of Cleaner Production, 17, 471-479.
- Stewart, M., & Petrie, J. (1999). Planning for waste management and disposal in minerals processing using life cycle assessment. Minerals & Energy - Raw Materials Report, Volume 14, Issue 4.
- Verburg, R. (2001). Use of Paste technology for tailings disposal: potential environmental benefits and requirements for geochemical characterization. IMWA Symposium.
- Weir Minerals North America-Hazleton. (2007). Centrifugal slurry pumps. Slurry equipment solutions.
- Wes Tech Engineering, Inc. (2011). Equipment: Item A, One (1) 40 m dia x 8 m sidewall hidensity paste thickener; Item B, One (1) 40 m dia anchor channel tank.

Correspondencia (Para más información contacte con):

Francisco Ortega Fernández
Área de Proyectos. Universidad de Oviedo
Oviedo
E-mail: fran@api.uniovi.es