

## INDICADORES DE SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL PARA LA INDUSTRIA METALÚRGICA DEL COBRE PRIMARIO EN CHILE. UNA PROPUESTA BASADA EN ESTUDIOS ACV

Amín Nazer Varela

*Universidad de Atacama (Chile)*

María José Bastante-Ceca

Bélgica Pacheco-Blanco

Salvador Capuz Rizo

*Universidad Politécnica de Valencia. Departamento de Proyectos de Ingeniería*

### Abstract

One way to measure the environmental performance of an organization is through the use of indicators for environmental sustainability (IES). The IES provide an important source of information that may help to those responsible for decision-making process and project managers, to take the more convenient decision. In addition, the methodology of Life Cycle Assessment (LCA) determines the potential environmental impacts of a process, product or service throughout its life cycle. However, Lundin and Morrison argue that LCA has the disadvantage of being very time-consuming and complex; therefore, they propose an iterative procedure for select IES from the LCA results and from case studies. According to this model, this paper presents a proposal of IES addressed to the primary copper industry at Chile.

**Keywords:** *Environmental management, sustainability indicators, life cycle assessment, smelting, copper cathode.*

### Resumen

Una forma de medir el desempeño medioambiental de una organización es a través del uso de indicadores de sostenibilidad ambiental (ISA). Los ISA proporcionan una importante fuente de información que podrá ayudar en la toma de decisiones a los responsables políticos y a las gerencias de proyectos. Por otra parte, la metodología del Análisis del Ciclo de Vida (ACV) determina los impactos ambientales potenciales de un proceso, producto o servicio durante todo su ciclo de vida. Sin embargo, Lundin y Morrison sostienen que el ACV tiene el inconveniente de ser muy demoroso y complejo, por lo cual proponen un procedimiento iterativo para seleccionar ISA a partir de los resultados de ACV y del estudio de casos. Siguiendo ese modelo, en esta ponencia se presenta una propuesta de ISA dirigida a la industria productora de cobre primario en Chile.

**Palabras clave:** *Gestión ambiental, indicadores de sostenibilidad, análisis del ciclo de vida, fundiciones, cátodos de cobre*

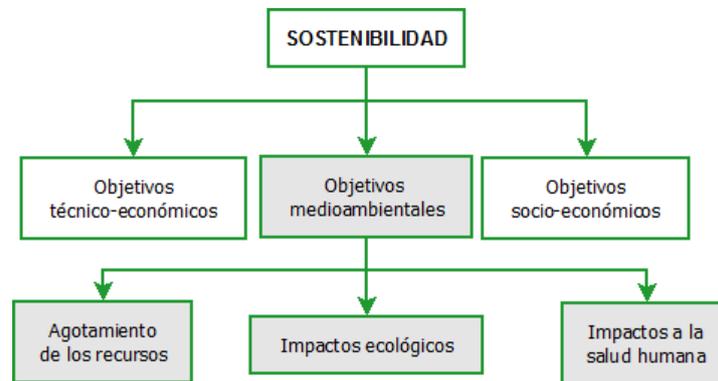
## 1. Introducción

El cobre es un material muy demandado por la industria actual. Se emplea en construcción, en electricidad, electrónica y en otros sectores tan diversos como la computación o la medicina. Dentro del ciclo de vida del cátodo de cobre, que se inicia con la extracción del mineral en el yacimiento y termina con la producción de cátodos de cobre metálico de alta pureza en la refinería, se requiere del consumo de materiales, energía y la intervención de los recursos humanos dentro del marco regulatorio propio para el sector y lugar geográfico en donde se realiza la producción. Para obtener el cobre en cátodos, se emplean diferentes procesos metalúrgicos que dependerán si el mineral de cobre está presente como óxido o sulfuro de cobre. Los procesos más usuales empleados en Chile son el hidrometalúrgico, el pirometalúrgico y el biohidrometalúrgico. El proceso pirometalúrgico, se basa en procedimientos de fundición y refinación de cobre, obteniéndose cátodos de 99,99 % de pureza como valor promedio. Las fundiciones son productoras de cobre blíster y ánodos de cobre, los que contienen impurezas que deberán ser extraídas en la refinería.

El cobre es, y ha sido por muchas décadas, la base de la economía chilena. Como toda actividad productiva, el sector metalúrgico también causa impactos medioambientales, sociales y económicos a nivel local, regional o global. El impacto medioambiental en los procesos pirometalúrgicos, se debe a las operaciones de las unidades productivas que logran separar el cobre de otros elementos químicos tan dañinos para la salud como el arsénico y el azufre. Estos elementos químicos son altamente contaminantes y fueron, hasta hace una década, emitidos libremente al aire en estado gaseoso, pero hoy en día las fundiciones deben cumplir con regulaciones ambientales que establecen límites a esos gases. Para dar cumplimiento a estas regulaciones de calidad ambiental, las fundiciones poseen instalaciones auxiliares que permiten recuperar el arsénico en la forma de arsenito de calcio (Valenzuela et al. 2001) y el azufre como ácido sulfúrico. Existen muchas metodologías que han sido probadas eficientemente en la evaluación de las interrelaciones entre los sistemas industriales de la producción, el producto y el medio ambiente. Citando algunas de ellas, se encuentran las siguientes: Sistema de Gestión Ambiental (SGA), Producción Más Limpia (PML), Análisis del Ciclo de Vida (ACV), Diseño del Ciclo de Vida (DCV), Contabilidad de Costos Ambientales (CCA), Evaluación del Desempeño Ambiental (EDA), Informe Ambiental (IA), Gestión de la Cadena de Proveedores Verdes (CPV) (Neto 2007; Norgate et al. 2007). En el sector metalúrgico del cobre es posible emplear el método Análisis de Ciclo de Vida (ACV) (AENOR 2006), desde la cuna a la tumba (Ayres et al. 2003). Sin embargo, también se han fijado los límites del sistema objeto del estudio, desde la cuna a la puerta, o de la entrada a la puerta a la salida de la puerta o de la puerta a la tumba (Norgate & Haque 2009; Norgate 2001).

Por otra parte, muchas organizaciones del sector minero y de metales, con el propósito de poder evaluar su desempeño ambiental, han tomado la decisión de incorporar acciones que apunten a la sostenibilidad. La sostenibilidad es un concepto asociado a la productividad y el medio ambiente, tendiente a aumentar los niveles de vida y se ha considerado como la redistribución "justa" del uso de los recursos naturales (Ciegis et al. 2009). En una concepción general, relaciona los objetivos del desarrollo económico, la calidad ambiental y de la equidad social de la población (Rogers et al. 2007), o "triple cuenta de resultados" (GRI 2006). Es posible medir la sostenibilidad mediante el uso de indicadores de sostenibilidad (IDS) (Rogers et al. 2007; McLellan et al. 2009; CEPAL 2001; Bastante 2006). Los indicadores son medidas de los impactos o efectos causados por la organización (AENOR 2008) y también apuntan a una medida cuantitativa, cualitativa o descriptiva, siendo sus principales funciones la cuantificación, la simplificación y la comunicación (ISO 2006) de aspectos económicos, sociales y ambientales. En la Figura 1 se destacan los objetivos de la sostenibilidad y algunas categorías de impacto medioambiental.

**Figura 1: Jerarquización de la sostenibilidad con enfoque en el medio ambiente.** (Petrie et al. 2007).



Los IDS proporcionan una importante fuente de información para los responsables políticos ayudándoles en la toma de decisiones, así como de su seguimiento y evaluación, tanto de la entidad corporativa (OECD 1999), como también de una unidad de proceso, fábrica o empresa de explotación (Petrie et al. 2007). Han surgido iniciativas de investigadores e instituciones internacionales, que orientan sus esfuerzos a la sostenibilidad en la minería y la producción de metales (Azapagic 2004; AENOR 2008; Worrall et al. 2009; IIED 2010; GRI 2006). A esta fecha<sup>1</sup>, la *Global Reporting Initiative* (GRI) continúa trabajando en la actualización de indicadores para la minería y metales (GRI 2010). Actualmente, las empresas mineras de cobre en Chile, sean éstas transnacionales o estatales, están entregando informes públicos de sostenibilidad de acuerdo a las recomendaciones del GRI.

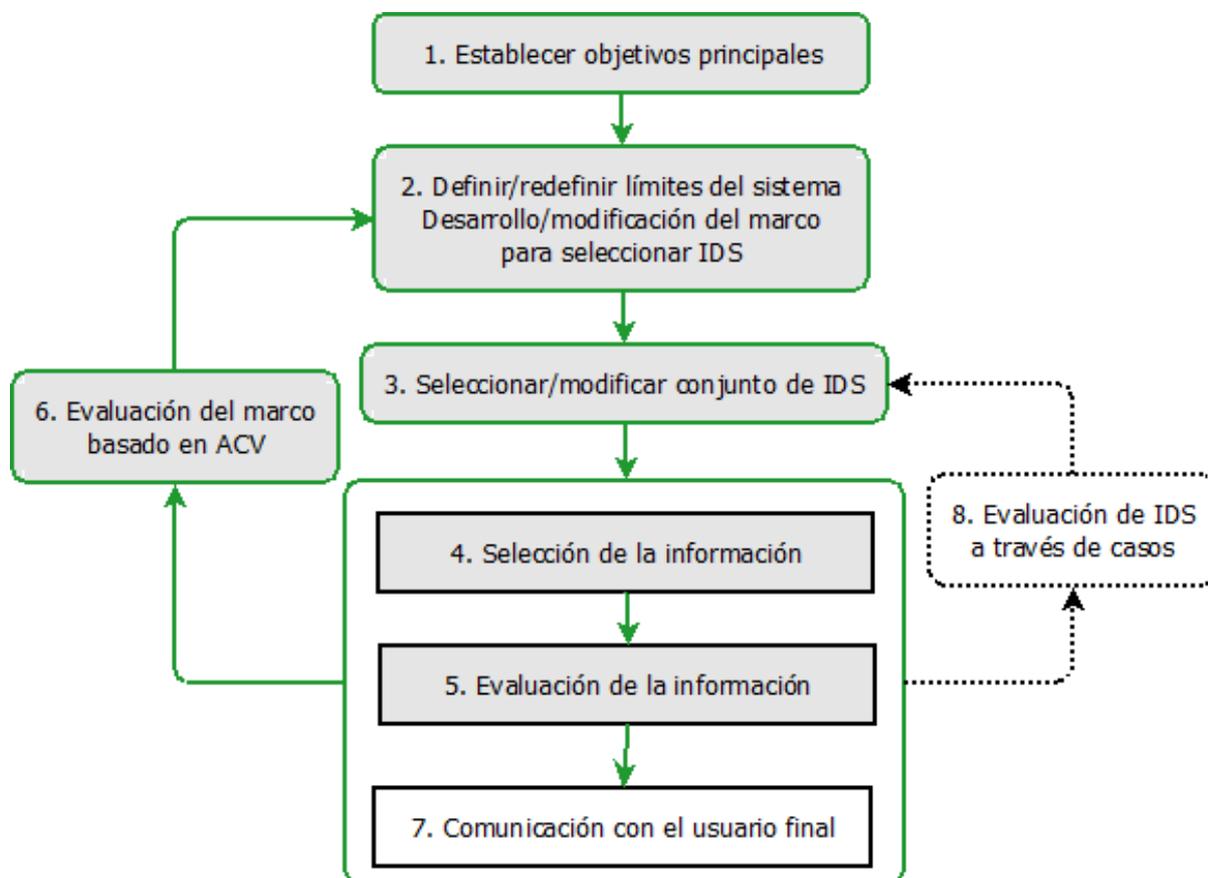
Es posible determinar los IDS a partir de estudios de ACV. Lundin y Morrison (2002) sostienen que el Análisis de Ciclo de Vida permite evaluar los impactos ambientales de un producto, proceso o servicio, pero tiene el inconveniente de ser muy lento y complejo. Por ello, han desarrollado un procedimiento iterativo para la selección de IDS ambientales, a partir de los resultados de ACV existentes y verificando los resultados con estudio de casos. Estos autores, obtuvieron los IDS aplicando el modelo a dos plantas de abastecimiento de agua potable y tratamiento de aguas residuales urbanas. Siguiendo esa propuesta, en este trabajo se desarrolla el modelo y se proponen los ISA de la industria pirometalúrgica del cobre primario en Chile, considerando tan sólo los estudios de Análisis de Ciclo de Vida del cátodo de cobre disponibles en la literatura científica.

## 2. Metodología

Para el estudio y propuesta de ISA aplicables a las refinerías de cobre chilena, se adoptó el modelo propuesto por los investigadores Lundin y Morrison (2002). El primer paso consistió en fijar el objetivo principal. En este caso correspondió a la determinación de los principales ISA de la producción de cátodos de cobre. El procedimiento general se muestra en la Figura 2.

<sup>1</sup> Enero de 2010.

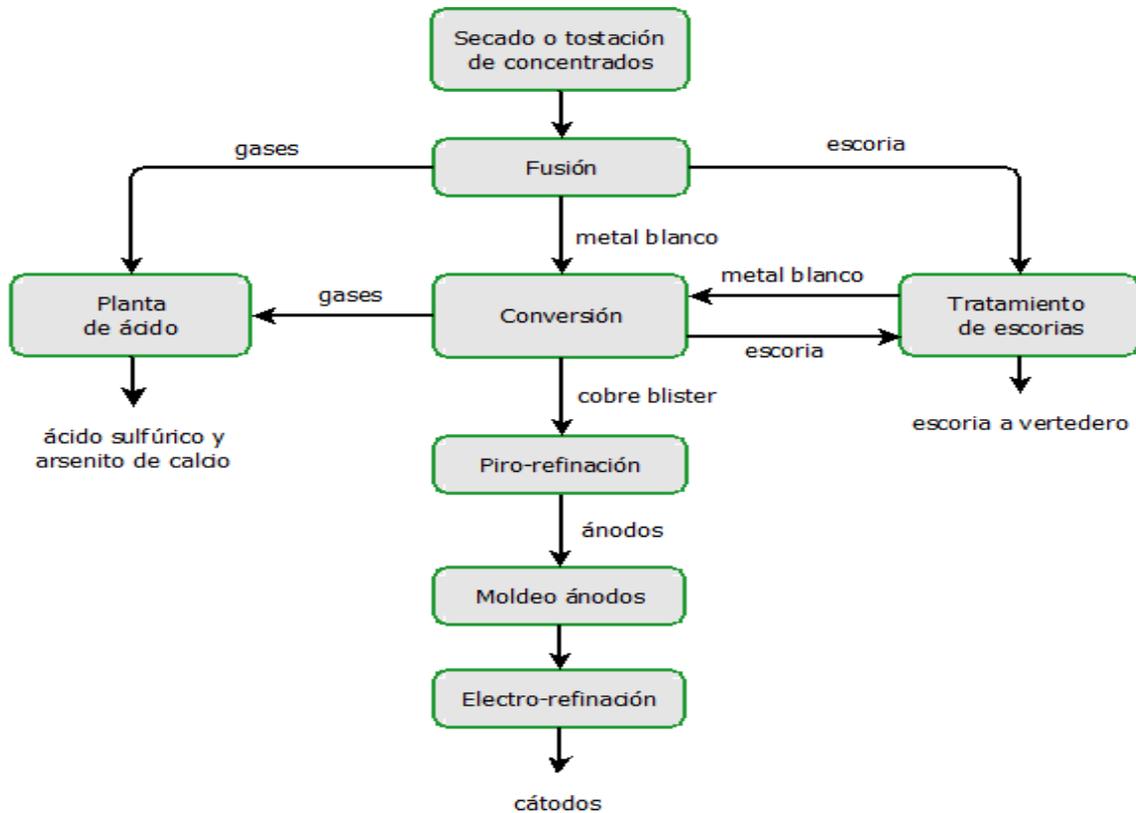
Figura 2: Diagrama de flujo del procedimiento empleado en la evaluación de sostenibilidad ambiental. (Lundin & Morrison 2002).



El segundo paso consistió en definir los límites del sistema a estudiar. En la Figura 3 se muestra el ciclo de vida clásico de la producción de cátodos de cobre desde la entrada a la puerta hasta la salida de la puerta, esto es, desde que el concentrado mineral en polvo ingresa a la planta, hasta que se obtiene el cátodo de cobre. Los límites del sistema lo constituyen las etapas de producción identificándose las siguientes: secado o tostación de concentrados minerales, fusión, conversión, piro-refinación, moldeo y electro-refinación. En Chile operan seis fundiciones de cobre, dos de las cuales son además refinerías. Las dos fundiciones/refinerías de cobre chilenas<sup>2</sup>, Potrerillos y Ventanas, son estatales y tienen implementado un proceso continuo, lo que permite aprovechar la energía generada en cada una de las unidades de producción, al recircular los gases calientes. Uno de los coproductos son los barros anódicos que se obtienen tras la electro-refinación y deben ser sometidos a un proceso físico-químico para separar los valiosos elementos metálicos contenidos (plata, oro, platino y paladio entre otros). Además, en las etapas de fusión, conversión y piro-refinación, se obtiene ácido sulfúrico, arsenito de calcio y escorias de cobre. Los dos últimos son confinados en vertederos autorizados. Se hace notar que Potrerillos se sitúa geográficamente en una zona desértica y aislada, por lo que por una parte, se afecta al recurso agua que es escaso, y por otra, en una escala local, las emisiones directas afectan principalmente a los trabajadores de esas unidades productivas.

<sup>2</sup> A esta fecha, la fundición y refinería Chuquicamata no está en operación debido a razones de rentabilidad.

Figura 3. Límites del sistema para el proceso de producción pirometalúrgica de cobre.



En la Figura 4 se resumen las principales unidades de producción de las dos refineries de cátodos de cobre chilena y las instalaciones auxiliares que cumplen propósitos de purificación de metales fundidos, recuperación de gases y polvo.

Figura 4. Principales etapas del proceso de producción de cátodos de cobre en refineries chilenas.

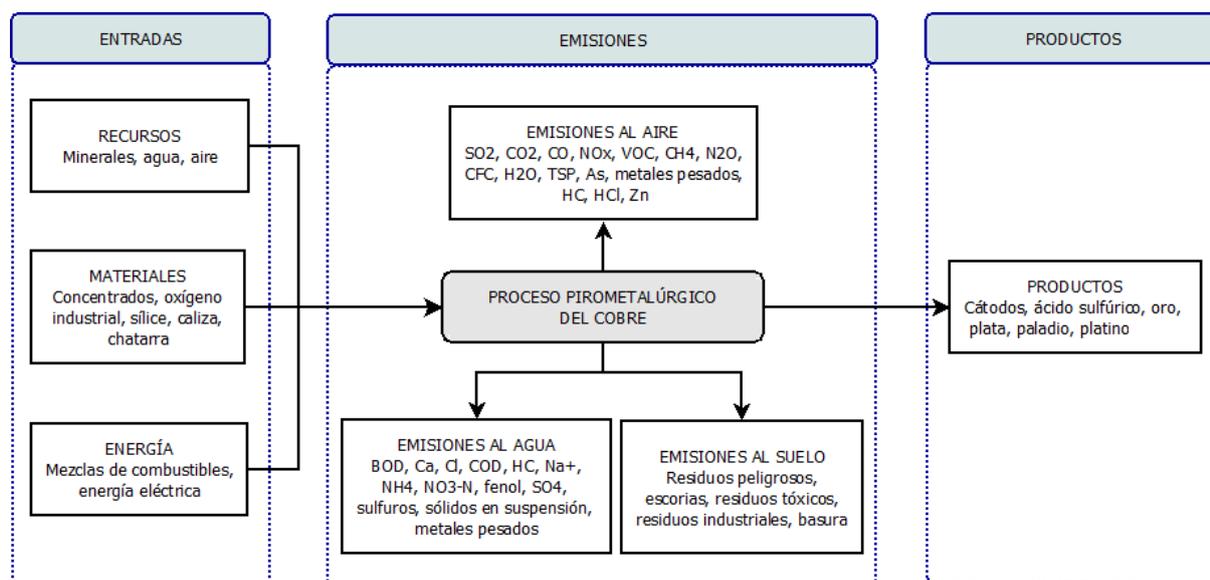
Refinería	Etapas Principales						
	Secado	Fusión	Conversión	Refinación	Moldeo	Electro-refinación	Instalaciones Auxiliares
POTRERILLOS	Lecho fluidizado	CT	CPS (3)	HA (2)	RM	ER	HLE (2) PA PO
VENTANAS	Rotatorio	CT	CPS (3)	HR (2)	RM	ER	HELE (2) PA PO

CT=Convertidor Teniente; CPS=Convertidor Peirce Smith; HF= Horno Flash; HLE=Horno de limpieza de escoria; HELE=Horno eléctrico de limpieza de escoria; HR=Horno de refino; HA=Horno de ánodos; PA=Planta de ácido; PO=Planta de oxígeno.  
(n) representa la cantidad de unidades de producción idénticas.

Si siguiendo el procedimiento, el tercer paso fue la selección de un marco. Un marco a menudo representa una estructura útil para identificar y elegir los principales IDS referidos a los objetivos planteados. El marco del ACV se ha empleado en estudios de impactos ambientales en la minería y la producción de metales (Norgate 2001). En este trabajo se

eligió el ACV que, de acuerdo a los resultados de impactos ambientales potenciales propuestos en las publicaciones científicas, permitió definir un conjunto de ISA en el sector metalúrgico, considerando como unidad funcional la producción de un kilogramo de cátodo de cobre. La elección de los principales ISA de las refinерías de cobre chilenas, se hizo primeramente considerando las entradas y salidas de cada unidad de operación y posteriormente se establecieron los impactos ambientales potenciales del sistema productivo. La Figura 5 muestra una matriz general de entradas y salidas del sistema. Luego de recopilar la información de los ISA disponibles en artículos de divulgación científica, éstos se agruparon para su posterior análisis, de tal manera que se clasificaron y se incorporaron nuevos ISA para el caso particular chileno.

Figura 5. Flujo de entradas y salidas del proceso pirometalúrgico del cobre.



### 3. Resultados

El conjunto de ISA seleccionados es mostrado en la Tabla 1.

Tabla 1: Indicadores de Sostenibilidad Ambiental para sector metalúrgico del cobre.

ISA						
Atmósfera	Suelo	Agua	Tecnosfera	Unidad	Límites	Referencias
Emisiones fugitivas de SO <sub>2</sub>				ton	Fusión-conversión	(Ulloa 2002)
Emisiones fugitivas de As				ton	Fusión-conversión	(Ulloa 2002)
Emisiones de CO <sub>2</sub>				ton-eq CO <sub>2</sub>	Fusión-conversión	(van Berkel 2000; Nazer et al. 2009)
	Vertido de			m <sup>3</sup>		(Nazer et al. 2009)

escoria	Contenido de As y S en concentrados	%	Concentradora	(Ulloa 2002)
	Energía de combustibles fósiles	TJ	Horno piro-refinación/planta de ácido/instalaciones planta	(van Berkel 2000; Norgate et al. 2007)
	Electricidad	TJ	Secador/Horno Tratamiento Escoria	(Norgate 2001)
Uso de suelo		m <sup>2</sup>	Instalaciones industriales	(Yellishetty et al. 2009)
<b>ISA Adicionales Propuestos</b>				
	Total de agua fresca	m <sup>3</sup>	Sistemas enfriamiento gases/electro-refinación	
	Energía recuperada	TJ	Circuito de recuperación gases calientes	
	Total agua reciclada	m <sup>3</sup>	Secador/electro-refinación/instalaciones planta	
Niveles de ruido		db	Todas la etapas	
Emisiones de material particulado		PM <sub>2,5</sub>	Fusión/conversión	
Derrame Metales pesados		kg	Electro-refinación/transporte	
	Tratamiento de aguas industriales	m <sup>3</sup>	Electro-refinación/planta de ácido/planta tratamiento de gases	

## Conclusiones

Los indicadores de sostenibilidad revelan sin dudas, una importante información del estado del desempeño ambiental de una organización industrial. El análisis de los estudios de ACV referidos a producción de cobre pirometalúrgico existentes, son escasos a nivel internacional y particularmente casi inexistentes para la producción de cátodos en Chile, por lo que la metodología desarrollada, pensamos que es aplicable en aquel caso en que se cuenta con una gran cantidad de informes de ACV. Los ISA propuestos dejan a la luz una buena posibilidad de verificación y desarrollo de estudios futuros tanto en ACV como de ISA de la producción de cobre primario en Chile.

## Referencias

- AENOR, 2008. Norma UNE 22470. Indicadores de gestión minera sostenible.
- AENOR, 2006. Norma UNE-EN-ISO 14040:2006.
- Ayres, U., Ayres, R. & Råde, I., 2003. *The Life Cycle of Copper, Its Co-Products and Byproducts*, Springer.
- Azapagic, A., 2004. Developing a framework for sustainable development indicators for the mining and minerals industry. *Journal of Cleaner Production*, 12(6), 639-662. Available at:  
<http://ejournals.ebsco.com/direct.asp?ArticleID=1K0BQMAYUWMRGETDN5KP>.
- Bastante, M.J., 2006. *Propuesta metodológica para la cuantificación de la ecoeficiencia de los productos industriales a partir de la evaluación del valor funcional y de los impactos económico y ambiental*. Tesis Doctoral. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- van Berkel, R., 2000. Life Cycle Assessment for environmental improvement of mineral's production. En *Environmental Workshop- Mineral Council of Australia*. Perth WA, Australia, pág. 14. Available at:  
[http://web.archive.org/web/20080718214949/http://c4cs.curtin.edu.au/resources/publications/2000/lca\\_minerals.pdf](http://web.archive.org/web/20080718214949/http://c4cs.curtin.edu.au/resources/publications/2000/lca_minerals.pdf) [Accedido Febrero 18, 2010].
- CEPAL, 2001. Informe del Seminario Indicadores de Desarrollo Sostenible en América Latina y el Caribe. Available at:  
[http://www.un.org/esa/sustdev/natlinfo/indicators/eclac2001sp\\_indicators.pdf](http://www.un.org/esa/sustdev/natlinfo/indicators/eclac2001sp_indicators.pdf).
- Ciegis, R., Ramanauskiene, J. & Startiene, G., 2009. Theoretical Reasoning of the Use of Indicators and Indices for Sustainable Development Assessment. *Engineering Economics*, (3), 33-40. Available at:  
<http://www.ktu.lt/lt/mokslas/zurnalai/inzeko/63/1392-2758-2009-3-63-33.pdf>.
- GRI, 2010. GRI Portal - Mining & Metals. *GRI Portal - Mining & Metals*. Available at:  
<http://www.globalreporting.org/ReportingFramework/SectorSupplements/MiningAndMetals/MiningAndMetals.htm> [Accedido Noviembre 5, 2009].
- GRI, 2006. Guía para la elaboración de Memorias de Sostenibilidad, Global Reporting Initiative. Available at: [www.globalreporting.org](http://www.globalreporting.org).
- IIED, 2010. Mining, Minerals and Sustainable Development | Sustainable Markets | International Institute for Environment and Development. *MMSD*. Available at:  
<http://www.iied.org/sustainable-markets/key-issues/business-and-sustainable-development/mining-minerals-and-sustainable-development> [Accedido Enero 12, 2010].
- ISO, 2006. ISO/TS 21929-1:2006 Sustainability in building construction -- Sustainability indicators -- Part 1: Framework for development of indicators for buildings.
- Lundin, M. & Morrison, G.M., 2002. A life cycle assessment based procedure for development of environmental sustainability indicators for urban water systems. *Urban Water*, 4(2), 145-152. Available at:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VR2-45F9420-6/2/29b0b03ad3a47a0c903c1317c1a8f3f3>.
- McLellan, B. et al., 2009. Incorporating sustainable development in the design of mineral processing operations - Review and analysis of current approaches. *Journal of Cleaner*

- Production*, 17(16), 1414-1425. Available at:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VFX-4WHFD48-2/2/33b90fa5c76c7201e35c38acf536ef7a>.
- Nazer, A. et al., 2009. Evaluación del impacto ambiental de la producción de cátodos de cobre en Chile, período 2006-2007. En *13th International Congress on Project Engineering*. Badajoz, España.
- Neto, B., 2007. *MIKADO: a Decision Support Tool for Pollution Reduction in Aluminium Pressure Die Casting*. Tesis Doctoral. Wageningen Universiteit.
- Norgate, T., 2001. A comparative Life Cycle Assessment of copper production processes. Available at: [www.intec.com.au](http://www.intec.com.au) [Accedido Enero 9, 2010].
- Norgate, T. & Haque, N., 2009. Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. *Journal of Cleaner Production*, In Press, Corrected Proof. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VFX-4XC57FK-1/2/5ce627ba09716f8354d723a61ea97baa>.
- Norgate, T., Jahanshahi, S. & Rankin, W., 2007. Assessing the environmental impact of metal production processes. *Journal of Cleaner Production*, 15(8-9), 838-848. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VFX-4KXDR3H-1/2/bfe4af3586262e397cf69a97f80f0488>.
- OECD, 1999. Los indicadores ambientales para la agricultura: Volumen 1 conceptos y marcos de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo.
- Petrie, J., Cohen, B. & Stewart, M., 2007. Decision support frameworks and metrics for sustainable development of minerals and metals. *Clean Techn Environ Policy*, (9), 133-145.
- Rogers, P.P., Jalal, K.F. & Boyd, J.A., 2007. *An Introduction to Sustainable Development* illustrated edition., Earthscan Publications Ltd.
- Ulloa, P., 2002. Un nuevo concepto en el análisis de procesos metalúrgicos: evaluación de su interacción con el medio ambiente.
- Valenzuela, A., Fytas, K. & Sánchez, M., 2001. Manejo del arsénico en fundiciones de cobre. *Medioambiente Online*. Available at:  
[http://www.medioambienteonline.com/site/root/resources/technology/clone\\_506.html](http://www.medioambienteonline.com/site/root/resources/technology/clone_506.html)  
[Accedido Enero 9, 2010].
- Worrall, R. et al., 2009. Towards a sustainability criteria and indicators framework for legacy mine land. *Journal of Cleaner Production*, 17(16), 1426-1434. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VFX-4W8VW0M-1/2/88f457033dbb91bc769af7646636270d>.
- Yellishetty, M. et al., 2009. Life cycle assessment in the minerals and metals sector: a critical review of selected issues and challenges. *Int J Life Cycle Assess*, 257-267.

**Correspondencia** (Para más información contacte con):

María José Bastante-Ceca  
Phone: +34 96 387 70 00 Ext. 75685  
Fax: +34 96 387 98 69  
E-mail : [mabasce1@dpi.upv.es](mailto:mabasce1@dpi.upv.es)  
URL : [www.dpi.upv.es/id&ea](http://www.dpi.upv.es/id&ea)