

## **NUEVOS RETOS EN EL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE BALDOSAS CERÁMICAS: DESARROLLO DE LAS CATEGORÍAS DE IMPACTO DE USO DE SUELO, AGOTAMIENTO DE RECURSOS ABIÓTICOS Y TOXICIDAD**

Daniel Garraín

Juan Gasch

Manuel Herrero

Vicente Franco

Carlos Muñoz

Rosario Vidal

*Grupo de Ingeniería del Diseño, Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción,  
Universitat Jaume I de Castellón (España)*

### **Abstract**

The high competitiveness of the ceramic tile market in recent times has created the need to incorporate added value into products, not just in terms of quality, but also in the form of environmental friendliness and care for human health.

This article comes to show the need to perform a methodological determination of impact categories which are not usually considered when assessing the negative environmental effects of certain products or processes within the Life Cycle Assessment methodology. The application of the land use category to the manufacturing of ceramic tiles will allow us to account for the effects upon biodiversity or soil fertility caused by the mining of raw materials or the artificial regeneration of quarries. By applying the abiotic resource depletion category, one can determine the degree of abundance or scarcity of ceramic raw materials. The determination of the effect of particulate matter upon human health, characterization factors may be obtained to determine the real impact of these substances in the human toxicity category.

**Keywords:** *Life Cycle Assessment, land use, abiotic resources depletion, human toxicity, ceramic tiles*

### **Resumen**

Debido a la alta competitividad del mercado de baldosas cerámicas en los últimos tiempos, surge la necesidad de incorporar valores añadidos en los productos no sólo en lo referido a la calidad sino también en el respeto tanto a la salud humana como al medio ambiente natural.

Este artículo pone de manifiesto la necesidad de realizar una determinación metodológica de categorías de impacto que no se consideran normalmente a la hora de evaluar los efectos medioambientales negativos de determinados productos o procesos, dentro del marco del Análisis del Ciclo de Vida. La aplicación de la categoría de uso de suelo en el sector cerámico permitirá tener en cuenta el efecto sobre la biodiversidad o la fertilidad del suelo que produce la extracción de materias primas de las minas o una regeneración artificial de las mismas. Aplicando la categoría de agotamiento de recursos abióticos se puede determinar el grado de riqueza o escasez de las materias primas que componen los

materiales cerámicos. Con la determinación del efecto que provocan las partículas sobre la salud humana se pueden extraer factores de caracterización para determinar el impacto real de estas sustancias en la categoría de toxicidad humana.

**Palabras clave:** *Análisis del Ciclo de Vida, uso del suelo, agotamiento de recursos abióticos, toxicidad humana, baldosas cerámicas*

## 1. Introducción

Actualmente, cualquier actividad económica del ámbito industrial debe superar también el reto de respetar la calidad del medio ambiente tanto en sus procesos de producción como en los componentes que utiliza en los productos que elabora. Aplicando esta premisa al sector cerámico, debido a la alta competitividad en el mercado de los últimos tiempos, surge la necesidad de incorporar valores añadidos en los productos no sólo en lo referido a calidad sino también en el respeto tanto a la salud humana como al medio ambiente natural.

En la industria cerámica, el deterioro del medio ambiente se debe principalmente a la concentración industrial. Esta industria ha dedicado un esfuerzo importante a la prevención y control de la contaminación con la reconversión y modernización de instalaciones productivas, reduciendo la emisión de contaminantes gaseosos de forma sustancial, tanto por la implantación del proceso de monococción rápida como por el uso de gas natural en vez de fuel-oil, por lo que se han reducido notablemente las emisiones de compuestos de azufre y partículas.

Pero todo esto no es suficiente. Lo cierto es que a pesar de ser una de las actividades líderes en el proceso de modernización ecológica, las mejoras en la gestión medioambiental se están introduciendo a un ritmo mucho menor que el seguido por otras dimensiones del sistema tecnológico y de conocimiento del sector. Si bien el desarrollo tecnológico y la introducción de nuevas tecnologías han contribuido a reducir los impactos medioambientales del sector cerámico, la variable medioambiental aún no ha sido incorporada plenamente en el proceso de gestión, desarrollo tecnológico y estrategia empresarial (IMEDES, 2005).

Por lo tanto, la necesidad de conocer el impacto medioambiental de las instalaciones industriales cerámicas hace imprescindible la realización de estudios de la contaminación de este sector industrial.

Una de las herramientas más ampliamente aceptada por la comunidad científica para evaluar el impacto medioambiental es el Análisis del Ciclo de Vida (ACV), un procedimiento analítico que evalúa el ciclo de vida completo de un proceso o producto. El ACV trata los aspectos ambientales e impactos ambientales potenciales (por ejemplo, el uso de recursos y las consecuencias ambientales de las emisiones) a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto desde la adquisición de la materia prima, pasando por la producción, uso, tratamiento final, reciclado, hasta su disposición final (es decir, de la 'cuna a la tumba') (UNE-EN ISO 14040:2006).

Un ACV consta de cuatro etapas, las cuales se resumen a continuación y se esquematizan en la figura 1:

- **Definición de objetivo y alcance:** se definen los objetivos globales, la finalidad del estudio, el producto a estudiar, el destinatario previsto y el alcance del estudio.
- **Análisis del inventario:** comprende la obtención de datos y los procedimientos de cálculo para cuantificar las entradas y salidas relevantes a lo largo de la vida útil del producto.
- **Evaluación del impacto del ciclo de vida:** evalúa la importancia de los impactos ambientales potenciales utilizando los resultados anteriores del análisis de inventario.

- **Interpretación del ciclo de vida:** se establecen las conclusiones y recomendaciones para la toma de decisiones.

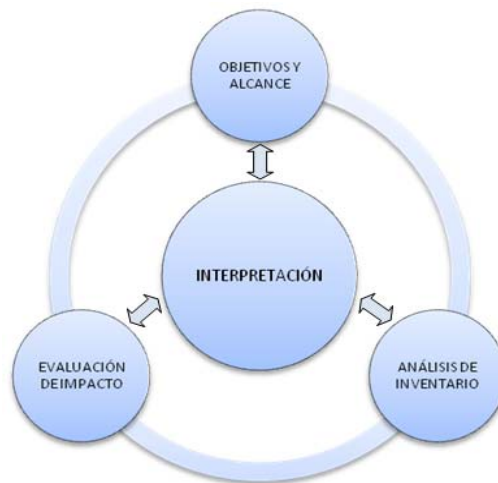


Figura 1. Etapas de un ACV, adaptado de UNE-EN ISO 14040:2006

Mediante este método, la composición y las cantidades de contaminantes generados y de recursos consumidos pueden valorarse en términos de sus impactos al medio ambiente, agrupándolos en un número reducido de categorías medioambientales. Las categorías de impacto más habituales consideradas en los ACV de procesos o productos son el efecto invernadero, la disminución de la capa de ozono, el agotamiento de recursos fósiles, la acidificación, la eutrofización, los precursores de ozono troposférico o las emisiones de metales pesados.

Lamentablemente, aún no han sido desarrolladas metodologías fiables para analizar algunas categorías como el impacto sobre el uso de suelo, el impacto del olor o el impacto del ruido. Estas categorías de impacto no siempre se consideran o simplemente no se adecuan a la realización de evaluaciones del impacto medioambiental. Por lo tanto, resulta de gran importancia el desarrollo de nuevas metodologías que consideren categorías de impacto medioambiental poco habituales a la hora de evaluar los efectos medioambientales negativos de determinados productos o procesos en el marco del ACV.

En Garraín et al. (2009a) se pueden consultar los resultados de la aplicación del ACV para el proceso de producción de baldosas cerámicas, en el que las categorías de impacto consideradas han sido las habituales. No obstante, para una mayor exactitud y completitud del impacto del proceso considerando su ciclo vital, se hace necesario el desarrollo de otras categorías, como pueden ser la de uso de suelo causado por las minas a cielo abierto, o la mejora de otras como la de escasez de recursos abióticos causadas por la propia minería, o la de toxicidad humana motivada por la emisión de partículas arcillosas.

## 2. Objetivo

El objetivo de este estudio es poner de manifiesto la necesidad y la posibilidad de realizar una determinación metodológica de categorías de impacto que no se consideran normalmente a la hora de evaluar los efectos medioambientales negativos en el proceso de fabricación de baldosas cerámicas, dentro del marco del ACV. Las categorías que se van a considerar son la de uso de suelo, agotamiento de recursos abióticos y toxicidad humana.

### **3. Desarrollo de metodologías**

En este apartado se presentan las directrices para el desarrollo de métodos para la consideración de las categorías anteriores en los estudios de impacto ambiental del proceso de fabricación de materiales cerámicos, extrapolables a otro tipo de proceso o productos. Para el caso de la de uso de suelo, el método debería tener en cuenta todos los efectos sobre el medio ambiente que causa la extracción de materias primas de las minas o una regeneración artificial de las mismas, es decir, una transformación artificial del suelo. En el caso del agotamiento de recursos abióticos, la metodología puede determinar el grado de riqueza o escasez de las materias primas que componen los materiales cerámicos mediante el cálculo de los correspondientes factores de caracterización. Finalmente, para la toxicidad humana, la metodología permitirá determinar el efecto que provocan las partículas sobre la salud humana, con la extracción de los correspondientes factores de caracterización.

#### **3.1 Uso de suelo**

El uso de suelo es la principal causa directa de muchos de los impactos de los sistemas de producción. Existe un amplio consenso en que se trata de la principal causa de degradación de la diversidad biológica, además de que la inadecuada gestión del mismo es un factor principal para la reducción de la capacidad de producción biológica del terreno (Milà i Canals, 2007a).

La actividad minera que ofrece un mayor impacto en el medio ambiente es la explotación superficial o a cielo abierto. En este grupo se incluyen las canteras, fosas abiertas, minas a cielo abierto y de contorno, y removimiento de la cima de una montaña, que pueden ser de pocas hectáreas, o varios kilómetros cuadrados. Los impactos ocasionados por una mina son de carácter irreversible y se manifiestan por la destrucción del suelo, de su potencialidad productiva, del recubrimiento vegetal y de las poblaciones de animales localizadas en un entorno más o menos inmediato. Estas operaciones implican la alteración total de la superficie, y producen grandes fosas y canteras abiertas y enormes pilas de sobrecapa que presentan fuertes limitaciones físicas, químicas y biológicas que dificultan la reinstalación de vegetación original. Por tanto, los emprendimientos de extracción y procesamiento de minerales arcillosos para la fabricación de productos cerámicos comprenden una serie de acciones que producen significativos impactos ambientales, que perduran en el tiempo, mucho más allá de la duración de las propias operaciones.

Varios autores han revisado los diferentes indicadores para el cálculo del impacto del uso de suelo y su consideración con el ACV. Sin embargo, no existe hasta la fecha un consenso en cuanto a la forma en que los impactos causados por el uso del suelo pueden ser incorporados en el ACV. Algunos autores han realizado inventarios de los métodos de análisis y evaluación de este impacto (Lindeijer, 2000; Cowell & Lindeijer, 2000; van der Voet, 2001; Milà i Canals, 2003; Guinée et al., 2006; Antón et al., 2007). La regla general que han seguido para diferenciar los impactos principales que causa el uso del suelo ha sido considerar la biodiversidad y la fertilidad del terreno como los aspectos más fuertemente perjudicados.

No obstante, los últimos estudios y discusiones realizados por expertos como Milà i Canals et al. (2007b) recomiendan que los principales daños producidos por el uso del suelo que deberían considerarse en cualquier método de evaluación de impacto son los producidos sobre el medio ambiente natural y sobre los recursos naturales, más concretamente, los producidos sobre la biodiversidad, el potencial de la producción biótica (incluyendo la fertilidad del suelo y el valor de uso de la biodiversidad) y la calidad ecológica del terreno (incluyendo las funciones de soporte vital del terreno distintas de la producción biótica o de biomasa del mismo, ya sea como elemento del ciclo del agua, carbono y nutrientes, como filtro de contaminantes químicos o como hábitat de flora y fauna). Además, consideran muy

importante la diferenciación biogeográfica a la hora de realizar un análisis de impacto ya que un mismo tipo de intervención puede tener diferentes consecuencias dependiendo de la calidad y las características inherentes del suelo afectado.

En estudios previos de Garraín et al. (2008) se pueden consultar algunas aplicaciones de las diversas metodologías, de las cuales se puede concluir en la falta de consenso existente entre ellas dados los resultados dispares y opuestos obtenidos, por lo que se pone de manifiesto la necesidad de mejora en este sentido. No se han desarrollado todavía metodologías globales para analizar la categoría de impacto de ocupación y transformación del suelo, aun cuando se acepta que ésta es una categoría de impacto crucial dadas sus consecuencias sobre la calidad del suelo a largo plazo. Esta falta de afinidad ha estado motivada principalmente por la falta de un consenso claro acerca de la preferencia entre los diferentes métodos e indicadores.

Para obtener un índice global o genérico del impacto causado por la transformación de un determinado tipo de suelo, en primer lugar hay que determinar cuáles son los principales impactos a considerar. Los impactos más importantes causados por el uso de suelo deben ser los indicados anteriormente definidos por Milà i Canals et al. (2007b), en el que se destaca como principales impactos los causados sobre la biodiversidad y la fertilidad del terreno. Por norma general las metodologías que se han aplicado para incluir el impacto del uso del suelo sobre la biodiversidad miden el número de especies de plantas vasculares, las cuales son representativas de la diversidad de especies en general. En el caso de las funciones de soporte vital, se mide el valor de la producción neta de carbono.

El número de plantas vasculares y la cantidad de carbono del terreno aportan una información genérica sobre el impacto de uso de suelo. Debido a esta generalidad, se podría considerar que no aportan una información totalmente concreta y completa sobre las diferentes características de la situación de un terreno determinado. Sin embargo, esta información puede completarse y categorizarse con mayor exactitud con la consideración del factor de la calidad del paisaje a partir de una serie de rasgos físicos, tales como el relieve o la altitud. En el trabajo de Cebrián-Tarrasón et al. (2009) se puede consultar la justificación de que estos tres impactos seleccionados serían adecuados para evaluar los cambios en el uso de suelo desde el punto de vista ambiental.

Finalmente, para conseguir un valor único del impacto se deben relativizar y ponderar estos impactos seleccionados. La utilización de métodos de evaluación multicriterio como el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) puede ser muy válida para este fin. En Garraín et al. (2009b) se ha considerado este método para evaluar los impactos sobre el uso de suelo que causarían la transformación de tipos de campos de cultivo para la obtención de materias primas para la fabricación de materiales biodegradables. Para el caso de las materias primas que conforman los materiales cerámicos, podría ser aplicable este mismo método mediante la previa caracterización del terreno de mina a considerar en el estudio.



Figura 1. Vista aérea de una mina de arcilla roja en el pantano de Sitjar (Onda, Castellón, España)

### 3.2 Agotamiento de recursos abióticos

El conjunto de los bienes materiales del ser humano procede de los recursos naturales, es decir, a partir de la materia y la que proporciona el medio ambiente en general. El crecimiento de la población, el aumento del consumo individual o la mala gestión han llevado de forma notable a constatar la evidencia del agotamiento de los recursos naturales. Para calcular los factores o potenciales de caracterización de agotamiento de los recursos abióticos (PRA) existen varios métodos disponibles. El fundamento básico de estos métodos es la elección de una sustancia como referencia y a partir de ella obtener las demás. Esta elección va a depender de varios factores como la abundancia a nivel mundial de esa sustancia, de la abundancia en el lugar de estudio, de la facilidad de encontrar los datos y de la viabilidad de si una cantera es económicamente explotable.

El método de referencia para el agotamiento de los recursos abióticos es el desarrollado por Guinée et al. (2002), es el cual se destaca la importancia de que la disminución de los recursos es un problema grave y se considera como cuestión fundamental la protección de los recursos naturales. Este método considera dos problemas referidos al agotamiento de los recursos abióticos, por una parte el agotamiento de los elementos y por otra el agotamiento de la energía o de los combustibles fósiles:

- El agotamiento de los elementos es definido como el agotamiento total de las reservas naturales de los elementos (en kg de elemento). Hay que recalcar que no se considera que tipo de funciones tenga el elemento, como por ejemplo en la construcción de bloques en el que puede ser de arcilla, yeso, granito, arena o grava.
- El agotamiento de la energía sí que se define a nivel de funciones y se define como el agotamiento total de la reserva total de energía (MJ).

Según estas definiciones, el problema existente consiste en categorizar los diferentes recursos naturales en un conjunto de posibles funciones. Este conjunto debe consistir en funciones únicas, que representen a todos los recursos naturales. Varios elementos pueden realizar la misma función por lo que es muy complicado realizar una lista de los distintos elementos y las funciones que pueden realizar.

Guinée et al. (2002) calculan el indicador de esta categoría como:

$$IRA = \sum_i PRA_i \cdot m_i \quad (1)$$

donde IRA es el indicador de agotamiento de recursos abióticos,  $m_i$  es la cantidad del recurso utilizado, en Kg,  $m^3$  o MJ, siendo PRA el potencial de agotamiento de recursos abióticos, calculado de la siguiente forma:

$$PRA_i = \frac{DR_i}{R_i^2} \cdot \frac{(R_{ref})^2}{DR_{ref}} \quad (2)$$

donde  $R_i$  es la reserva del recurso  $i$  (Kg),  $DR_i$  es la disminución de  $R_i$  en  $Kg \cdot a^{-1}$  y  $R_{ref}$  (Kg) es la reserva de antimonio como recurso de referencia y  $DR_{ref}$  en  $Kg \cdot a^{-1}$  es la disminución de  $R_{ref}$ .

La sustancia que se utiliza habitualmente como referencia a la hora de indicar el agotamiento de un recurso es el antimonio, aunque existen estudios (Strauss et al., 2006) en los que se ha determinado otras, como el platino.

Evidentemente existen una serie de factores de caracterización cuyo cálculo es más fácil de obtener que otros. En el caso de ciertos compuestos como la bauxita, trióxido de arsénico u

óxido bórico, éstos han sido obtenidos a partir de elementos como el aluminio, arsénico y boro, mucho más fáciles de calcular.

Sin embargo, para el cálculo de los factores de caracterización referidos al agotamiento de las materias primas utilizadas en la fabricación de productos cerámicos (arcillas, cuarzo, feldespato, dolomita, silicatos, micas, carbonatos, etc.) no existe ningún tipo de dato bibliográfico. El principal motivo de la falta de datos es la dificultad de obtención de los valores de referencia.

Para calcular estos factores se debe conocer la producción del recurso y el valor de la concentración que existe en la corteza terrestre, en el mar y en el aire. Los valores para los elementos más comunes se pueden encontrar en Guinée (1995). En las materias primas utilizadas en la fabricación de productos cerámicos no se realiza ninguna referencia. Por ello, como primera aproximación, ya que anteriormente no se ha efectuado ningún estudio, se supondría que la arcilla sólo existe en la corteza y no en el mar ni en el aire. Con dicho valor se realiza la siguiente operación:

$$R_{\text{Última Reserva}} = C_{\text{corteza}} \cdot M_{\text{CortezaTerrestre}} \quad (3)$$

donde,  $C_{\text{corteza}}$  es la concentración en la corteza,  $M_{\text{corteza terrestre}}$  es la masa de corteza terrestre y  $R_{\text{Última reserva}}$  es el resultado del valor de la última reserva. El valor de  $M_{\text{corteza terrestre}}$  se obtiene gracias a la multiplicación entre la profundidad media de la corteza terrestre (17000 m), densidad media ( $2670 \text{ Kg/m}^3$ ) y la superficie de la Tierra ( $5,10\text{E}+14 \text{ m}^2$ ), obteniendo un valor de  $2,31\text{E}+22$ , a partir de la siguiente ecuación:

$$M_{\text{CortezaTerrestre}} = P_{\text{media}} \cdot \rho_{\text{media}} \cdot S_{\text{Tierra}} \quad (4)$$

Evidentemente el valor de la concentración del material en la corteza hay que calcularlo, ya que no existe ningún valor anteriormente calculado. La obtención de dicho valor se conseguiría mediante extrapolaciones de valores ya existentes, realizando ratios o realizando una búsqueda en la bibliografía existente. Una vez se ha obtenido el valor de  $R_{\text{Última reserva}}$ , para calcular el PRA referido a la última reserva se debe realizar de la forma que se detalla a continuación.

En primer lugar se obtiene el valor del cociente entre la producción y el valor de  $R_{\text{ultimate reserve}}$  al cuadrado al que se denotará con  $x$ .

$$x = \frac{\text{producción}}{(R_{\text{Última Reserva}})^2} \quad (5)$$

Para calcular el valor de la producción mundial no existen referencias de las materias primas de los materiales cerámicos hasta el momento, solamente existen los referidos a algún país en concreto (USGS, 2008). Una vez ya se ha obtenido el valor de la producción se calcula el valor de  $x$  simplemente realizando el cociente, ya que el valor de  $R_{\text{ultimate reserve}}$  es conocido. Tras este cálculo se calcula el valor de  $x$  referido al de referencia (por ejemplo, el  $S_b$ ). El método de obtención es similar al descrito anteriormente pero con el  $S_b$ , por lo que tras este cálculo se obtiene el valor de  $x_{\text{ref}}$ . Finalmente, el cálculo de PRA de la última reserva consiste en el cociente entre la  $x$  del elemento a calcular y la  $x_{\text{ref}}$ .

$$PRA_i = \frac{x_{\text{elemento}}}{x_{\text{ref}}} \quad (6)$$

Este cálculo es similar para la reserva base y la reserva, sólo que los datos se pueden obtener en USGS (2008) en lugar de extraerlos de Guinée (1995).

### 3.3 Toxicidad humana

En la categoría general de toxicidad se contemplan los efectos sobre los humanos y los ecosistemas acuáticos y terrestres de las sustancias tóxicas existentes en el ambiente. La toxicidad de una sustancia dependerá de la propia sustancia pero también de la vía de administración o exposición, la dosis, cómo se administra, etc. La toxicidad afecta a las áreas de la salud humana, entorno natural y recursos naturales. También hay que recalcar que un contaminante no permanece en el medio en que es emitido, sino que puede desplazarse y alcanzar otros comportamientos que serán a su vez contaminados.

Existen diferentes métodos para el cálculo de los factores de caracterización de la toxicidad, por lo que no existe aún un consenso claro sobre el método a utilizar. El método de referencia vuelve a ser el elaborado por Guinée et al. (2002), en el que definen el procedimiento general para el cálculo del impacto de la toxicidad en humanos (ITH), que vendrá dado por:

$$ITH = \sum_n \sum_i PTH_{n,i} \cdot f_{i,n} \cdot m_i \quad (7)$$

siendo PTH el factor de caracterización de potencial de toxicidad humana, cuyas unidades van a depender del método utilizado para su caracterización,  $f_{i,n}$  la fracción de la sustancia  $i$  que se transporta desde el intervalo al comportamiento ambiental  $n$ , adimensional y  $m$  la masa emitida de cada contaminante. Se calcula de la misma forma la ecotoxicidad acuática (ITA, en inglés ATI, *Aquatic Toxicity Impact*) y la ecotoxicidad terrestre (ITT, del inglés TTI, *Terrestrial Toxicity Impact*);, mediante las expresiones siguientes, siendo PTA y PTT los factores de caracterización para la toxicidad de los ecosistemas acuático y terrestre respectivamente. :

$$ITA = \sum_n \sum_i PTA_{n,i} \cdot f_{i,n} \cdot m_i \quad (8)$$

$$ITI = \sum_n \sum_i PTI_{n,i} \cdot f_{i,n} \cdot m_i \quad (9)$$

Uno de los problemas más significativos desde el punto de vista medioambiental y de sus efectos es la emisión de partículas primarias (PM, del inglés *Particle Matter*). Puede tratarse de emisiones canalizadas (corrientes vertidas a la atmósfera a través de una conducción) o difusas (corrientes vertidas a la atmósfera desde una superficie o volumen), siendo generalmente de composición mineral. No obstante, las emisiones procedentes de etapas relacionadas con las fritas, esmaltes y pigmentos cerámicos son de distinta composición, pudiendo contener Zr, Ba, Zn, Pb, entre otros metales (Mallol et al., 2001). Además se generan emisiones canalizadas de contaminantes en las etapas de alta temperatura y/o en las que implican un proceso de combustión (emisiones calientes): secado por atomización, secado de piezas conformadas en crudo, cocción, fusión de fritas y calcinación de pigmentos, o descomposición de materias primas.

Los gases y sus efectos asociados a diferentes categorías de impacto, con sus factores de caracterización correspondientes, están ampliamente estudiados, mientras que las partículas, en cambio, no poseen esta cualidad. Existen en la actualidad muchas clasificaciones de los tipos existentes, las cuales son muy diversas. En lo que respecta a los efectos asociados y a la relación con el ACV, las partículas se consideran únicamente a la categoría de toxicidad humana en la metodología de evaluación del CML 2 *baseline* 200, y a la categoría de smog de invierno en la metodología del Ecoindicador 95. Además se encuentran agrupadas bajo el mismo nombre "*particulates*" y con un mismo factor de



caracterización, independientemente de la composición, tipo y tamaño de partícula ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ) que presenten.

El desarrollo de factores de caracterización en esta categoría que considere el impacto del material particulado se debe realizar en función de dos factores clave: la clasificación de cada partícula según el tamaño y la composición, y la determinación de los efectos asociados a la exposición de las mismas.

El material particulado atmosférico se puede clasificar en diversos grupos según el criterio considerado. Ya sea por la granulometría, el tiempo de residencia en la atmósfera, el mecanismo de formación, el origen o la composición química, se pueden encontrar partículas de naturaleza muy diversa.

Los efectos que pueden tener asociados las PM pueden afectar principalmente a la salud humana y a los ecosistemas. No obstante existen otros efectos como los causados sobre el clima, sobre los materiales, sobre la visibilidad atmosférica o sobre los edificios y monumentos que pueden ser de elevada importancia según el caso.

Para considerar la categoría de toxicidad humana se deben clasificar los efectos sobre la salud de las personas que causan potencialmente las partículas. Numerosos estudios epidemiológicos llevados a cabo afirman que existe una correlación significativa entre la exposición al material particulado atmosférico y diversos efectos adversos sobre la salud. Los efectos que puede provocar la inhalación de material particulado en la salud dependen de varios factores, de los cuales los más importantes son el tamaño de partícula, su composición química y el tiempo de exposición a un ambiente con altos niveles de material particulado.

Las partículas  $PM_{10}$  pueden penetrar en la región traqueo-bronquial, las cuales se denominan partículas torácicas y son eliminadas por acción ciliar. Las partículas de diámetro entre 0,1 y 2,5  $\mu m$  pueden alcanzar la cavidad alveolar, son denominadas partículas alveolares, alcanzan los bronquiolos y no son eliminadas, quedando retenidas de forma crónica. Las partículas de diámetro inferior a 0,1  $\mu m$  son demasiado pequeñas para sedimentar durante la respiración, no obstante, se depositan en las paredes alveolares por difusión o bien se expulsan con la misma respiración, se eliminan rápidamente y no son retenidas en cantidad en el parénquima pulmonar.

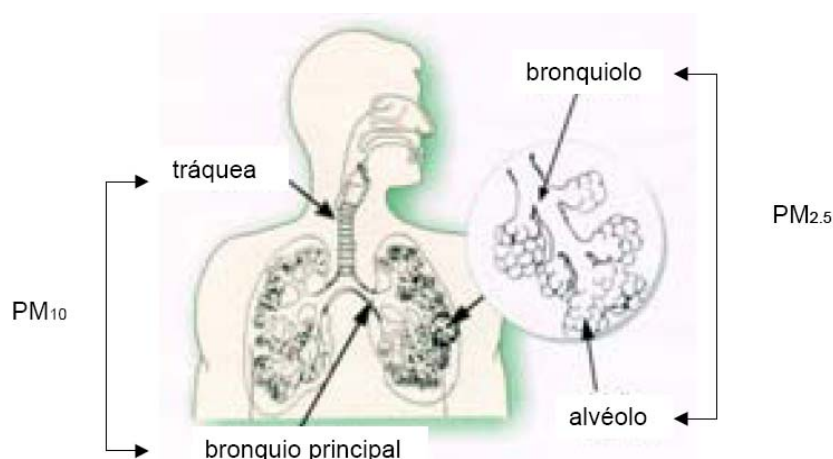


Figura 2. Penetración de partículas en el aparato respiratorio

Existe una relación entre el aumento del riesgo de padecer bronquitis crónica con el aumento de la exposición a material particulado. Asimismo, existen estudios que demuestran que un incremento de 100  $\mu g/m^3$  en los niveles de  $PM_{10}$  conlleva un incremento

de un 16% en riesgo relativo de mortalidad y un incremento de un 12% en el número de hospitalizaciones. Otros estudios se han centrado en los efectos de la exposición a largo plazo a la fracción alveolar ( $PM_{2,5}$ ), que debido a su tamaño tiene mayor capacidad de penetración en el organismo y mayor reactividad química. Como resultado de estos estudios se tiene una correlación significativa entre el incremento de la mortalidad y los niveles de material particulado fino ( $<2,5 \mu m$ ); dicho incremento en la mortalidad está directamente relacionado con afecciones cardiovasculares.

La Organización Mundial de la Salud recomienda el desarrollo de la Directiva Europea de Calidad del Aire en lo referente a  $PM_{2,5}$ , aunque, debido a la existencia de estudios que demuestran los efectos adversos de las partículas gruesas (diámetro entre 2,5 y 10  $\mu m$ ) sobre la salud, sugiere garantizar la vigencia de la normativa respecto al control de  $PM_{10}$ . Con respecto al tiempo de exposición, los efectos sobre la salud se observan tanto en episodios de contaminación crónicos como agudos. Ambos tipos de episodio conllevan aumentos en los ingresos hospitalarios por enfermedades respiratorias y cardiovasculares, siendo éstas las principales causas de los incrementos en la mortalidad (WHO, 2002).

Los estudios de exposición a niveles elevados se han llevado a cabo en su mayoría en lugares cercanos al tráfico; esta fuente tiene una cantidad considerable de partículas  $<0,1 \mu m$ , que según algunos estudios tienen un efecto muy perjudicial sobre la salud. Por tanto, es posible que la exposición a partículas ultrafinas sea uno de los principales motivos de los efectos adversos sobre la salud apreciada en exposición a niveles elevados de partículas procedentes del tráfico.

Independientemente del tamaño de partícula, los efectos en la salud del material particulado dependen de la composición química de éste. Aunque es un tema no zanjado, la mayoría de estudios apunta a que el mayor impacto en la salud viene causado por las partículas de carbono elemental, compuestos orgánicos, sulfatos, nitratos y determinados metales (As, Cd, Fe, Zn, Ni). El hecho de que la mayoría de las partículas con esta composición se acumulen en la fracción  $PM_{2,5}$  contribuye a aumentar sus efectos adversos sobre la salud.

#### **4. Conclusiones**

En este estudio se ha reflejado la necesidad del desarrollo y/o mejora de nuevas categorías de impacto para una mayor exactitud y completitud del impacto global en el marco del ACV de materiales cerámicos, como pueden ser la de uso de suelo causado por las minas a cielo abierto, o la mejora de otras como la de escasez de recursos abióticos causadas por la propia minería, o la de toxicidad humana motivada por la emisión de partículas arcillosas.

Del análisis de las metodologías propuestas o directrices para el desarrollo las mismas se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- En el caso del impacto del uso del suelo, la metodología que se propone considera que los impactos sobre la biodiversidad, las funciones de soporte de vida (fertilidad del suelo) y el paisaje serían los más importantes a la hora de evaluar un posible cambio en un determinado uso de suelo. Con la aplicación de metodologías de evaluación multicriterio como solución para considerar los impactos anteriores, se puede conseguir combinar las bondades de todos los tipos de evaluación del impacto medioambiental del uso del suelo para así obtener una aproximación fiable del impacto general en su conjunto.
- Hace falta una mejora en la información disponible en las bases de datos para poder calcular factores de caracterización regionales que sirvan para determinar el impacto del agotamiento de recursos abióticos. En el caso de aplicación a materias primas cerámicas no existen bases que informen del grado de abundancia o escasez de las mismas por lo que se hace indispensable el desarrollo para determinar esta categoría.

- Los factores de caracterización de las partículas desarrollados en el caso del impacto tóxico sobre el ser humano no poseen ninguna diferencia ya sea por tipo, tamaño o efecto nocivo. Por tanto, los estudios sobre los efectos sobre la salud del material particulado se hacen necesarios para el desarrollo de esta categoría.

## Agradecimientos

Este estudio ha sido parte del proyecto con referencia C46/2006 titulado “Desarrollo de categorías de impacto aplicadas a materiales cerámicos usando la metodología del análisis del ciclo de vida”, subvencionado por el Ministerio de Fomento.

## Referencias

Antón, A.; Castells, F.; Montero, J.I.; “Land use indicators in life cycle assessment. Case study: The environmental impact of Mediterranean greenhouses”, *Journal of Cleaner Production*, 15 (2007), pp. 432-438.

Cebrián-Tarrasón, D.; Garraín, D.; Vidal, R.; “Justificación taxonómica del factor del paisaje en el uso del suelo”, *XIII Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos*, 2009, Badajoz, España.

Cowell, S.J.; Lindeijer, E.; “Impacts on ecosystem due to land use: biodiversity, life support and soil quality in LCA”, in: *Agricultural data for Life Cycle Assesments*, B.P. Weidema & M.J.G. Meeusen (eds.), *Agricultural Economics Research Institute (LEI)*, 2000, The Hague, Holanda.

Garraín, D.; Vidal, R.; Franco, V.; “Uso de suelo y biomateriales”, *Recursos Rurais* (2008), Vol 1, n. 4: 51-55.

Garraín, D.; Franco, V.; Muñoz, C.; Vidal, R.; Gasch, J.; “Adaptación de los criterios ecológicos para la obtención de la etiqueta ecológica europea en la fase de producción de baldosas cerámicas”, *XIII Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos*, 2009, Badajoz, España. (2009a).

Garraín, D.; Vidal, R.; Franco, V.; Muñoz, C.; “Land use: a neglected environmental impact category in Eco-design”, *15th LCA Case Studies Symposium “LCA for decision support in business and government for Sustainable Consumption and Production”*, 2009, París, Francia. (2009b).

Guinée, J.B.; “Development of a methodology for the environmental life-cycle assessment of products”, *Tesis doctoral*, 1995, Universidad de Leiden, Holanda.

Guinée, J.B.; Gorrée, M.; Heijungs, R.; Huppes, G.; de Koning, A.; Wegener, A.; Suh, S.; Udo de Haes, H.; Bruijn, H.; Duin, R.V.; Huijbregts, M.A.J.; “*Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards*”, Kluwer Academic Publishers, 2002, Dordrecht, Holanda.

Guinée, J.; van Oers, L.; de Koning, A.; Tamis, W.; “Life cycle approaches for conservation agriculture”, CML report 171, *Dpt. of Industrial Ecology & Dpt. of Environmental Biology*, 2006, Universiteit Leiden, Holanda.

IMEDES; “Estudio sobre las tendencias del empleo y las necesidades formativas en medio ambiente en los sectores cerámico, agroalimentario, madera y mueble y metal mecánico”, *Instituto mediterráneo por el desarrollo sostenible*, 2005, Valencia, España.

Lindeijer E.; “Review of land use impact methodologies”, *Journal of Cleaner Production* 8 (2000), pp. 273-281.

Mallol, G.; Monfort, E.; Busani, G.; Lezaun, F.J.; “Depuración de los gases de combustión en la industria cerámica. Guías Técnicas de energía y medio ambiente”, *Fundación Gas Natural e Instituto de Tecnología Cerámica*, 2001, Castellón, España.

Milà i Canals L.; “Contributions to LCA methodology for agricultural systems. Site-dependency and soil degradation impact assessment”, *PhD dissertation*, 2003, Universitat Autònoma de Barcelona, España.

Milà i Canals, L.; “Land use in LCA: a new subject area and call for papers”, *International Journal of Life Cycle Assessment*, (2007) 12 (1): 1. (2007a).

Milà i Canals, L., Bauer, C., Depestele, J., Dubreuil, A., Knuchel, R.F., Gaillard, G., Michelsen, O., Müller-Wenk, R., Rydgren, B.; “Key elements in a framework for land use impact assessment within LCA”, *International Journal of Life Cycle Assessment*, (2007) 12 (1) pp. 5-15. (2007b).

Strauss, K.; Brent, A.C.; Hietkamp, S.; “Characterisation and normalization factors for life cycle impact assessment mined abiotic resources categories in South Africa”, *International Journal of Life Cycle Assessment* (2006) 11 (3): 162-171.

UNE-EN ISO 14040:2006 “Gestión ambiental – Análisis de Ciclo de Vida – Principios y marco de referencia”.

USGS; página web de United States Geological Survey, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity> [acceso en diciembre de 2008].

van der Voet, E.; “Land use in LCA”, *CML-SSP Working Paper*, 2001, Centre of Environmental Science, Leiden University, Holanda.

WHO; “The World Health Report”, *Informe de la Organización Mundial de la Salud (World Health Organisation)*, 2002, Ginebra (Suiza) (disponible en <http://www.who.int/whr/en>).

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

Daniel Garraín Cordero  
Grupo de Ingeniería del Diseño, Dpto. de Ingeniería Mecánica y Construcción  
Universitat Jaume I,  
Av. Sos Baynat, s/n 12071 Castellón (España)  
Tel: +34 964 729 252  
Fax: +34 964 728 106  
E-mail: [garrain@uji.es](mailto:garrain@uji.es)  
URL: <http://www.gid.uji.es>