

## RESUMEN TESIS DOCTORAL

### EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS AMBIENTALES DERIVADOS DE NANOMATERIALES APLICADOS AL ENVASE Y EMBALAJE

Por: **D<sup>a</sup>. Carmen Sánchez Reig**

La presente tesis tiene como objetivo principal conocer la repercusión que la aplicación de nanomateriales como aditivos puede tener sobre las propiedades de los envases en los que se aplican, sobre los impactos ambientales del sistema de envase, así como en la gestión de los residuos generados una vez se han consumido los productos contenidos.

Consecuencia de la investigación realizada en el marco de esta tesis, se han preparado tres artículos científicos que se adjuntan como anejos en su totalidad. El primero de ellos, se publicó en la revista "Packaging Technology and Science", el segundo en la revista "Waste Management" y el tercero en la revista "Journal of Cleaner Production". La selección de las revistas se realizó en base a la temática de cada artículo. El nexo de los artículos refleja de forma fiel los objetivos pretendidos en la tesis.

Así, se consideró un buen punto de partida realizar en primer lugar un exhaustivo análisis del estado del arte de los nanomateriales empleados en envase alimentario. Debido a la enorme variedad de nanomateriales, y al hecho que pueden ser utilizados en algunos casos tanto en el propio envase como sobre el propio producto contenido, el análisis se abordó desde el punto de vista de las propiedades mejoradas respecto a los materiales convencionales. El análisis, se basó en la valoración cualitativa de las propiedades mejoradas clasificadas en tres grupos: propiedades técnicas, activas e inteligentes. Posteriormente se agruparon para cuantificar las propiedades con mayor potencial actual y futuro de los nanomateriales en el campo de envase alimentario. Esto se realizó mediante la técnica de Análisis Multicriterio (MCDA en inglés). A pesar de las limitaciones observadas, tales como la ausencia de aplicaciones concretas para algunos nanomateriales, y la necesidad de análisis caso por caso, sí que pudo concluirse que dichos materiales se han enfocado a la mejora de propiedades barrera, la reducción de la actividad microbiana, la mejora de las propiedades mecánicas y la reducción de la permeabilidad al agua. De entre los más de 84 referencias a nanomateriales, se pudo observar que los que presentan un mayor potencial de aplicación son el nanocarbonato cálcico o el quitosano, debido a la posibilidad de combinar propiedades mejoradas y activas. Asimismo, las nanoarcillas (caolinita), los nanotubos/nanofibras de carbono y los nanobiocomposites basados en bioplásticos como el PLA y el PHB figuraban en los primeros puestos del ranking del análisis MCDA. No obstante, a pesar de la buena posición de los nanotubos/nanofibras de carbono, existen todavía muchas dudas acerca de su citotoxicidad y la posible migración no deseada al alimento. Otro resultado destacable fue el hecho de que buena parte de las nanopartículas metálicas tales como el ZnO, TiO<sub>2</sub> y Ag no figuraron en los primeros puestos del ranking MCDA realizado.

Las implicaciones derivadas de la presencia de nanomateriales en los procesos de reciclado de envases plásticos fueron evaluadas en el segundo trabajo. Se analizaron combinaciones de tres films plásticos polietileno (PE), polipropileno (PP) y polietiléntereftalato (PET) reforzados con cuatro nanomateriales diferentes (nanoarcilla, carbonato cálcico, óxido de zinc, y nanoplata). Concretamente, las combinaciones estudiadas fueron PE-nanoarcilla, PE-CaCO<sub>3</sub>, PP-Ag, PET-ZnO, PET-Ag, PET-nanoarcilla. Los principales resultados obtenidos muestran la aparición de olores y humo de degradación en el reciclado del film PET-Nanoarcilla y de discontinuidades en el film PET-nanoplata. Además, las desviaciones de color con respecto a la muestra de referencia eran visibles en todas las combinaciones estudiadas. Adicionalmente, en relación con la calidad del material final obtenido tras el

reciclado, se observaron pequeños cambios en brillo y en índice de amarilleamiento (el brillo principalmente en los films de PET y el índice de amarilleamiento en los films de PE, PP y en el de PET con nanoplata). Con respecto a las propiedades mecánicas se apreciaron ligeras desviaciones; modulo de tensión (PE-nanoarcilla, PP-nanoplata), resistencia a la tracción (PE-nanoarcilla), elongación a la rotura (PET-nanoplata) y resistencia al rasgado (PE-nanoarcilla y PP-nanoplata). La principal conclusión es que, si bien existen ciertas diferencias con respecto a los materiales de referencia (polímeros convencionales), la escasa diferencia de las mismas hace pensar que los usos a los que se podrían destinar estos materiales reciclados con presencia de nanopartículas serían similares. Dependerá por tanto de los requisitos específicos de la aplicación final, pudiéndose por tanto aplicar a productos cuyas demandas de resistencia o de apariencia no sean muy exigentes.

Por último, se llevó a cabo el análisis ambiental de un nanomaterial sobre un caso de aplicación específico. De este modo, el análisis de ciclo de vida abordó tres importantes objetivos: (1) resolver el problema ingenieril de la comparativa de materiales de envase en base a sus propiedades mecánicas para cumplir una misma unidad funcional utilizando los índices de Ashby, (2) calcular el inventario de análisis de ciclo de vida de la producción del nanocarbonato cálcico, inédito en la literatura científica y en las bases de datos de análisis de ciclo de vida, y (3) aplicar de manera efectiva y cuantitativa el método de evaluación de impacto USEtox para nanopartículas inorgánicas, y más concretamente del nanocarbonato cálcico. En concreto, se realizó un análisis de ciclo de vida comparativo entre un film nanocomposite de LDPE con 4% en peso de nanoarcilla, frente a un film de LDPE virgen. Destacar la novedad de la aplicación práctica del método USEtox, que supone un doble adelanto por: (a) la adaptación del método al caso concreto del nanocarbonato cálcico basado en análisis toxicológicos efectuados con la nanopartícula en cuestión y (b) la ausencia de información cuantitativa de aplicación de este método de evaluación de impacto para nanomateriales. Los resultados reflejan que el uso de nanomateriales puede ayudar en la reducción del impacto ambiental global del sistema de envase debido a la mejora de las propiedades funcionales entorno a un 40% en las categorías de impacto no relacionadas con toxicidad, así como también un ahorro en materias primas de un 38% en peso. Además, se han calculado factores de caracterización para esta nanopartícula siendo éstos muy pequeños lo que refleja elevados valores de EC50 entorno 100mg/L, lo cual indica una baja toxicidad.

Asimismo, los resultados obtenidos permiten identificar claramente futuras líneas de investigación que aporten nuevos avances en el conocimiento de la interacción de los nanomateriales, los envases, los productos contenidos y sus impactos ambientales y sobre la seguridad.