

## RESUM

---

La present tesi té com a principal objectiu conèixer la repercussió de la aplicació de nanomaterials com additius sobre les propietats finals d'un envàs en la seua aplicació al sector alimentari, així com proporcionar les dades concretes del potencial de reciclat dels mateixos i els impactes ambientals en termes no únicament mediambientals, sinó també en relació amb la toxicitat que deriva de estes substàncies.

Com a conseqüència del treball realitzat, s'han preparat tres articles científics que s'adjunten íntegrament annexats al document. El primer article es va publicar en la revista "Packaging Technology and Science", el segon en la revista "Waste Management" i el tercer en la revista "Journal of Cleaner Production". La selecció de les revistes es va realitzar considerant la temàtica de cada article. El nexa de unió dels articles manifesta de forma ferma els objectius proposats en la tesi, sent el objectiu final la aportació de dades i estudis concrets dins del camp dels nanomaterials aplicats a l'envàs i la seua repercussió no sols funcional, sinó també i fonamentalment ambiental. Les investigacions plantejades i detallades en cadascú dels articles pretenen contribuir parcialment a un objectiu tan ambiciós com el que planteja aquest treball.

Així mateix, es va considerar com a punt de partida portar a terme un exhaustiu anàlisi de l'estat de l'art dels nanomaterials incorporats en envasos per al sector alimentari. A causa de la varietat de nanomaterials, i pel fet de que en algunes ocasions es poden utilitzar tant en el envàs com sobre el propi producte contingut, el anàlisi es va afrontar des del punt de vista de les propietats millorades respecte als materials convencionals. La valoració qualitativa de les propietats millorades és va classificar en tres grups: propietats tècniques, actives e intel·ligents. Aquestes valoracions qualitatives es van agrupar posteriorment per a quantificar les propietats amb un major potencial actual i futur dels nanomaterials en el camp del envàs alimentari. Aquesta quantificació es va portar a terme mitjançant la tècnica de anàlisi multi criteri (MCDA en anglès). Malgrat les limitacions observades, com es la absència de aplicacions concretes per a alguns nanomaterials i la necessitat d'analitzar

(polímers convencionals), la escassa diferència entre ells fa pensar que els usos als que es podrien destinar aquests materials reciclats amb presència de nanopartícules serien similars. Dependrà per tant dels requisits específics de la aplicació final, podent ser aplicats a productes amb requeriments de resistència o aparença baixos.

Per acabar, es va dur a terme l'anàlisi ambiental considerant un nanomaterial concret i sobre un cas de aplicació específic. D'aquesta manera, el anàlisi de cicle de vida va abordar tres objectius importants: (1) resoldre el problema de enginyeria per a comparar materials d'envàs considerant les propietats mecàniques a complir per una mateixa unitat funcional, mitjançant els diagrames d'Ashby, (2) Calcular l'inventari per a l'anàlisi de cicle de vida de la producció de nanocarbonat càlcic, inèdit en la literatura científica en les bases de dades d'anàlisi de cicle de vida, (3) aplicar de manera efectiva i quantitativa la metodologia d'avaluació de l'impacte USEtox per a nanopartícules inorgàniques, més concretament el nanocarbonat càlcic. Particularment, es va realitzar un anàlisi de cicle de vida comparatiu entre un film amb nanocompostos de LDPE amb un pes del 4% en nanoargila, enfront de un film de LDPE verge. Destacar la novetat de la aplicació pràctica de la metodologia USEtox, que suposa un doble avançament per: (a) l'adaptació de la metodologia al cas concret del nanocarbonat càlcic basat en anàlisis toxicològics efectuats amb la nanopartícula en qüestió i (b) la absència de informació quantitativa d'aplicació de esta metodologia d'avaluació del impacte per a nanomaterials. Els resultats reflecteixen l'ús que els nanomaterials poden ajudar a la reducció de l'impacte ambiental total del sistema d'envas per la millora de les propietats aportades al voltant d'un 40% en les categories d'impacte no relacionades amb la toxicitat, així com un estalvi de matèries primes d'un 38% en pes. Amés s'han calculat factors de caracterització per a aquesta nanopartícula molt menuts el que reflecteix valors elevats de EC50 al voltant de 100mg/L, el que indica una baixa toxicitat.

Així mateix la gran diversitat de tipologies i aplicacions del nanomaterials, així com els seus corresponents efectes sobre el medi ambient, permeten identificar clarament futures línies de investigació que aporten nous avanços en el coneixement de la interacció dels nanomaterials, els envasos, i els productes continguts i els seus impactes ambientals en la seguretat.

cas per cas, si que es va poder concloure que els materials considerats en l'anàlisi estaven enfocats a la millora de les propietats barrera, la reducció de l'activitat microbiana, la millora de les propietats mecàniques i la reducció de la permeabilitat a l'aigua. Entre els més de 84 materials referenciats, es va observar que els que presentaven un major potencial de aplicació eren el nanocarbonat càlcic o el quitosà, a causa de la possible combinació de propietats millorades i propietats actives. També de esta manera, les nanoargiles (caolinita), els nanotubs/nanofibres de carboni i els nanobiocomposites basats en bioplàstics com l'Àcid Polilàctic (PLA) i el polihidroxibutirat (PHB) figuren en els primers llocs de la llista de l'anàlisi MCDA. Però malgrat la bona posició dels nanotubs/nanofibres de carboni, existeixen encara molts dubtes sobre la citotoxicitat i la possibilitat de migració no desitjada cap al producte alimentari envasat. Com a resultat destacable del anàlisi, una gran part de les nanopartícules metàl·liques, tals com el ZnO, TiO<sub>2</sub> i el Ag no van estar incloses entre els primers llocs de la llista de l'anàlisi MCDA.

Les limitacions derivades de la presència de nanomaterials en els processos de reciclat de envasos de plàstic van ser avaluades en el segon treball. Es van analitzar combinacions de tres films plàstics, polietilè (PE), polipropilè (PP) i polietilètereftalat (PET). Tots ells reforçats amb quatre nanomaterials diferents (nanoargila, carbonat càlcic, òxid de zinc, i nanoplata). Concretament, les combinacions testades van ser PE-nanoargila, PE-CaCO<sub>3</sub>, PP-Ag, PET-ZnO, PET-Ag, PET-nanoargila. Els principals resultats obtinguts assenyalen l'aparició d'olors i fum de degradació durant el reciclat del film PET-nanoargila i discontinuïtats en el film PET-nanoplata. A més, les desviacions de color respecte a la mostra de referència s'apreciaven en totes les combinacions testades. Addicionalment, i en relació amb la qualitat del material final obtingut amb el procés de reciclat, es van observar canvis no significatius en quant a lluentor i grau de esgrogueïment (La lluentor principalment en els films de PET i el engrogueïment en els films de PE, PP i en el de PET amb nanoplata). Si es consideren les propietats mecàniques analitzades, es van apreciar lleugeres desviacions; mòdul de tensió (PE-nanoarcilla, PP-nanoplata), resistència a la tracció (PE-nanoarcilla), elongació del material fins al trencament (PET-nanoplata) i resistència al esquinçat (PE-nanoarcilla y PP-nanoplata). La principal conclusió és que, si bé existeixen certes diferències pel que fa als materials de referència