

Análisis del flujo de materiales de una red de simbiosis industrial en Mendoza, Argentina

Material flow analysis of an industrial symbiosis network in Mendoza, Argentina

Presentación: 4 y 5 de octubre del 2022

Doctorando:

Fernando Arce Bastias

Grupo CLIOPE, Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional - Argentina
farcebastias@mendoza-conicet.gob.ar

Director:

Alejandro Pablo Arena

Resumen

La transición hacia una economía circular requiere de metodologías e indicadores que permitan realizar una comprensión exhaustiva del uso de recursos en todos los sistemas. Este trabajo presenta la evaluación de los flujos materiales de una red de simbiosis industrial compuesta por cinco empresas en Mendoza, Argentina. Se realizó un Análisis de Flujo de Materiales para el año 2021 que consistió en estudiar los flujos de entrada y salida de los procesos que incluyen residuos sólidos urbanos, residuos plásticos, pellets de plástico reciclado y recursos para la elaboración de plástico virgen. La red de simbiosis industrial logró reducir en un 97% la disposición final de residuos en vertedero y recuperar 602 toneladas anuales de materiales. Con el objetivo de analizar la circularidad de este sistema, se utilizó el factor de cascada como indicador, el cual incluye información sobre flujos de materia prima virgen, residuos posconsumo y residuos industriales; además se tuvo en cuenta la eficiencia del reciclaje mediante una modificación del indicador original. Cuando se analizó el indicador para el sistema global resultó en 1,03, mientras que cuando se desagregó el resultado para el sector de empresas que reciclan residuos plásticos se obtuvo un valor de 15,07. El factor de cascada permite un análisis de los distintos flujos materiales; sin embargo, existen aspectos que pueden mejorarse para una correcta evaluación de los beneficios de la simbiosis industrial, como el reemplazo de materia prima virgen y los flujos residuales que terminan en vertedero.

Palabras clave: Factor de cascada, Economía circular, Plástico, Análisis de flujo de materiales, Reciclaje

Abstract

The transition towards a circular economy requires methodologies and proper indicators to understand resource use comprehensively. This work evaluates the material flows of an industrial symbiosis network in Mendoza, Argentina, where five companies exchange plastic wastes. A Material Flow Analysis was developed for 2021, which involved investigating the input and output flows, including municipal solid waste, plastic waste, recycled plastic pellets and resources for producing virgin plastic. The industrial symbiosis network achieved a 97% reduction in landfilled waste and recovered 602 tons of materials. The cascade factor was used as an indicator to assess circularity, and for the calculation, information on virgin raw material flows, post-consumer waste and industrial waste was

collected. In addition, recycling efficiency was considered by modifying the original indicator. When the global system was analysed, the indicator resulted in 1.03. Then the cascade factor was disaggregated for the recycling sector, and a value of 15.07 was obtained. Cascade factor provided a comprehensive analysis of the different material flows; however, some aspects could be included for a better understanding of the benefits of industrial symbiosis, such as the replacement of virgin raw materials and the amount of materials disposed of in the landfill.

Keywords: Cascade factor, Circular economy, Plastics, Material flow analysis, Recycling

Introducción

En los últimos años han cobrado popularidad entre la comunidad orientada a los estudios sobre la sustentabilidad los principios de la Economía Circular (EC), contrapuesta al tradicional enfoque lineal basado en “tomar, hacer, desechar”. La EC “es aquella que es restaurativa y regenerativa a propósito, y que trata de que los productos componentes y materias mantengan su utilidad y valor máximos en todo momento.” (Ellen McArthur Foundation, 2015). La EC fue propuesta por primera vez en China en 1998 (Zhu, 1998), y luego aceptado en 2002 como una estrategia hacia el desarrollo sustentable. La EC se basa en las escuelas de pensamiento: de la cuna a la cuna (McDonough y Braungart, 2002), Ecología Industrial (Graedel y Allenby, 1995), y biomímesis (Benyus, 2002). Aunque no hay un concepto de EC ampliamente aceptado por la comunidad científica, Kirchherr *et al.* (2017) propuso la siguiente definición: “una EC describe un sistema económico que sustituye al concepto de fin de vida por el de reducir, reusar, reciclar y recuperar materiales en los procesos de producción/distribución y consumo. Funciona a nivel micro (productos, empresas, consumidores), meso (Parques Eco-Industriales) y macro (ciudad, región, nación y más allá), con el objetivo de lograr un desarrollo sostenible, creando así simultáneamente calidad ambiental, prosperidad económica y equidad social, en beneficio de las generaciones actuales y futuras”.

Una de las estrategias por excelencia de la EC es la Simbiosis Industrial (SI), que promueve el intercambio de energía, agua, materiales y subproductos, y como consecuencia, diferentes entidades localizadas geográficamente próximas colaboran entre sí y obtienen ventajas competitivas (Chertow, 2000). La SI presenta un enfoque sistémico que identifica oportunidades empresariales que mejoran el uso de los recursos y la productividad, y así, se alcanza un desarrollo industrial más sostenible e integrado (Marinelli *et al.*, 2021). El objetivo principal de este estudio es realizar un análisis sistemático de los flujos materiales de una red de SI compuesta por 5 empresas pertenecientes a Mendoza, Argentina, así como analizar la circularidad.

Desarrollo

Análisis de Flujo de Materiales

El Análisis de Flujo de Materiales (AFM) está basado en la cuantificación de entradas y salidas (normalmente en masa) en las distintas etapas de los procesos, y permite analizar sistemáticamente los flujos y stocks en un sistema que se encuentra definido en tiempo y espacio (Ayres y Ayres, 2002). La aplicación de la metodología tiene sus variaciones dependiendo del objeto de estudio. El AFM puede estar enfocado en una sustancia en especial (por ejemplo, Cd, Cl, Pb, Zn, Hg, N, P, C, CO₂, CFC), en un material (por ejemplo, madera, plástico, biomasa) o en un producto (por ejemplo, baterías, autos) (Kytzia *et al.*, 2004). El procedimiento para realizar el AFM comienza con la definición del sistema mediante la determinación de los objetivos y los límites del sistema. En todos los tipos de análisis es necesario definir los tipos de flujos más importantes para poder realizar su cuantificación. Los límites del sistema permiten definir el inicio y el fin de los flujos que son cuantificados. El análisis de la cadena productiva permite precisar los procesos sobre los cuales se va a cuantificar las entradas y salidas utilizando el balance de masa para corroborar la exactitud de la información obtenida (Ayres y Ayres, 2002). Los resultados del AFM son calculados y presentados mediante el software libre ampliamente utilizado STAN (subSTance flow ANalysis) (Brunner y Rechberger, 2016).

Definición del sistema

El límite temporal se estableció en el año 2021. Además, se definió el límite espacial del sistema, que incluye los procesos desarrollados en cinco empresas ubicadas en Mendoza, Argentina, en los cuales se intercambian materiales plásticos que se generan durante la fase de procesamiento. Las actividades que realiza cada empresa se detallan a continuación.

La Empresa 1 es una cooperativa de recuperadores urbanos encargada de la separación y clasificación de residuos sólidos urbanos (RSU) que son generados en la Ciudad de Mendoza. Dispone de una instalación de clasificación en la que separan y recuperan 5 fracciones de materiales: plásticos, vidrio, cartón, papel y metal. La Empresa 1 recupera una mezcla de plásticos de los residuos sólidos que recibe y, desde 2020, provee de estos materiales a la Empresa 2. Debido a la falta de un mercado que los utilice, estos plásticos, tradicionalmente, eran considerados un “descarte” y se disponían en el vertedero.

La Empresa 2 se especializa en la producción de postes de plástico reciclado a partir de residuos de plástico posconsumo que los consumidores generan tras su uso (por ejemplo, los residuos domésticos). En la Empresa 2, el proceso de reciclaje consta de tres procesos principales: trituración, mezcla posterior de los plásticos y extrusión de la mezcla resultante de plásticos en postes. Este sistema de tratamiento de residuos se describió en un estudio anterior (Arce-Bastias, 2022). La cantidad de residuos generados es insignificante; la tasa de reciclaje es del 95%, lo que indica que se produce 0,95 kg de plástico reciclado por cada kg de residuos recibido.

La Empresa 3 produce cajas plásticas que abastece principalmente al mercado agrícola, cubriendo las necesidades de este producto para cosecha, exportación y bandejas de transporte. La Empresa 3 se especializa en la producción de cajas fabricadas principalmente con tres materiales: polipropileno reciclado (rPP), polietileno reciclado (rPE) y polipropileno virgen (vPP). Las cajas de plástico reciclado se obtienen procesando in situ una mezcla de residuos plásticos (30% del total de insumos) -suministrados por diferentes instalaciones informales de separación y clasificación-, y comprando pellets de plástico reciclado (54% del total de insumos) -la mitad de ellos suministrados por la Empresa 4-. Una empresa que produce pellets de vPP suministra la fracción restante (16%). El procesamiento de la mezcla de residuos plásticos consta de las siguientes etapas: trituración, separación en agua, secado, y luego extrusión. Al procesar estos residuos, una parte de los materiales se pierde durante el reciclado; la tasa de reciclado es del 90%, lo que indica que se producen 0,9 kg de plástico reciclado por cada kg de entrada de residuos. Los pellets reciclados y la mezcla de residuos plásticos procesados in situ se mezclan en proporciones iguales para producir las cajas de plástico reciclado. El residuo generado durante el proceso de extrusión se transporta a la Empresa 4 debido a que la Empresa 3 no puede reprocesarla porque su volumen supera la capacidad de su máquina trituradora. Se asumió que la generación de scrap es de 100 g por caja (Tua *et al.*, 2019).

La Empresa 4 produce dos tipos de pellets de plástico reciclado: polietileno (PE) y polipropileno (PP). Los pellets de plástico reciclado se utilizan para fabricar nuevos productos, como envases industriales, flejes, tubos, mangueras y cajas. La Empresa 4 utiliza principalmente de los residuos plásticos postindustriales, que se generan durante la fase de fabricación, ya que las impurezas de este flujo de residuos se pueden controlar y minimizar. Esta empresa procesa 1.200 toneladas de residuos plásticos industriales al año y genera 72 toneladas de residuos plásticos mixtos al año, compuestos por PP (50%) y PE (50%).

La Empresa 5 es una empresa que produce una gama completa de polipropilenos: homopolímeros, copolímeros de impacto, copolímeros random, poliolefinas especiales y compuestos de PP. La producción anual total es de 85.370 toneladas por año. Durante el proceso de fabricación se generan residuos plásticos que quedan al pie de máquina, esta clase de residuos se la denomina scrap. El término scrap hace referencia a los residuos provenientes de materia prima, materiales, producto en proceso y producto terminado defectuoso presentes en cualquier proceso industrial. El scrap tiene un valor monetario y, en general, es más fácil de reciclar porque es homogéneo en su composición y libre de impurezas. La Empresa 5 genera 310 toneladas anuales de scrap que son enviadas a la Empresa 4 para su transformación en pellets de plástico reciclado.

Modelación en el software STAN

Se modeló el caso de estudio en el software STAN, lo que resultó en 5 procesos y 33 flujos en total, ninguno de los procesos se clasificó como stock debido a que no presentan acumulación de materia. Los datos recolectados para este estudio se cargaron en el software, se reconciliaron y de este modo se obtuvieron valores matemáticamente probados que se ajustan al modelo. Posteriormente, se revisaron los balances de masa de cada proceso para asegurar que se cumpliera el principio de conservación de la materia. Los resultados del AFM se ilustraron en un diagrama Sankey utilizando el software STAN, esta figura le permite al lector evaluar rápidamente la importancia de un flujo debido a que el grosor de todos los flujos se representan proporcionalmente a su valor numérico.

Indicador

Con el fin de establecer objetivos de EC, se han definido métricas de eficiencia material, como la tasa de reciclaje, para lograr una mayor eficiencia en el uso de los recursos. En este trabajo, se seleccionó el factor de cascada (FC) (Gonçalves *et al.*, 2021; Mantau, 2015) para evaluar la circularidad de la red de SI, y se realizó una modificación del indicador. El FC incluye información sobre el flujo másico de (i) materias primas vírgenes (B^i), (ii) los residuos generados en los procesos industriales ($R_{(p,p,m)}^i$) y (iii) los residuos posconsumo utilizados para la fabricación de nuevos productos ($R_{(f,p,m)}^i$). La adaptación al caso de estudio implica la adición de la eficiencia del procesamiento (η_p) de los subproductos en la formulación matemática que se muestra en la Ecuación 1. Cuando el FC es igual a 1, las materias primas vírgenes se consumen en el sistema y los subproductos no se procesan después de salir del sistema. Sin embargo, si el FC es mayor que 1, los subproductos se utilizan como insumos para otros productos. Evidentemente, cuanto mayor sea el número de subproductos industriales reciclados o reutilizados, mayor será el FC (Gonçalves *et al.*, 2021).

$$FC_i = \frac{B^i + R_{(p,p,m)}^i \cdot \eta_p + R_{(f,p,m)}^i \cdot \eta_p}{B^i} \quad (1)$$

Resultados

Análisis de Flujo de Materiales

El AMF de la red de SI en Mendoza (Argentina) para el año 2021 se muestra en la Figura 1, y los resultados se expresan en toneladas anuales. En 2021, ingresaron 90.989 toneladas anuales de materiales a las 5 empresas y el 1% del total corresponde a entradas que provenían de otro proceso dentro de la red de SI. Además, este sistema incorporó residuos posconsumo, es decir, materiales que fueron recolectados en su fin de vida, que provinieron fuera de la red de SI y que su cantidad alcanzó las 2.531 toneladas anuales. Una de las principales ventajas de los sistemas de SI es que disminuyen la cantidad de residuos que se disponen en los vertederos, la red evaluada logró reducir en un 97% estos residuos, solo 18,3 toneladas anuales fueron enviadas al vertedero, y este sistema alcanzó a recuperar 602 toneladas anuales de materiales.

En el diagrama, el grosor de las flechas de cada flujo es proporcional al valor numérico del flujo másico, por lo que en este sistema, es evidente que la Empresa 5 tuvo la mayor producción anual y también el mayor ingreso de materia prima virgen. La Empresa 3 también recibe materia prima virgen pero en una proporción mucho menor. Las demás empresas solo utilizaron materiales plásticos provenientes de residuos posconsumo o posindustrial.

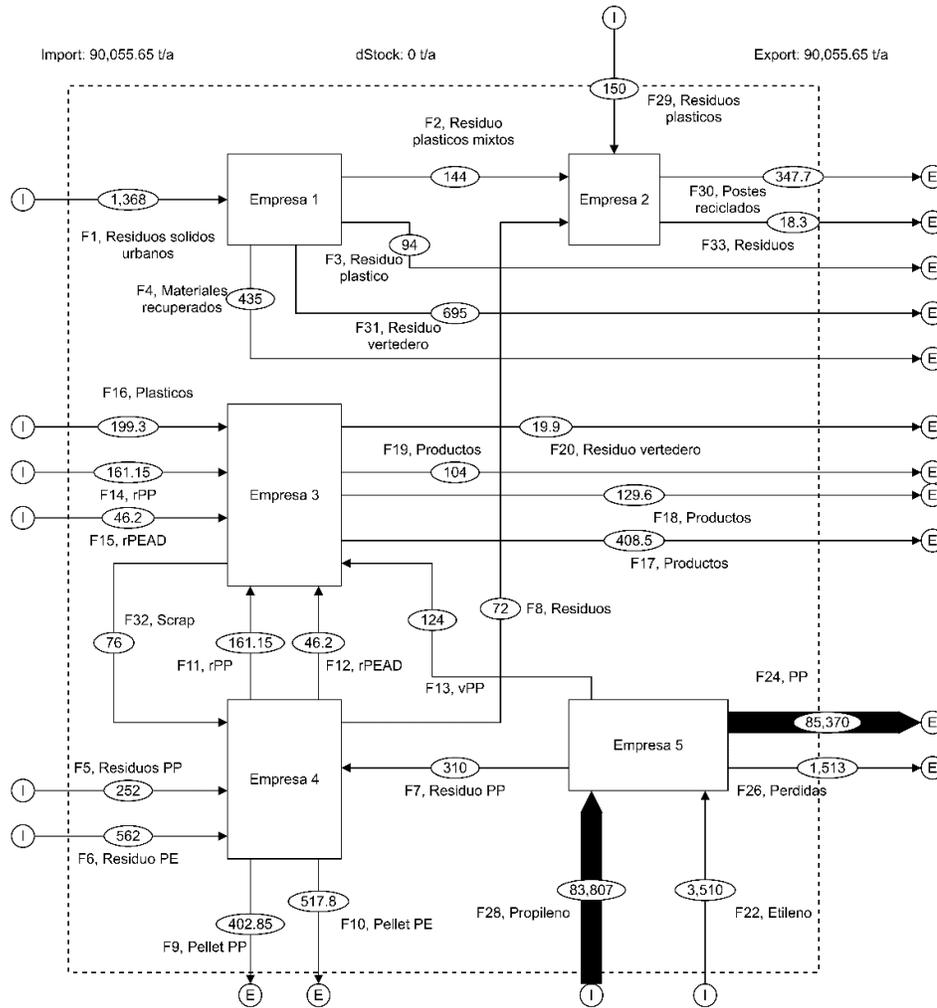


Figura 1: Análisis de Flujo de Materiales de la red de Simbiosis Industrial para el año 2021. Los flujos se expresan en toneladas por año.

Indicadores de circularidad

El FC de cascada para el sistema completo, es decir, considerando las 5 empresas, resultó en 1,03. Este resultado indicó un bajo uso en cascada de los materiales debido principalmente al alto ingreso de materia prima virgen en la Empresa 5. El valor del parámetro que considera el ingreso de materia prima (B^i) resultó mayor que los demás parámetros del indicador y se atribuye nuevamente al ingreso de materia prima de la Empresa 5. En cuanto a los demás parámetros, el ingreso de residuos posconsumo ($R_{(f,p,m)}^i$) superó al ingreso de residuos industriales ($R_{(p,p,m)}^i$) generados por las empresas involucradas en la SI.

El FC de cascada puede desagregarse para ser evaluado en un sector específico del sistema global. En este trabajo, se evaluó el indicador para el sector de industrias que se dedican específicamente al reciclaje de plástico. Este sector está comprendido por: la Empresa 2, la Empresa 3 y la Empresa 4. El FC para el sector elegido resultó en 15,7. Este valor proviene de un bajo uso de materias primas vírgenes (B^i) y de un alto uso de residuos posconsumo ($R_{(f,p,m)}^i$) y residuos industriales ($R_{(p,p,m)}^i$). Similar al caso global, el ingreso de residuos industriales fue menor al de residuos posconsumo. Además, la incorporación del rendimiento de los procesos de clasificación y reciclaje en la formulación original del indicador FC modificó los resultados finales. El indicador original, sin rendimiento, resultó en 1,04 y 16,9 para el sistema global y el sector reciclaje, respectivamente.

Conclusiones

En este trabajo, se evaluó un caso real de SI entre 5 empresas y el indicador FC fue utilizado para proveer información sobre el estado actual del sistema en cuanto al uso de recursos y el aprovechamiento de residuos plásticos. El indicador original fue modificado para incluir la eficiencia del reciclaje, esta modificación incentivará a las empresas a reducir los residuos generados durante sus procesos. Si bien el indicador seleccionado permitió evaluar correctamente el sistema, todavía existen limitaciones que deben ser mejoradas para tener una mejor comprensión de los beneficios de la SI. Uno de las mejoras debería considerar los residuos que son generados por el sistema y que terminan en un vertedero, esta incorporación permitiría cuantificar en qué medida se están reduciendo. Además, el uso de residuos en la SI para la fabricación de nuevos productos tiene como objetivo principal reemplazar a la materia prima virgen y de esta manera los materiales permanecen un mayor tiempo en el sistema de producción y consumo. Esto podría solucionarse con la formulación de un parámetro que considere el reemplazo de materia prima virgen por el de materiales reciclados. Las mejoras nombradas anteriormente ofrecerán la información adecuada sobre la cantidad disponible de materiales que se mantiene dentro de los ciclos de materiales.

Referencias

- Ayres, R. U., y Ayres, L. W. (2002). *A Handbook of Industrial Ecology*. A Handbook of Industrial Ecology. <https://doi.org/10.4337/9781843765479.00017>
- Benyus, J. M. (1997). *Biomimicry: Innovation inspired by nature*.
- Brunner, P. H., y Rechberger, H. (2016). *Handbook of Material Flow Analysis*. Boca Raton : Taylor & Francis, CRC Press, 2017. | Revised: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315313450>
- Chertow, M. R. (2000). INDUSTRIAL SYMBIOSIS : Literature and Taxonomy. *Annual Review of Energy Environment*, 25(1), 313–337. <https://doi.org/doi:10.1146/annurev.energy.25.1.313>
- Ellen MacArthur Foundation. (2015). *Growth within: a circular economy vision for a competitive europe*. Ellen MacArthur Foundation, 100.
- Gonçalves, M., Freire, F., y Garcia, R. (2021). Material flow analysis of forest biomass in Portugal to support a circular bioeconomy. *Resources, Conservation and Recycling*, 169(Under Review), 105507. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105507>
- Graedel, T.E., Allenby, B.R. (1995). *Industrial Ecology*. AT&T, Prentice Hall, New Jersey, pp. 8-10, 93-6.
- Kirchherr, J., Reike, D., y Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127(September), 221–232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- Kytzia, S., Faist, M., y Baccini, P. (2004). Economically extended - MFA: A material flow approach for a better understanding of food production chain. *Journal of Cleaner Production*, 12(8–10), 877–889. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.02.004>
- Mantau, U. (2015). Wood flow analysis: Quantification of resource potentials, cascades and carbon effects. *Biomass and Bioenergy*, 79, 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.08.013>
- Marinelli, S., Butturi, M. A., Rimini, B., Gamberini, R., y Sellitto, M. A. (2021). Estimating the Circularity Performance of an Emerging Industrial Symbiosis Network: The Case of Recycled Plastic Fibers in Reinforced Concrete. *Sustainability*, 13(18), 10257. <https://doi.org/10.3390/su131810257>
- McDonough, W., y Braungart, M. (2002). *Cradle to cradle: Remaking the way we make things*. (First edition). North point press.
- Zhu, D. J. (1998). Sustainable development calls for circular economy. *Science and Technology Journal*, (9), 39–42.