

UACM

Universidad Autónoma
de la Ciudad de México

Nada humano me es ajeno

COLEGIO DE CIENCIAS Y HUMANIDADES

MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA COMPLEJIDAD

**Modelación basada en agentes de una red del metabolismo industrial
de los desechos plásticos aplicando una economía circular.
Caso de estudio: México**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA COMPLEJIDAD

PRESENTA

Ana Belén Ríos Carmona

Directo de la Tesis

Dr. Fernando Ramírez Alatraste

Ciudad de México, septiembre de 2021.

SISTEMA BIBLIOTECARIO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE LA CIUDAD DE MÉXICO COORDINACIÓN ACADÉMICA

RESTRICCIONES DE USO PARA LAS TESIS DIGITALES

DERECHOS RESERVADOS[©]

La presente obra y cada uno de sus elementos está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor; por la Ley de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México, así como lo dispuesto por el Estatuto General Orgánico de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México; del mismo modo por lo establecido en el Acuerdo por el cual se aprueba la Norma mediante la que se Modifican, Adicionan y Derogan Diversas Disposiciones del Estatuto Orgánico de la Universidad de la Ciudad de México, aprobado por el Consejo de Gobierno el 29 de enero de 2002, con el objeto de definir las atribuciones de las diferentes unidades que forman la estructura de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México como organismo público autónomo y lo establecido en el Reglamento de Titulación de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

Por lo que el uso de su contenido, así como cada una de las partes que lo integran y que están bajo la tutela de la Ley Federal de Derecho de Autor, obliga a quien haga uso de la presente obra a considerar que solo lo realizará si es para fines educativos, académicos, de investigación o informativos y se compromete a citar esta fuente, así como a su autor ó autores. Por lo tanto, queda prohibida su reproducción total o parcial y cualquier uso diferente a los ya mencionados, los cuales serán reclamados por el titular de los derechos y sancionados conforme a la legislación aplicable.

Dedicatoria

*Dedicado a
mi familia y a Chela*

Agradecimientos

Me siento muy agradecida con la comunidad de estudiantes y profesores que conforma la maestría en Ciencias de la Complejidad. En especial quiero agradecer a mi director de tesis Fernando que siempre estuvo al pie del cañón a lo largo de esta etapa. También agradezco a José Luís y a Damián por compartir su conocimiento y experiencia. Finalmente me siento muy agradecida con Katya y Oscar que además de ser mis grandes amigos son mi admiración y ejemplo a seguir.

Resumen

Los desechos plásticos han crecido de manera acelerada sobre todo en el sector de envases y embalajes. Hay muchos estudios que proponen a la economía circular como una alternativa para la eliminación de los desechos plásticos. Además se apuntala para abrir la posibilidad de transitar hacia la sustentabilidad. Sin embargo estas aseveraciones son cuestionables. En este sentido, los objetivos de esta investigación son cuantificar el alcance de la economía circular y proponer una alternativa del manejo de los residuos plásticos. Se utiliza un modelo basado en agentes tomando un metabolismo industrial del sector de envases y embalaje del plástico en México. La metodología basado en un pensamiento sistémico consta de varias partes: 1) A partir del metabolismo industrial del sector de envases y embalaje del plástico se sustrae un red para aplicar análisis el flujo de materia (AFM). 2) Se calculan las medidas de centralidad de la red de flujo de materia. 3) Finalmente, se propone un modelo basado en agentes (MBA) con diferentes escenarios los cuales se van a comparar en función de los datos reales de México con el fin de obtener el mejor escenario. Los resultados se dividen en dos partes. En primer lugar se obtiene el número de ciclos, es decir, el tiempo que la materia (plástico) se puede reusar o reciclar antes de ser desechada. Y en segundo lugar, la concentración de la materia en los nodos atractores, esto se refiere al porcentaje de materia que termina en el destino final. Uno de los resultados más importantes a los que se llegó es que más que invertir en mayores y mejores tecnologías se deben de concentrar los esfuerzos en aumentar primeramente en la tasa de reuso y en consecuencia la tasa de reciclado. Como conclusión, la economía circular solo mitiga el problema de los desechos plásticos en el corto- mediano plazo, pero no es una estrategia suficiente para el largo plazo y

IV

mucho menos para transitar hacia la sustentabilidad.

Índice general

| | |
|---|-----|
| Dedicatoria | I |
| Agradecimientos | II |
| Resumen | III |
| Lista de figuras | VII |
| Lista de tablas | IX |
| 1. Introducción | 1 |
| 2. Marco Teórico | 8 |
| 2.1. ¿Qué es la economía circular? | 8 |
| 2.1.1. Ecología Industrial | 10 |
| 2.2. Los sistemas complejos | 12 |
| 2.3. Sustentabilidad como propiedad emergente | 16 |
| 2.4. Herramientas de la Complejidad | 21 |
| 2.4.1. Representación Gráfica: Redes | 21 |
| 2.4.2. Modelo Basado en Agentes (MBA) | 25 |
| 3. Formulación del Problema | 28 |
| 3.1. Justificación | 28 |
| 3.2. Objetivo general | 28 |
| 3.2.1. Objetivos específicos | 29 |

| | |
|---|-----------|
| 3.3. Pregunta de investigación | 29 |
| 3.4. Hipótesis | 29 |
| 4. Descripción de la tecnología disponible | 30 |
| 4.1. Reciclaje | 31 |
| 4.1.1. Reciclaje Mecánico | 31 |
| 4.1.2. Reciclaje Químico o Despolimerización | 32 |
| 4.2. Reuso | 34 |
| 4.3. Recuperación Energética | 34 |
| 5. Caso estudio: México | 37 |
| 6. Metodología | 45 |
| 6.1. Modelo | 45 |
| 6.1.1. Elementos | 48 |
| 6.1.2. Escenarios | 48 |
| 6.2. Datos | 50 |
| 7. Resultados y Discusión | 51 |
| 7.1. Análisis de la red del metabolismo industrial | 51 |
| 7.2. Análisis de Medidas de Centralidad | 54 |
| 7.3. Análisis del MBA | 59 |
| 7.3.1. Ciclos | 59 |
| 7.3.2. Nodos Atractores | 66 |
| 7.4. Síntesis Final | 76 |
| 8. Conclusiones | 79 |
| 9. Recomendaciones | 81 |
| A. Características de los tipo de plásticos | 83 |
| B. Fuentes consultada para la red del metabolismo industrial | 85 |
| C. Código del modelo basado en agentes | 88 |

| | |
|---|-----------|
| D. Tabla de la red del flujo de materia del metabolismo industrial | 92 |
|---|-----------|

| | |
|---------------------|-----------|
| Bibliografía | 92 |
|---------------------|-----------|

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| 1.1. Producción Mundial de Plástico Elaboración propia con base en datos de Ritchie and Roser (2018) | 2 |
| 1.2. Destino porcentual de los desechos plástico Elaboración propia con base en datos de Ritchie and Roser (2018) | 4 |
| 2.1. Esquema de una economía circular Tomado de McArthur Foundation | 9 |
| 2.2. figura obtenida de Sayama (2015) | 15 |
| 2.3. Diagrama de Venn de la Sustentabilidad | 18 |
| 2.4. Ejemplo de una red dirigida | 22 |
| 2.5. Modelo basado en agentes de una Red Dirigida de Difusión Tomado de la Biblioteca de Modelos de NetLogo (Wilensky, 1999) | 27 |
| 4.1. Esquema del proceso de producción del plástico Tomado de: Clift (1997) | 30 |
| 5.1. Mapeo sectorial de la industria del plástico en México Elaboración propia con base en datos de INEGI | 38 |
| 5.2. Generación de residuos sólidos urbanos por tipo de localidad | 39 |
| 5.3. Generación de residuos sólidos en México (1994-2014) | 40 |
| 5.4. Disposición final de residuos sólidos | 42 |
| 5.5. Cotidianidad en el uso del plástico Fotos tomadas por Ríos M.(2020) | 44 |
| 6.1. Componentes para manipular el modelo | 47 |
| 7.1. Red del metabolismo industrial del sistema socio-económico y ambiental | 52 |

| | |
|---|----|
| 7.2. Red de flujo de materia | 53 |
| 7.3. Centralidad de Grado de Red de Flujo de Materia | 55 |
| 7.4. Centralidad de Intermediación de Red de Flujo de Materia | 57 |
| 7.5. Centralidad de Cercanía de Red de Flujo de Materia | 58 |
| 7.6. Número de ciclos promedio en relación con la tasa de reciclado | 61 |
| 7.7. Ciclos en función de N <i>Las gráficas de bigotes tienen la cualidad de</i> <i>mostrar una mejor visualización de los datos y de las medidas de</i> <i>tendencia central. Las gráficas de dividen en cuartiles. Las cajas de</i> <i>colores muestran las distribución de los datos de la diferencia entre</i> <i>el valor del tercer cuartil y el primer cuartil; la línea horizontal que</i> <i>resalta es la mediana y es la media. Los bigotes representan el límite</i> <i>superior y el límite inferior; los puntos que están fuera de este ran-</i> <i>go son valores atípicos. Los puntos rojo que están fuera de la caja</i> <i>representa la desviación estándar.</i> | 63 |
| 7.8. Comparación de la evolución de los ciclos entre los diferentes escenarios | 65 |
| 7.9. Nodo atractor Incineración para los diferentes escenarios | 67 |
| 7.10. Nodo atractor Océano para los diferentes escenarios | 68 |
| 7.11. Nodo atractor Tiradero a Cielo Abierto para los diferentes escenarios | 69 |
| 7.12. Nodo atractor Relleno de Tierras Controladas para los diferentes es- cenarios | 70 |
| 7.13. Nodo atractor Rellenos Sanitarios para los diferentes escenarios | 71 |
| 7.14. Nodo atractor Mundo para los diferentes escenarios | 72 |
| 7.15. Nodo atractor Otros Sectores para los diferentes escenarios | 74 |
| 7.16. Nodo atractor Combustible Reciclado para los diferentes escenarios | 75 |

Índice de cuadros

| | |
|--|----|
| 2.1. Principales corrientes de las Teorías Clásicas del Pensamiento Sistémico Tomado de Capra and Luisi (2014) | 13 |
| 4.1. Tipos de plásticos, uso antes y después de ser reciclados | 33 |
| 6.1. Datos empleados para el Análisis de Flujo de Materia | 50 |
| 7.1. Tabla de equivalencia entre los ciclos del MBA y los años | 60 |
| 7.2. Cuadro resumen de resultados | 76 |

Capítulo 1

Introducción

Uno de los grandes retos que enfrentan todos los países en el mundo es el manejo de los desechos plásticos generados por el sistema de producción y consumo en el que estamos inmersos actualmente. En el 2010, tan solo cinco países: China, Estados Unidos, Alemania, Brasil y Japón,¹ concentraban un 50 % los desechos plásticos. En los últimos cincuenta años, la producción de plástico ha crecido de forma exponencial como se muestra en la figura 1.1. Desde la década de los sesentas la producción del plástico no se ha desacelerado, en el año 2015 se estimó que se produjo en el mundo un aproximado 381 millones de toneladas de plástico.

¹Datos tomados de Ritchie and Roser (2018)

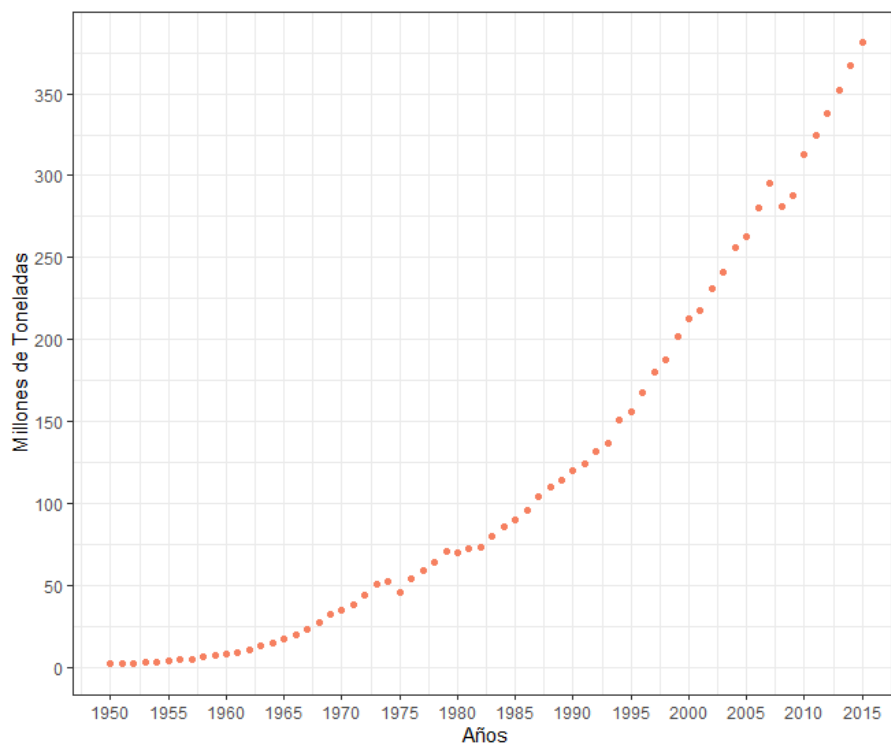


Figura 1.1: Producción Mundial de Plástico
Elaboración propia con base en datos de [Ritchie and Roser \(2018\)](#)

Según datos de [Bourguignon \(2017\)](#) si se continúa con este ritmo de producción de plástico, para el 2036 será el doble y se cuadruplicará para el 2050. Se pueden encontrar alrededor de 1000 tipos de plásticos de los cuales el 90 % son derivados de combustibles fósiles. La producción del plástico es parte de la industria petroquímica la cual está acaparada por un oligopolio de grupos petroleros² y compañías químicas ([Chalmin, 2019](#)).

El plástico juega un papel muy importante pues se encuentra inmerso en gran parte de las actividades económicas debido algunos de los sectores más importantes son la construcción, el transporte, los electrónicos, los textiles, automotriz y de envase y embalaje. Sin embargo, en el 2015, este último generó el 47 % de los desechos totales; uno de los agraviantes es que la mayor parte de los empaques de plástico tienen una vida útil promedio de seis meses ([Geyer et al., 2017](#)). Los envases y embalajes son parte de nuestra cotidianidad son producto como vasos desechables, bolsas

²Exxon, Chevron, Shell, Aramco, British Petroleum, etc.

desechables, contenedores de leche, envases para detergentes, botellas de champú, botellas de agua, etc., en la mayoría de los casos una vez terminado el producto son desechados.

La enorme entrada de recursos al sistema de producción acaba convirtiéndose en residuos que solo en escasa medida son objeto de recuperación o reciclaje, haciendo que la acumulación³ de residuos sea el principal problema de política ambiental (Naredo, 2010). Aunado a esto, los desechos plásticos enfrentan el problema de que son difíciles de reciclar debido a que cuentan con una amplia variedad de usos, aditivos y mezclas. Además está el hecho de que la mayor parte de los materiales solo se puede reciclar un número limitado de veces, eso sin contar con las altas tasas de contaminantes que produce este proceso (Brooks et al., 2018). Sin embargo, en los últimos años se ha intentado concientizar a las industrias y a los consumidores del impacto social y ambiental que producen estos desechos. Solo se ha logrado, en un periodo de 1980 a 2015, que la tasa de reciclado a nivel mundial sea en promedio de un 20 % del total de desechos que hay en el mundo; como se puede apreciar en la figura 1.2. El resto de los desechos plásticos están destinados a ser incinerados o bien a ser desechados al océano o a vertederos. En 2013, se registró que aproximadamente hay 268,950 toneladas de plástico en los océanos de los cuales un poco más del 40 % se concentra en el Océano Pacífico⁴.

³En 2015 la acumulación estimada de desechos plástico ascendía a 7,823 millones de toneladas (Geyer et al., 2017).

⁴Véase en: Ritchie and Roser (2018)

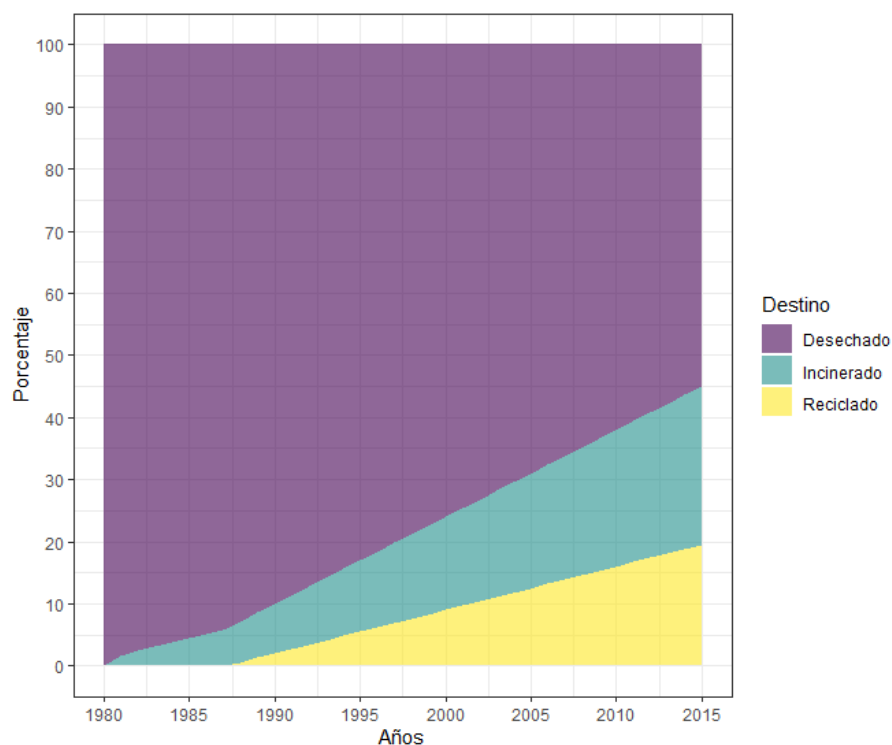


Figura 1.2: Destino porcentual de los desechos plásticos
Elaboración propia con base en datos de [Ritchie and Roser \(2018\)](#)

El plástico es un material con muchas cualidades entre ellas es durable, versátil y sobre todo es de bajo costo producirlo ([Bourguignon, 2017](#)). A pesar de ello, hoy en día el plástico es víctima de su propio éxito, pues se ha convertido en un símbolo de la crisis de la sociedad actual y uno de los principales desafíos que se enfrentan en el siglo XXI ([Chalmin, 2019](#)).

Para efectos de esta investigación se realizó una búsqueda que se basó en publicaciones recientes o publicaciones con alto impacto; este último criterio estaba en función del número de citas que contabilizaba el buscador de *Google Académico*. La búsqueda se hizo a partir del tema de investigación: sin embargo las publicaciones encontradas se pueden agrupar en tres ejes temáticos principalmente: Aplicaciones de la economía circular, Metodologías empleadas en el manejo de residuos y Modelos Basados en Agentes con aplicación en el tema de estudio.

En el caso de las aplicaciones de la economía circular (EC) se encontró en la literatura que la EC es un nuevo paradigma, no solo para los desechos plásticos, sino

para transitar hacia la sustentabilidad (Prieto-Sandoval et al., 2017). Esta reciente corriente teórica, se encuentra en boga a nivel mundial, dado que es un modelo de negocio muy atractivo para los empresarios y consumidores. Países como China e India han aplicado la EC como parte de sus políticas públicas con resultados aparentemente exitosos (Geng and Doberstein, 2008; Goyal et al., 2018; Tong et al., 2018), incluso grandes corporaciones como Coca Cola o Apple la está llevando a cabo (Kumar et al., 2012). Por otro lado, hay evidencia en el estudio realizado por Van Eygen et al. (2018) que muestran como limitante de la economía circular aplicado al plástico de envases y embalajes que cuando se aplica el reciclaje mecánico no se cumple con el objetivo general de la EC: mantener los materiales en la economía y evitar pérdidas, a pesar de que la Unión Europea tiene altísimas tasas de reciclado de este material.

Por su parte, en el rubro de las metodologías empleadas en el manejo de residuos se encontraron trabajos como el de Giannis et al. (2017), que utiliza un enfoque basado en las Ciencias de la Complejidad y aplica un modelo de Dinámica de Sistemas donde evalúa diferentes escenarios del reciclaje de desechos sólidos en el caso de Singapur. Otra de las metodologías encontradas en el estudio de envases y embalajes plásticos es el Análisis de Flujo de Materia (AFM) aplicada en los trabajos de Brouwer et al. (2018) y Van Eygen et al. (2018), en el caso de Holanda y Austria, respectivamente. Dentro del área del estudio del manejo de residuos sólidos la Evaluación del Ciclo de Vida del producto se ha desarrollado ampliamente. Arena et al. (2003) utiliza dicha metodología para el caso de Italia en el sistema de reciclaje de productos de plástico utilizados para envases y embalaje, mientras que Nakamura and Kondo (2002) utiliza esta misma metodología aplicando un modelo híbrido de Insumo Producto para los residuos sólidos para el caso de Japón.

Los trabajos que se encontraron que utilizaban una Modelación Basada en Agentes aplicado al manejo de residuos sólidos, economía circular o residuos plásticos fue escasa y fue nulo para el caso de América Latina. Las investigaciones en su mayoría están enfocados al manejo de residuos sólidos y al análisis en el comportamiento de los individuos en el manejo de residuos. Debido a los fuertes impactos ambientales

se ha vuelto preponderante mejorar el manejo de residuos sólidos, por tal motivo [Ding et al. \(2018\)](#) hicieron en su trabajo un estudio comparativo entre un MBA y un Modelo de Dinámica de Sistemas, ya que según estos autores ambos enfoques resultan ideales para el análisis y mejoramiento de resultados en el estudio del sistema complejo que es el manejo de residuos. Mientras que [Nguyen-Trong et al. \(2017\)](#), se centraron en el análisis de optimización del transporte de residuos sólidos integrando tres diferentes enfoques: análisis de Sistema de Información Geográfica, un Modelo Basado en Ecuaciones y un Modelo Basado en Agentes. Por su parte, [Scalco et al. \(2017\)](#) y [Tong et al. \(2018\)](#) se enfocaron en analizar el comportamiento de los individuos, aplicando un Modelo Basado en Agentes para investigar los determinantes que pueden inducir a los miembros de los hogares a aumentar la participación en prácticas de reciclado de residuos sólidos con base en la actitud individual de cada agente y sobre las normas sociales existentes.

En este trabajo lo que se plantea es una visión sistémica de los residuos plásticos provenientes de envase y embalaje basada en los sistemas complejos. El tema de los desechos plásticos, tiene un alto grado de complejidad, dada su naturaleza se encuentran interacciones en las esferas sociales, económicas y ambientales. Nos enfrentamos a sociedades de consumo donde el usar y desechar el producto es parte de la cotidianidad⁵. Los sistemas económicos son lineales⁶ y programados para que la vida útil del producto sea muy corta⁷. Los recursos naturales son finitos y el ritmo de explotación está superando los límites ecológicos⁸.

La propuesta que sugiere esta investigación es modelar y analizar una red del metabolismo industrial⁹ que refleje una economía circular del reciclaje del plástico de envases y embalajes, tomando como caso de estudio México. A partir de dicha red se hace un análisis de flujo de materia (AFM); se utiliza un modelo basados en agen-

⁵Aproximadamente un poco menos del 50% de los desechos plásticos están relacionados con productos desechables

⁶Se entiende como una economía lineal al modelo de “Tomar- Hacer y Desechar”.

⁷También conocido como obsolescencia programada

⁸... la única característica que diferencia a la humanidad de todas las otras especies... es que somos la única especie que en su evolución ha violado los límites biológicos ([Georgescu-Roegen 1994](#))

⁹En el apartado [2.1.1](#) se expone de forma ampliada el concepto.

tes (MBA) que se realizó utilizando el software de NetLogo (Wilensky, 1999). Se proponen varios escenarios posibles con el fin de compararlos con el escenario real, que cuenta con datos de México y contribuir en una propuesta que pueda mejorar el manejo de los desechos plásticos. Se concluye en este trabajo que es imperante repensar el modo de producir y consumir productos de plástico, dado que la economía circular es una sola una posibilidad para mitigar el problema en el corto- mediano plazo, pero no es una medida suficiente para transitar hacia la sustentabilidad.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. ¿Qué es la economía circular?

La economía circular (EC) es un modelo que propone crear patrones de producción cerrados dentro de un sistema económico, con el propósito de aumentar la eficiencia del uso de recursos y sobre todo la reutilización de desechos urbanos e industriales. Este enfoque se basa por tres corrientes principalmente: la Economía Ecológica, la Economía Ambiental y la Ecología Industrial (Goyal et al., 2018), esta última se va a desarrollar más adelante. A pesar de que no hay un dato preciso de cómo nació este concepto algunos autores como Geissdoerfer et al. (2017); Ghisellini et al. (2016); Winans et al. (2017) coinciden que fue a partir del trabajo de Pearce and Turner (1990).

La EC surge ante el inminente agotamiento de recursos naturales necesarios para el abastecimiento de las economías (Ghisellini et al., 2016). La idea central es cambiar de un modelo lineal (“tomar, hacer y desechar”) a procesos de ciclos más sostenibles que involucren el reciclaje y el reuso de productos; de esta manera se logra crear sistemas autosuficientes¹, tal como se describe en la figura 2.1, la cual ilustra el concepto de economía circular de forma general.

¹Véase en: <https://complexitylabs.io/wp-content/uploads/2018/08/Circular-Economy.pdf>

sea la ganancia económica sino sociedades más justas y ambientalmente saludables.

2.1.1. Ecología Industrial

La ecología industrial es una de las disciplinas en las que se basa la economía circular. El desarrollo de este concepto fue impulsado por las preocupaciones sobre el impacto humano en el medio ambiente y la evidente separación de los sistemas industriales con los sistemas naturales.

...estamos acostumbrados a considerar el sistema industrial como algo separado de la biosfera, con fábricas y ciudades de un lado y la naturaleza del otro, el problema consiste en intentar minimizar el impacto del sistema industrial en lo que está 'fuera' de él: su entorno, el "medio ambiente" ... La ecología industrial explora el supuesto opuesto: el sistema industrial puede verse como un cierto tipo de ecosistema. Después de todo, el sistema industrial, al igual que los ecosistemas naturales, puede describirse como una distribución particular de materiales, energía y flujos de información. Además, todo el sistema industrial depende de los recursos y servicios proporcionados por la biosfera, de la que no se puede disociar (Erkman, 1997).

Esta área del conocimiento está en proceso de construcción pues trae consigo un conjunto de conceptos, herramientas, metáforas y aplicaciones y objetivos. Algunos aspectos del campo tienen relaciones bien definidas, mientras que otros elementos solo se agrupan de manera vaga (Lifset and Graedel, 2002). Sin embargo, esto en lugar de ser un defecto se convierte en una virtud debido a que nos brinda la oportunidad de entablar una discusión entre las diferentes áreas del conocimiento epistemológicamente desarrolladas.

La ecología industrial se puede resumir como las interacciones e interrelaciones físicas, químicas y biológicas, dentro de los sistemas industriales, naturales, sociales (Torre-Marín et al., 2009). Uno de los objetivos de la ecología industrial es comprender cómo funciona el sistema industrial como un sistema interactivo, cómo se puede

regular y cómo interactúa con la biosfera y otros sistemas industriales. Otra de las motivaciones de esta disciplina es utilizar a los sistemas naturales como modelos del sistema creado por el hombre en términos de uso eficiente de recursos, energía y desechos (Johansson, 2002).

A continuación se expondrá de forma más amplia el concepto de metabolismo industrial pues la comprensión de su estructura y su funcionamiento resulta el núcleo de la ecología industrial (Bringezu and Moriguchi, 2018).

Metabolismo Industrial

La idea del metabolismo industrial surge desde la Ecología Industrial partiendo de una analogía entre los organismos biológicos y las actividades industriales³.

La palabra metabolismo, tal como se usa en su contexto biológico original, connota los procesos internos de un organismo vivo. El organismo ingiere materiales ricos en energía y de baja entropía, para proporcionar su propio mantenimiento y funciones, así como un excedente para permitir el crecimiento y la reproducción. El proceso también implica necesariamente la excreción o exhalación de residuos, que consisten en materiales degradados de alta entropía (Ayres, 1998).

De forma semejante el metabolismo en un sentido de las actividades industriales se va a definir como el conjunto integrado de procesos físicos que convierten las materias primas y la energía, junto con la mano de obra, en productos terminados y a su vez residuos (Ayres, 1998). Se necesita entender al sistema industrial como un organismo vivo, que se alimenta de recursos naturales, materiales y energía, los digiere en productos y los evacua en desechos (Johansson, 2002). Por lo tanto, el concepto de metabolismo industrial, se puede definir como el flujo de materiales que está en los sistemas industriales para su transformación y posteriormente para su disposición como residuos (Torre-Marín et al., 2009).

³La concepción de metabolismo industrial se puede aplicar en diferentes escalas: mundial, nacional, regional, por industria, por rama o por empresa (Johansson, 2002)

Esta analogía entre metabolismo biológico y metabolismo industrial tienen diferencias preocupantes. En primer lugar la disparidad en las densidades y flujos de energía y materiales y la falta de un productor primario (análogo a los organismos fotosintéticos) en la industria. Y en segundo lugar, en los sistemas naturales algunos nutrientes fluyen en circuitos cerrados con un reciclaje casi perfecto. Mientras que los sistemas industriales en su mayoría son disipativos⁴, lo que lleva a concentraciones de materiales demasiado bajas para que valga la pena su recuperación, sin embargo son altamente contaminantes (Johansson, 2002).

Análisis de Flujo de Materia (AFM)

El análisis de flujo materia es una de las herramientas empleadas para analizar el metabolismo industrial. El AFM se refiere al análisis del rendimiento de las cadenas de procesos que comprenden la extracción o cosecha, la transformación química, la fabricación, el consumo, el reciclaje y la eliminación de materiales (Bringezu and Moriguchi, 2018). Se basa en cuentas en unidades físicas (generalmente en términos de toneladas) que cuantifican las entradas y salidas de recursos masa de una economía, región, país, compañía, industrias, etc. (Torre-Marín et al., 2009).

2.2. Los sistemas complejos

La Ciencia de la Complejidad en el sentido más ambicioso pretende llegar al holismo del conocimiento contemporáneo, donde las ciencias exactas, naturales, humanísticas y sociales se convierten en una sola ciencia; es decir lo que se pretende es llegar a la indivisibilidad científica. Gershenson (2013) parte de la etimología de la palabra Complejidad que viene del latín plexus que significa entretejido. La visión holística de la ciencia también se le conoce como pensamiento sistémico. Esta forma de ver el mundo surgió en la década de los veinte en Europa. La biología fue la primera ciencia donde se observó por primera vez fenómenos sistémicos y complejos (Capra and Luisi, 2014). El Cuadro 2.1 muestra un resumen de las teorías clásicas de los

⁴Sistema que no conserva su energía debido a pérdidas por fricción u otras causas.

sistemas, en dichas teorías se basa la epistemología de los sistemas complejos ⁵.

| Principales corrientes de las Teorías Clásicas del Pensamiento Sistémico | |
|---|--------------------------------|
| Autor | Teoría |
| Alexander Bogdanov (1873- 1928) | Tektología |
| Ludwing von Bertalanffy (1901- 1972) | Teoría General de los Sistemas |
| Norbert Wiener (1894- 1964) | Cibernética |

Cuadro 2.1: Principales corrientes de las Teorías Clásicas del Pensamiento Sistémico Tomado de Capra and Luisi (2014)

Estos iniciadores del pensamiento sistémico tenían solo una intuición empírica, pues las herramientas matemáticas y técnicas no eran lo suficientemente poderosas para demostrar sus teorías. Sin embargo, después de la década de los setentas hubo un *boom* tecnológico donde el poder de las computadoras apareció haciendo posible modelar fenómenos complejos, que anteriormente era imposible visualizar. A la par, el área de la matemática se desarrolló a lo que hoy conocemos como *Teoría de los Sistemas No Lineales* (Capra and Luisi, 2014).

La implicación más grande del descubrimiento de los sistemas complejos es la superación de la ciencia reductiva, mecanicista y lineal en el estudio de los procesos para los que esa ciencia es insuficiente o inadecuada. La teoría de los sistemas complejos demuestra que *el todo es más que la suma de sus partes*. A diferencia de lo que dice el enfoque tradicional que el efecto de una perturbación es directamente proporcional a la dimensión que este tenga (sistemas simples), la teoría de los sistemas complejos demuestra que una pequeña perturbación en el sistemas puede generar efectos desproporcionados (sistemas no lineales). Los sistemas dinámicos no- lineales se han aplicado al estudio de sistemas sociales, ecológicos, biológicos, físicos, económicos,

⁵Para un mapa más extenso, ver https://www.art-sciencefactory.com/complexity-map_feb09.html

psicológicos es por eso que la Ciencia de la Complejidad ha permeado en diferentes áreas del conocimiento y ha tenido una buena aceptación entre la comunidad científica; además el alcance que se puede tener al estudiar los sistemas complejos es mayor.

Los sistemas complejos no tienen una definición aceptada universalmente, sin embargo, [Mitchell \(2009\)](#) hace una una aproximación definiéndolos como “un campo de investigación interdisciplinario que busca explicar cómo un gran número de entidades relativamente simples se organizan, sin el beneficio de ningún controlador central, en un todo colectivo que crea patrones, utiliza información y, en algunos casos, evoluciona y aprende..otra aproximación, es la de [Espinosa et al. \(2011\)](#) que define a un sistema complejo como “un sistema abierto cuyos elementos interactúan de forma dinámica y no lineal, tienen comportamientos impredecibles y son afectados de forma positiva y negativa por las interacciones internas y externas.”

Los sistemas complejos se han valido de herramientas conceptuales, matemáticas y computacionales para describir sistemas. Además se han dedicado a estudiar las propiedades estructurales y dinámicas de diversos sistemas para obtener implicaciones y aplicaciones generales e interdisciplinarias ([Sayama, 2015](#)). La figura [2.2](#) esquematiza las raíces temáticas y conceptuales en lo que se basan los sistemas complejos.

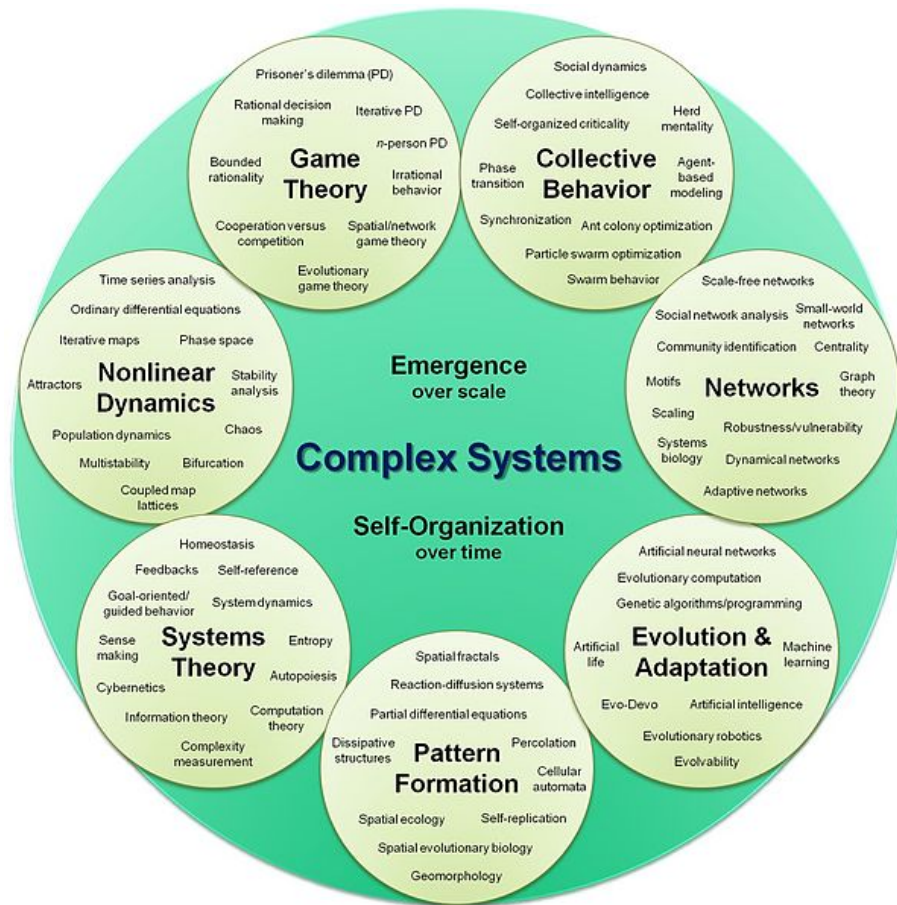


Figura 2.2: figura obtenida de [Sayama \(2015\)](#)

A partir de estas interacciones individuales nacen propiedades emergentes que no se pueden observar en lo individual sino en lo colectivo siendo capaces de autoorganizarse. La autoorganización se refiere a que existen propiedades que brotan de las interacciones individuales de varios elementos similares y generan un orden o cambio de patrón espontáneo sin que exista un plan predefinido ni un control central. La autoorganización se presenta en muchos fenómenos y en diferentes escalas de organización, por ejemplo procesos sociales donde los elementos individuales participan para dar lugar a conductas cooperativas y colectivas ([Cocho, 2017](#)). Y la emergencia o propiedad emergente del sistema se refiere a un proceso mediante el cual el sistema adquieren propiedades cualitativamente nuevas que no se pueden entender como la simple adición de sus contribuciones individuales, en otras palabras, la propiedad emergente es atributos del sistema que surgen de las interacciones de los componentes del sistema y que no son explicables por el comportamiento de los

componentes individuales del sistema o la suma de los componentes que actúan como individuos⁶. Algunos ejemplos de sistemas complejos son el cerebro humano, las parvadas de aves, los bancos de peces o comunidades de hormigas⁷. La economía en sí es un sistema complejo. Las sociedades, en general, son sistemas complejos; vistas de esa manera, es posible tratar de comprender las migraciones, la delincuencia o la violencia colectiva. Otro sistema complejo donde es claro que convergen sistemas sociales, económicos y ambientales son las ciudades⁸.

2.3. Sustentabilidad como propiedad emergente

Desde finales del siglo XX la humanidad está en un espiral confuso y difícil de enfrentar donde hay ciudades colapsadas, biodiversidad irrecuperable, devastación ambiental, desigualdad social, pobreza, hambruna, migraciones masivas, crisis económicas y el latente calentamiento global; en otras palabras vivimos en la era del antropoceno. Ante esta bola de nieve de problemas a principios de la década de los setentas el Club de Roma encargó al Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) hacer un estudio ambiental; dicho estudio lo dirigió la Dra. Donella Meadows, como resultado de la investigación se obtuvo un trabajo titulado *Los límites del crecimiento*⁹. Este documento es un parte aguas para la concepción de la relación hombre-naturaleza y sobre todo que vivimos en un mundo con recursos finitos. Sin embargo, en 1987 cuando se definió, en el Reporte de Brundtland, el concepto de desarrollo sustentable como aquel “que satisfaga las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades (WCED, 1987).” La urgencia para encontrar nuevos paradigmas se debe a que los enfoques *clásicos* de desarrollo no están teniendo resultados, además presentan tendencias autodestructivas, donde el ser humano explota sus recursos basándose únicamente en el criterio

⁶Véase en: [Institute \(2020\)](#)

⁷Véase en Miramontes Vidal, O. (2000). Orden y caos en la organización social de las hormigas. Ciencias, (059).

⁸Véase en Bettencourt, L. M. (2015). Cities as complex systems. Modeling complex systems for public policies, 217-238.

⁹Véase en Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., Behrens, W. W. (1972). Los límites del crecimiento: informe al Club de Roma sobre el predicamento de la humanidad. Fondo de cultura económica.

de crecimiento económico (Espinosa et al., 2011). Georgescu- Roegen, padre de la Economía Ecológica, hace una crítica a la economía moderna y la forma en como esta explota los recursos naturales.

La epistemología mecanicista es responsable de un pecado aún mayor de la economía moderna, el de la total ignorancia que juegan los recursos naturales en el proceso económico. Hablamos de tierra, efectivamente, pero solo en el sentido Ricardiano, es decir, como el arquetipo de un factor de producción del tipo de fondo (stock). A pesar de ello toda la historia... prueba sin la menor duda que el control sobre los recursos ha sido la fuerza conductora de los grandes movimientos de personas y de todos los conflictos entre naciones (Georgescu-Roegen, 1994).

El desarrollo sustentable tiene como pilar fundamental incorporar tres esferas: el social, el ecológico y el económico; tal como se esquematiza en la figura 2.3. En el aspecto económico: economías más eficientes, en lo social: sociedades con una mejor calidad de vida tanto en lo individual como para la comunidad y en lo ecológico: conocer y apegarse a los principios ecológico y biológicos. Al interactuar cada una de estas esferas se esperan ambientes más equitativos social y económicamente, viables en el sentido de que haya una eficiencia y minimización en el uso de los recursos. Finalmente soportable porque son ambientes seguros y saludables (Torre-Marín et al., 2009).

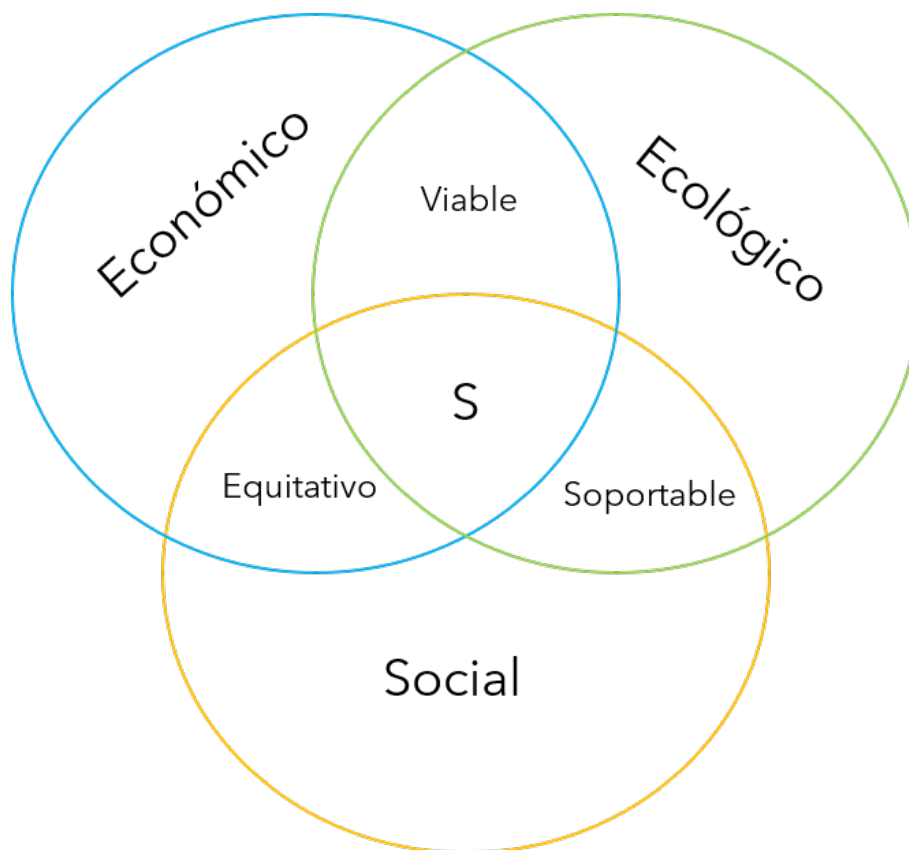


Figura 2.3: Diagrama de Venn de la Sustentabilidad

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) propone *17 Objetivos para el Desarrollo Sostenible* (Naciones Unidas, 2018), estos objetivos están en torno a los tres ejes de desarrollo de la sustentabilidad entre los que resalta lo siguiente:¹⁰

- Erradicación de la pobreza en todas sus formas y dimensiones
- Crecimiento económico sostenible, inclusivo y equitativo
- Promover la ordenación integrada y sostenible de los recursos naturales y los ecosistemas

El reto que tiene la sustentabilidad es ¿cómo hacerlo? Los objetivos están claros, pero la ruta es incierta. Esta lógica fundamental de la sustentabilidad de la incorporación de las tres esferas, hace que el camino sea ambiguo, pues cada esfera tiene sus propias características y su grado de complejidad, pero otra de las característi-

¹⁰Véase en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>

cas de los sistemas complejos es la multiplicidad de soluciones. Hasta ahora el gran problema con el que se ha enfrentado la sustentabilidad es la aproximación reduccionista, que excluye una esfera de la otra. En ese sentido surge el cuestionamiento de ¿cómo el desarrollo sustentable promueve el crecimiento económico sin esperar que haya devastación ambiental? o ¿cómo el desarrollo sustentable pretende erradicar la pobreza desde una estructura capitalista?

La característica sobresaliente de la mayoría de los modelos económicos actuales, ya sea promovidos por economistas en el gobierno, en el mundo corporativo o en la academia, es su suposición de que el crecimiento económico perpetuo es posible. El objetivo de la mayoría de las economías nacionales es lograr un crecimiento ilimitado de su PIB... A pesar de que ahora debería ser muy claro que la expansión ilimitada en un planeta finito solo puede conducir al desastre. Las necesidades humanas son finitas, pero la codicia humana no lo es, el crecimiento económico generalmente puede mantenerse a través de la creación artificial de necesidades por medio de la publicidad. Los bienes que se producen y venden de esta manera a menudo son innecesarios y, por lo tanto, son esencialmente desechos. La contaminación y el agotamiento de los recursos naturales generados por estos enormes desperdicios se ven agravados por el desperdicio de energía y materiales en procesos de producción ineficientes (Capra and Luisi, 2014).

Es necesario romper con paradigmas mercantilistas y mecanicistas. Para ello, se debe tener conocimiento de los aspectos globales y locales así como entender la forma como se relacionan (Gallopín, 2003). Ludwig von Bertalanffy fue de los pioneros en observar estas tres esferas como sistemas, en donde su principal característica es la interacción entre los componentes (Ghisellini et al., 2016). La importancia en analizar, desde un enfoque sistémico, no recae en los sistemas per se, sino en las interacciones que se dan entre ellos. La manera de hacerlo es encontrando variables que unan el sistema natural (biodiversidad, ecosistemas, hábitats, etc.) con el sistema humano (procesos socio-económicos, gobernanza, redes sociales, culturales,

salud, educación, etc.) (Liu et al., 2007). Bajo la responsabilidad de un equipo de trabajo interdisciplinario, organizado y con una estructura heterarquica¹¹ para que de esta manera se puedan crear puentes en el lenguaje científico, así como la correcta incorporación de herramientas, metodologías, análisis y modelos entre el mundo social y natural que por mucho tiempo han permanecido como agentes antagónicos.

A continuación se presentan algunas las alternativas en que se ha abordado la sustentabilidad:

- **Enfoque Antropocéntrico (sustentabilidad débil):** se observa a la naturaleza como algo externo de la especie humana, se piensa en la optimización de los recursos para ser explotados. Se prepondera el sistema económico sobre el sistema social y ambiental (Espinosa et al., 2011; Gallopín, 2003).
- **Enfoque Ecocéntrico (sustentabilidad fuerte):** se considera que la naturaleza y los sistemas sociales co-evolucionan en una interacción mutua, por lo tanto, se tiene en cuenta un equilibrio de necesidades sociales, límites ecológicos y la calidad de vida de las personas (Espinosa et al., 2011).
- **Enfoque Teocéntrico (sustentabilidad fuerte):** se toma en cuenta la sabiduría y conocimiento de las culturas tradicionales. A partir de la experiencia conocen el funcionamiento de una interacción armónica con el entorno ecológico (Espinosa et al., 2011).

De acuerdo a la caracterización que plantea la Sustentabilidad, este trabajo se basa bajo el enfoque ecocéntrico, es decir la Sustentabilidad vista desde un enfoque sistémico. Lo primero que se debe de tener en cuenta es que los sistemas ecológicos y socio-económicos son sistemas complejos, que están integrados con múltiples escalas de espacio y tiempo. La razón por la cual la Ciencia de la Complejidad es fundamental para comprender la transición hacia la Sustentabilidad es que puede servir como un marco teórico para la integración de las diferentes teorías del De-

¹¹Forma de organización donde los integrantes no deciden uno sobre el otro, sino cómo interactúan. Esto tiene como finalidad generar ideas, conocimiento, consejos y ayudas para que todo un grupo funcione de manera correcta

sarrollo Sustentable (Peter and Swilling, 2014). Al integrar los sistemas humanos con los sistemas naturales emergen redes y patrones de comportamiento que no se podrían analizar si se estudian los sistemas por separado (Liu et al., 2007). Dado que, la Sustentabilidad busca satisfacer las necesidades de las generaciones actuales sin comprometer los recursos y oportunidades para el crecimiento y desarrollo de las generaciones futuras (WCED, 1987). La Sustentabilidad requiere encontrar un “equilibrio” entre los sistemas sociales, económicos y ambientales. Este equilibrio no se puede encontrar en cada uno de los sistemas si se estudia de manera aislada, sino se requiere un estudio con un pensamiento sistémico, en donde se preste atención a las interacciones que surgen entre los sistemas de manera colectiva para que de esta manera brote como propiedad emergente la Sustentabilidad.

2.4. Herramientas de la Complejidad

2.4.1. Representación Gráfica: Redes

En este trabajo se utiliza una red como representación visual y conceptual del metabolismo industrial del proceso de una economía circular del plástico. Una red se define como un conjunto de puntos llamados nodos que están unidos mediante enlaces o aristas a partir de una regla de asociación la cual nos dice como se relacionan los nodos (Mitchell, 2009). Las líneas se llaman enlaces (o arcos, ligaduras, aristas o ramas), los enlaces muestran las relaciones que hay entre cada uno de los nodos. Para el caso de este trabajo se va analizar una red dirigida, tal como se esquematiza en la figura 2.4. Esto significa que cada enlace tiene una dirección de destino que va de un nodo a otro; la dirección del flujo de cada enlace se representa a través de flechas (Newman, 2018).

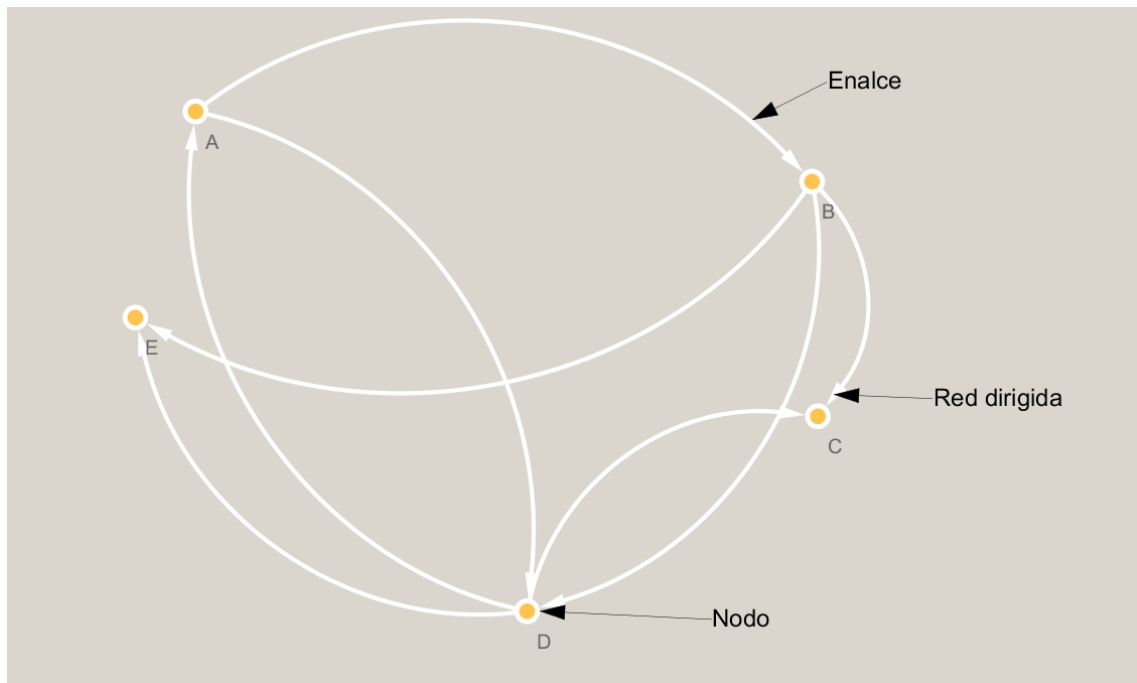


Figura 2.4: Ejemplo de una red dirigida

Los nodos van a representar un elemento del proceso en la producción del plástico desde la cuna hasta la tumba, y los enlaces son las interacciones que hay tanto en este sistema económico como el sistema social y ambiental que están involucrado el proceso productivo. El análisis de redes es de tipo cualitativo, la ventaja que tiene es que permite visualizar de forma sintética las interacciones entre los diferentes agentes o individuos como si fuera una radiografía.

Una red se denota como:

$$G = (N, E) \quad (2.1)$$

Donde N es el conjunto de nodos y E es el conjunto de enlaces.

Otra forma de representar la red descrita anteriormente es a partir de una matriz conocida como como matriz de adyacencia o binaria, la cual se denota como W , los

coeficientes se definen así:

$$W_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si la unión } j \text{ contiene al vértice } i \\ 0 & \text{cualquier otra situación} \end{cases} \quad (2.2)$$

Medidas de centralidad: Grado, Intermediación y Cercanía

La centralidad de grado es la más simple, mide el número de conexiones que un nodo tiene con otros nodos, es un indicador local y estático, ya que solo considera a los vecinos directos que tiene un nodo (Wasserman and Faust, 1994). A los nodos que tienen la mayor cantidad de vecinos de una red se les conoce como “hub”. En redes dirigidas se puede contabilizar el grado entrante (In- Degree) y el grado saliente (Out- Degree). Entonces, la centralidad de grado es la suma de ambos como se define en la ecuación (2.3).

$$D = D_j^{in} + D_i^{out} \quad (2.3)$$

La centralidad indegree mide los enlaces de entrada que recibe un nodo, se define mediante la ecuación (2.4) y la centralidad outdegree es el número de salidas que tiene un nodo hacia los demás nodos, tal como está definida la ecuación (2.5). Estos índices se calculan a partir de W , la matriz de adyacencia.

para calcular estas medidas se toma una matriz de adyacencia (Newman, 2018).

$$D_j^{in} = \sum_{j=1}^n w_{ij} \quad (2.4)$$

$$D_i^{out} = \sum_{j=1}^n w_{ji} \quad (2.5)$$

La centralidad por intermediación es una medida que cuantifica la frecuencia o el número de veces que un nodo actúa como un puente a lo largo del camino más corto

(distancias geodésicas) entre otros dos nodos¹². Los nodos que poseen una posición de intermediarios de alguna manera son también controladores o reguladores del flujo de información. Así, la centralidad de intermediación excluye cualquier par de nodos a los que no puede accederse al enlistar los caminos más cortos; esta medida de centralidad representa la contribución de un nodo a la comunicación entre todos los pares de nodos (Newman, 2018). Se define como (2.6):

$$x_i = \sum_{st} n_{st}^i / g_{st} \quad (2.6)$$

Donde n_{st}^i representa el número de todos los caminos más cortos que existen entre los nodos s y t y que pasan por el nodo i , y g_{st} denota el total de caminos más cortos que unen a s y t . Así, se obtiene una proporción de la participación del nodo i en los caminos entre s y t . Para saber la proporción general de la participación del nodo i en toda la red, se realiza la suma de estas fracciones hacia los diferentes nodos de la red.

La centralidad por cercanía calcula el promedio de las distancias más cortas desde un nodo hacia todos los demás¹³. En una red de flujo esta medida se puede interpretar como el tiempo de llegada a destino de algo que fluye a través de la red. Definida como:

$$l_i = 1/N \sum_{j=1}^N d_{ij} \quad (2.7)$$

Donde:

l_i : es el promedio de los caminos

¹²Véase en: <https://igraph.org/r/doc/betweenness.html>

¹³Véase en: <https://igraph.org/r/doc/closeness.html>

d_{ij} : es la longitud de la trayectoria geodésica del nodo i al nodo j .

$$C_i = 1/l_i \quad (2.8)$$

La ecuación (2.7) expresa el promedio que un nodo se encuentra cercano a los demás nodos. La centralidad por cercanía se define tal como se describe en (2.8) como la inversa de l_i . Esta medida de centralidad es para cada uno de los nodos, esto significa que es una medida local.

Cómo podemos observar, la ecuación (2.7) nos muestra un promedio de todos los caminos cortos que enlazan al nodo i con los demás nodos. La centralidad por cercanía se define tal como se describe en (2.8) como el recíproco de l_i .

2.4.2. Modelo Basado en Agentes (MBA)

Un modelo se construye y se utiliza para resolver problemas o responder preguntas sobre un sistema o una clase de sistemas. Generalmente, en las investigaciones científicas lo que se busca es entender cómo funcionan las cosas y sobre todo explicar patrones para poder predecir un cierto comportamiento de un determinado sistema. Sin embargo, en ocasiones los fenómenos reales son difíciles de modelar o la experimentación resulta un proceso muy lento (Railsback and Grimm, 2019). Un tipo de modelo es el modelo basado en agentes que el Instituto de Santa Fe lo define como:

Una simulación computacional en la que los componentes individuales (agentes) de un sistema se representan e interactúan explícitamente. Un modelo basado en agentes generalmente se repite en pasos de tiempo, con aspectos de los agentes actualizados en cada paso de tiempo. Los modelos basados en agentes pueden contrastarse con modelos en los que el comportamiento del sistema se basa en ecuaciones y los individuos no están representados explícitamente. ¹⁴

¹⁴Definición tomada de Complexity Explorer, véase en: <https://www.complexityexplorer.org/explore/glossary/100-agent-based-model>

En las últimas décadas se ha apostado por el modelo basado en agentes (MBA) que es una representación de la realidad a través de un modelo computacional. Una de las ventajas de estos modelos computacionales es que permiten tratar modelos formales cuya resolución analítica es muy complicada, demanda mucho tiempo y además sus resultados son difíciles de interpretar (Zoya and Roggero, 2015), permitiendo que se pueda abordar problemas que requieren modelos menos simplificados e incluyen más características de los sistemas reales.

Los MBA representan los componentes individuales de un sistema y sus comportamientos. Por lo tanto, los MBA son modelos en los que los individuos o agentes se describen como entidades únicas y autónomas que generalmente interactúan entre sí y con su entorno a nivel local (Railsback and Grimm, 2019); de estas interacciones se produce una propiedad emergente en donde se puede analizar diferentes patrones derivado de procesos de interacción no lineal. Los MBA constituyen una estrategia de modelado emergente en la cual se estudian las dinámicas de lo local a lo global, lo que contrasta con las técnicas de modelización tradicional que operan de modo descendente, es decir, "de arriba hacia abajo." de lo global a lo local (Zoya and Roggero, 2015).

Además, otra de las cualidades de los MBA es que permiten crear escenarios hipotéticos con los que se pueden realizar predicciones en función de la evolución de la dinámica del sistema a lo largo del tiempo. Este tipo de modelos han demostrado ser muy eficientes para modelar sistemas complejos. Además resultan ser muy útiles para los tomadores de decisiones pues el modelo otorga de forma intuitiva escenarios claros.

En el caso particular de este trabajo se plantea un MBA de una red dirigida de difusión basado en la propuesta de la Biblioteca de Modelos de NetLogo¹⁵, como se muestra en la figura 2.5.

¹⁵Veáse en: (Wilensky, 1999)

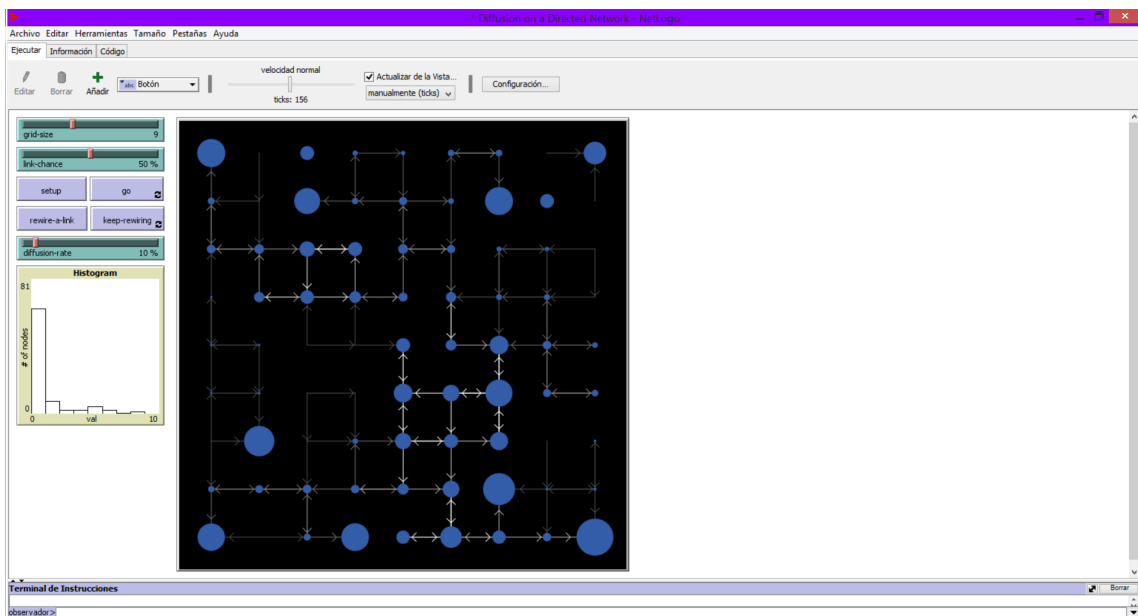


Figura 2.5: Modelo basado en agentes de una Red Dirigida de Difusión
Tomado de la Biblioteca de Modelos de NetLogo (Wilensky, 1999)

Stonedahl and Wilensky (2008), autores de dicho modelo, lo describen como:

Este modelo muestra la difusión de una cantidad a través de una red dirigida. La cantidad se mueve entre los nodos de la red solo a lo largo de enlaces establecidos y dirigidos entre dos nodos. Las reglas simples que impulsan esta difusión conducen a patrones interesantes relacionados con la topología, densidad y estabilidad de la red. Además, el modelo puede ser útil para comprender las propiedades básicas de los procesos dinámicos en las redes y proporciona un punto de partida útil para diseñar modelos basados en redes más complejos y realistas (Stonedahl and Wilensky, 2008)¹⁶

¹⁶Para mayor detalle del modelo véase en: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/DiffusiononaDirectedNetwork>

Capítulo 3

Formulación del Problema

3.1. Justificación

El crecimiento en los últimos cincuenta años de los desechos plásticos sobre todo en la industria de envases y embalajes ha crecido aceleradamente. Los problemas que están acarreado estos desechos están alcanzado niveles muy preocupantes que nos compete a todos nosotros como especie humana. Se ha planteado que la economía circular puede ser una buena alternativa para apalea el problema de los desechos plásticos. A su vez se abre la posibilidad de transitar hacia la sustentabilidad. Sin embargo estas aseveraciones son cuestionables. En este sentido, este trabajo no pretende enfocarse en estudiar los alcances de la economía circular; sino concentrarse en sus limitaciones y cómo se puede hacer una propuesta para mejorar.

3.2. Objetivo general

Analizar las limitaciones de la economía circular para los desechos plásticos a partir de un modelo basado en agentes basado en el metabolismo industrial de la industria de envase y embalaje del plástico en el caso de México.

3.2.1. Objetivos específicos

1. Conocer la tecnología disponible para el tratamiento del plástico.
2. Investigar el estado actual del reuso y reciclado del plástico en México.
3. Plantear una red del metabolismo industrial de la industria de envases y embalajes aplicando una economía circular.
4. Plantear un red para realizar un análisis de flujo de materia.
5. Proponer diferentes escenario a analizar para compararlos con la situación real en México.
6. Aplicar un modelo basado en agentes.

3.3. Pregunta de investigación

¿Cuál es el escenario que se debe utilizar para lograr un mejor resultado en la mitigación de los desechos plásticos de envases y embalajes?

3.4. Hipótesis

La economía circular mitiga el problema de los desechos plásticos, pero no es la solución para transitar hacia la sustentabilidad.

Capítulo 4

Descripción de la tecnología disponible

La figura 4.1 muestra un esquema del ciclo de producción del plástico, esta primera aproximación nos permitirá la construcción del metabolismo industrial de los envases y embalajes plásticos simulando una economía circular. Este proceso tal como se puede observar empieza desde la cuna, es decir con la extracción de recursos naturales para después pasar a la *Polimerización*, que es un proceso químico entre moléculas que da lugar a los polímeros. Después, estos polímeros entran a un proceso de *Fusión y procesamiento* en donde dependiendo del tipo de plástico que se fabrique será la forma en que los polímeros den como resultado un *Producto* que será consumido principalmente por *Industrias y Hogares*.

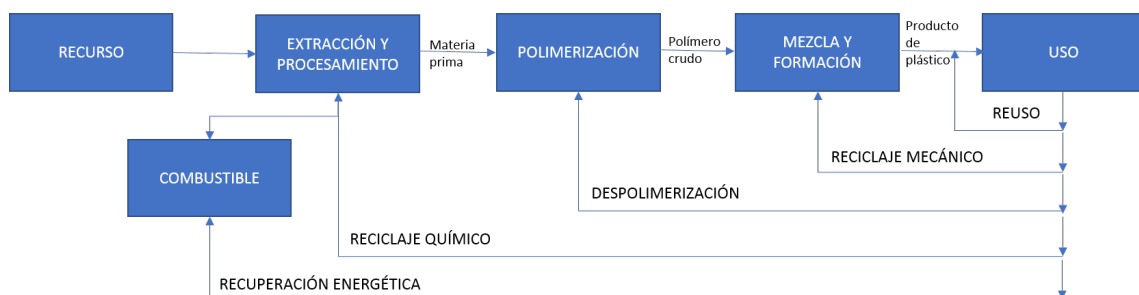


Figura 4.1: Esquema del proceso de producción del plástico
Tomado de: Clift (1997)

El esquema anterior propone diferentes alternativas para que los diferentes tipos de plástico no sea desechados; entre las que destacan son el reuso, el reciclaje y la recuperación energética. Si bien estas medidas son factibles para evitar que los productos plásticos sean desechados también se necesita tomar en cuenta sus limitaciones. A continuación se hace una descripción de cada una de estas posibles alternativas.

4.1. Reciclaje

De acuerdo a la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, el reciclaje se refiere a la transformación de los residuos a través de distintos procesos que permiten restituir su valor económico, evitando así su disposición final, siempre y cuando esta restitución favorezca un ahorro de energía y materias primas sin perjuicio para la salud, los ecosistemas o sus elementos^[1]. Para llevar a cabo esta transformación de los residuos hay dos tipos de tecnología:

4.1.1. Reciclaje Mecánico

El reciclaje mecánico es el procesamiento de los residuos plásticos para convertirlos en materias primas o productos secundarios sin cambiar significativamente la estructura química del material^[2]. Existen variaciones en los procesos, sin embargo, en términos generales incluyen procesos de corte o molienda, limpieza, extrusión, enfriamiento y almacenaje hasta su posterior comercialización (Morillas et al., 2014). Según el Ministerio de Fomento del Gobierno de España^[3] las condiciones necesarias para que un plástico pueda ser reciclado bajo este tipo de tecnología son: los plásticos no deben de estar muy degradados, los plásticos se deben de separar por tipos, el plástico debe de estar limpio de cualquier material extraño que pueda modificar las características físicas del producto. A pesar de que un plástico cuente con todas las especificaciones descritas este tipo de tecnología solo puede recuperar aproximadamente un 50 % de materia plástica, es decir solo la mitad de estos materiales se

¹Véase en: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263_190118.pdf

²Véase en <https://www.plasticseurope.org/es/focus-areas/circular-economy/zero-plastics-landfill/recycling-and-energy-recovery>

³Véase en CEDEX (2013)

pueden reintroducir al sistema de producción por lo que los productos *reciclados* tienen una proporción significativa de plástico virgen. En el caso de los envases y embalajes utilizados para alimentos y bebidas por cuestiones de salud e higiene no pueden usar materiales reciclados. Además para que sea rentable económicamente este tipo de reciclaje debe de tener un volumen suficiente de material.

4.1.2. Reciclaje Químico o Despolimerización

El reciclaje químico se realiza a partir de procesos térmicos en los que se suministra calor a los plásticos y, mediante el control en la cantidad de oxígeno y el uso de catalizadores, se logra la fragmentación de las moléculas. Estos nuevos compuestos pueden utilizarse como materias primas para la industria química, para fabricar plásticos o como combustibles (Morillas et al., 2014). A pesar de los posibles buenos resultados de este método —pues hay quienes aseguran que con el reciclaje químico se puede recuperar el 100 % del material—. Sin embargo esto no se puede comprobar debido a que en la actualidad no se ha desarrollado lo suficiente como para que esté en el mercado dado que su uso es de bajo a nulo. Las dos principales desventajas que tiene este tipo de tecnología son su costo económico y el alto requerimiento energético. Este último puede ser contraproducente dado que por un lado se recicla el material plástico y por el otro se consume combustible derivado del petróleo lo que significa que puede mitigar el efecto nocivo de los desechos plásticos pero, en términos netos, también daña el medioambiente.

Como se puede observar en el Cuadro 4.1 hay siete tipos de plástico, cada uno de ellos se identifica por un número en específico y sus iniciales. Esta clasificación está en función de sus características y propiedades químicas. En este sentido se puede observar que no todos los plásticos son buenos candidatos para entrar en el proceso de reciclado, también es importante destacar que muchos de los objetos que se producen con este material tienen un tiempo de vida muy largo. No obstante, por objetivos de esta investigación se centra el análisis en los productos para los que su tiempo de uso es muy corto como es el caso de los envases y embalajes. Otra restricción a la que nos enfrentamos en este estudio es que a pesar de que se pueden encontrar tipos

de plásticos como el *PP* o el *PS* que producen envoltorios y envases para comida no se tomarán en cuenta debido a la baja factibilidad de reciclaje que tienen, tal como se muestra en el cuadro 4.1⁴.

| Tipo de plástico | Usos comunes | Facilidad de reciclaje | Uso después del reciclado |
|------------------|---|------------------------|---|
| 1 PET | Botellas de bebidas, envases de comida, fibras textiles, etc. | Fácil | Botellas de bebidas, juguetes, ropa, etc. |
| 2 PEAD o HDPE | Productos de limpieza (detergentes), envases de higiene personal (shampoo), botellas no transparentes, bolsas, etc. | Fácil | Bolsas de residuos, productos de limpieza, etc. |
| 3 PVC | Tuberías, pisos, tarjetas de crédito, piel sintética, etc. | Muy difícil | Suelas para calzado, muebles, artículos del hogar. |
| 4 LDPE | Bolsas de suero, aislates de cableado, etc. | Factible | Macetas, muebles, aislates de cableado, etc. |
| 5 PP | Envoltorios de alimentos (papas, galletas), materiales médico (jeringas), lonas, pañales, cubetas, etc. | Factible | Artículos de oficina (mesas, sillas), contenedores, macetas, etc. |
| 6 PS | Materiales térmicos (vaso), bandejas de comida, productos de un solo uso (cubiertos desechables), etc. | Difícil | Aislantes térmicos, artículos de oficina, macetas, etc. |
| 7 Otros | Biberones, CDs, colchones, piezas para automóviles, electrodomésticos, artículos electrónicos, etc. | Muy difícil | CDs, piezas para automóviles, etc. |

Cuadro 4.1: Tipos de plásticos, uso antes y después de ser reciclados

⁴Ver descripción ampliada de los tipos de plásticos en el apéndice A.

Por lo tanto, debido a las características y propiedades de los plásticos mencionados, este trabajo se centra en el estudio en el tereftalato de polietileno (PET) y el polietileno de alta densidad (HDPE)⁵ dado que estos dos tipos de plástico sí son candidatos para entrar al proceso de reciclaje. Como se menciona en el cuadro 4.1 los principales productos que resultan del PET son botellas para bebida en especial para agua embotellada y refrescos; en el caso del HDPE son envases de higiene personal como champú o jabón líquido, envases para productos de limpieza como detergente y bolsas desechables. Después de ser reciclados este tipo de plástico se puede transformar en otros productos siempre y cuando no sean destinados a envasar alimentos y bebidas.

4.2. Reuso

Retomando a la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos⁶ el *Reuso* se define como el empleo de un material o residuo previamente usado, sin que haya un proceso de transformación. Se da en el post- consumo del producto, en el caso de los hogares, entre más veces dicho producto se vuelva a utilizar mayor será la vida útil del producto y por lo tanto la generación de desechos será menor. Por su parte, los residuos plásticos que generan la industrias en sus procesos de producción o derivados de operaciones de envases y embalajes se clasifican como residuos post-industriales; se generan lotes de residuos limpios, en volúmenes grandes y claramente identificados, lo que vuelve el reuso, o en su caso el reciclaje, más eficiente (Morillas et al., 2014).

4.3. Recuperación Energética

La recuperación energética es la que se obtiene de los plásticos, se da a partir de la incineración. De acuerdo a *Plastic Europe* la recuperación de energía es una alternativa valiosa para las fracciones de residuos plásticos que no se pueden reciclar

⁵Véase en: <https://ourworldindata.org/uploads/2018/07/Plastics-by-polymer-type-01-487x550.png>

⁶Véase en: http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/263_190118.pdf

de forma sostenible debido a la cantidad, la pureza y la composición de los flujos de residuos recogidos, las tecnologías disponibles para clasificar, los requisitos que exige el mercado en cuanto a calidad y normas del material reciclado, que pueden limitar la idoneidad del reciclado del plástico⁷.

La incineración es una idea interesante desde la perspectiva de recuperación de energía de los materiales plásticos, los cuales poseen un elevado poder calorífico (Arandes et al., 2004). La FAO⁸ precisa que el poder calorífico (PC) se calcula como cantidad de energía que se obtiene por unidad de masa, se define como (4.1):

$$PC = \frac{\text{energía}}{\text{masa}} \quad (4.1)$$

donde,

$$\text{masa} = \text{volumen} \times \text{densidad} \quad (4.2)$$

De acuerdo a los datos que presentan Poletto and Da Silva (2009) en promedio el PC del plástico es de 5 kcal/kg, esta cifra resulta ser alta en comparación de otros materiales como la madera o el papel/ cartón que tienen un PC de 4,3 y 2,5 kcal/kg respectivamente.

Sin embargo, la incineración de materiales plásticos debe estar sujeta a fuertes controles medioambientales, pues se tiene que tener la infraestructura necesaria para neutralizar los residuos sólidos y los efluentes gaseosos, como por ejemplo el cloruro de hidrógeno que esta presenta en la combustión del PVC (Arandes et al., 2004). Además, solo resulta rentable económicamente si se tienen grandes volúmenes de dicho material.

Este proceso industrial, además de generar basura, también es un generador poten-

⁷Véase en: <https://www.plasticseurope.org/es/focus-areas/circular-economy/zero-plastics-landfill/recycling-and-energy-recovery>

⁸Véase en: <http://www.fao.org/3/j0926s/J0926s06.htm#TopOfPage>

cial de dióxido de carbono, para tener una visión sistémica tomaremos en cuenta elementos de la esfera social, económica y ambiental que representan el PIB, la población y las emisiones de CO_2 , respectivamente. Estas tres variables están fundamentadas en la identidad de Kaya, la cual está definida como (4.3):

$$CO_2 \equiv P \times \frac{CO_2}{EP} \times \frac{EP}{PIB} \times \frac{PIB}{P} \quad (4.3)$$

Donde CO_2 es la cantidad de dióxido de carbono que se emite en un área determinada, P es la población de esa área, $\frac{CO_2}{EP}$ representa el índice de carbonización que se refiere al cociente entre el total de CO_2 emitido y la energía usada en el área, $\frac{EP}{PIB}$ se refiere a la intensidad energética que es la energía utilizada en el área sobre el PIB del área y $\frac{PIB}{P}$ es el PIB per cápita. En este modelo se introducen el PIB y la *Población*, como se sugiere en [Giannis et al. \(2017\)](#), en donde el crecimiento del PIB está en función de la producción de las *Industrias* y el crecimiento de los *Hogares* está en función de la *Población*. Y la emisión del CO_2 es parte del producto de este metabolismo industrial.

Capítulo 5

Caso estudio: México

La industria del plástico en México es una de las pocas que ha logrado permear en casi todas las áreas de la economía. Tal como lo podemos observar en la siguiente red (figura 5.1)¹, donde se muestra cómo la industria del plástico, con el código SCIAN (Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte) 3261, está relacionada con al menos el 75 % de los sectores nacionales de la economía mexicana. Desde la óptica económica, el plástico es un material que es parte de la mayoría de las cadenas de valor, esto significa que su desaparición provocaría una desarticulación en el funcionamiento de la economía. La red muestra que la industria de plástico interactúa con sectores muy significativos para la economía mexicana como por ejemplo la construcción, la fabricación de componentes electrónicos, auto-partes de la industria automotriz y por supuesto envases y embalajes.

¹Se realizó a partir de la Matriz de Insumo Producto 2013, con una desagregación a ramas de la economía doméstica. Cada nodo de la red está descrita con un número que representa el código SCIAN con el que se conoce cada industria en la economía mexicana, véase en: http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/clasificadores/SCIAN/SCIAN_2013/702825051693.pdf

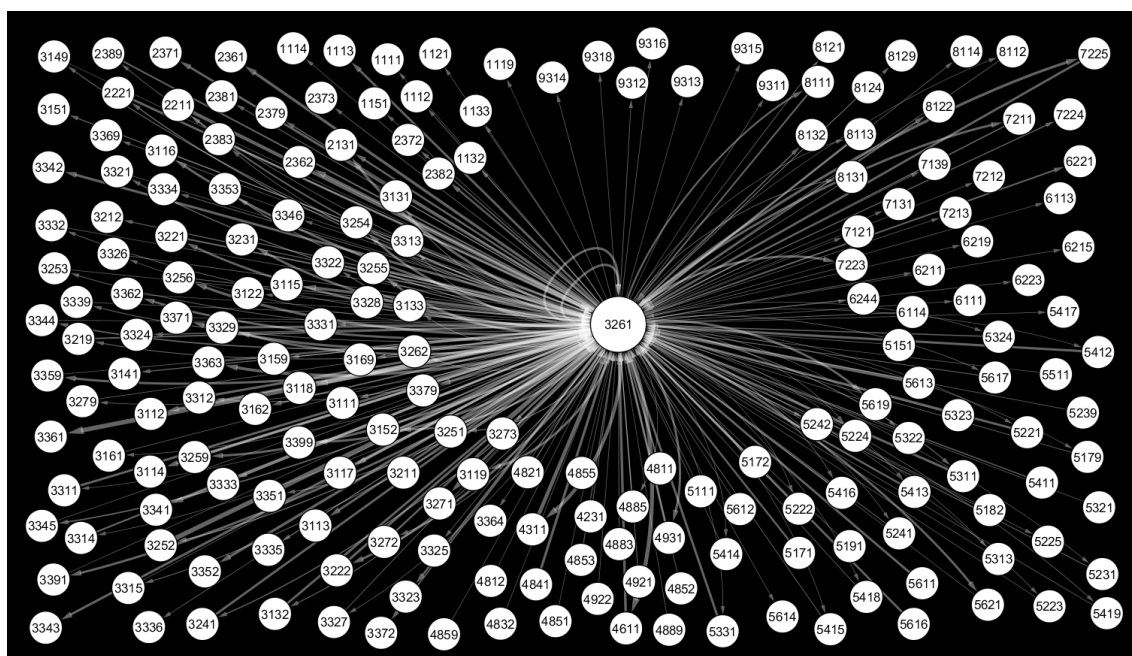


Figura 5.1: Mapeo sectorial de la industria del plástico en México
Elaboración propia con base en datos de INEGI

Tal como se mencionó en los apartados [2.2](#) y [2.3](#), la interconexión de los sistemas es inherente, por lo que una ineficiencia en el sistema económico traería un efecto en el sistema social y ambiental.

En la parte social se puede traducir en los empleos que esta industria genera, de acuerdo a cifras presentadas por el INEGI son 179 mil 400 puestos de trabajo remunerado requeridos en la fabricación de productos de plástico. Sin embargo, las cifras oficiales no toman en cuenta el valor generado del plástico en la etapa de post-consumo donde diferentes actores convergen y sacan provecho de los desechos plásticos. Entre estos, no solo destacan las empresas recicladoras, los centros de acopio, sino también el sector informal de pepenadores.

La degradación ambiental se vive día a día con la generación de desechos que no solo está determinada por el crecimiento económico y la proporción de la población urbana, sino también hay otros factores como el crecimiento urbano, el desarrollo industrial, avances tecnológicos y variación en los patrones de consumo de la población ([Semarnat, 2016](#)). Como se puede apreciar en la figura [5.2](#) las zonas metropolitanas

(ZM) son las que proporcionalmente generan más basura, seguidas por las ciudades medianas (Cd. Medias) y a pesar de que es menor la proporción la ciudades pequeñas (Cd. Pequeñas) y rurales su generación de residuos sólidos representa aproximadamente un 20 %.

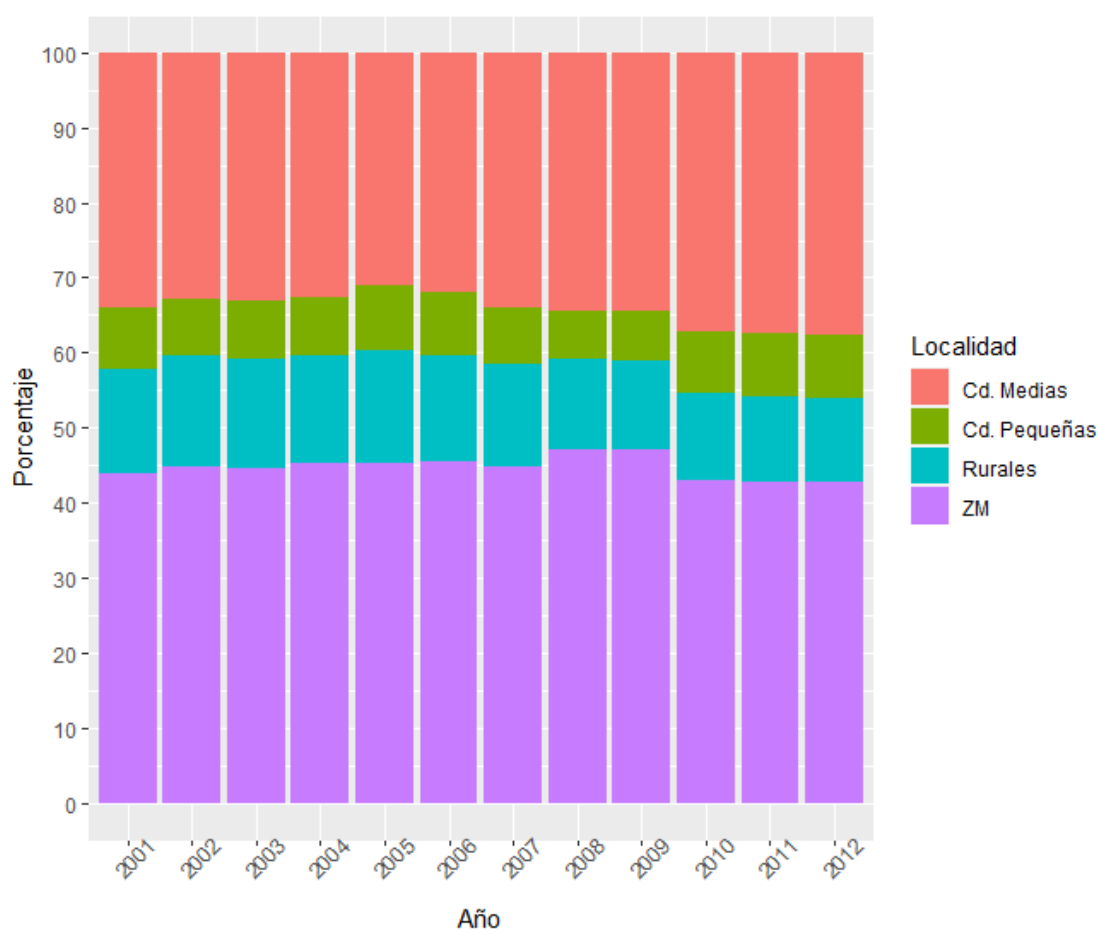
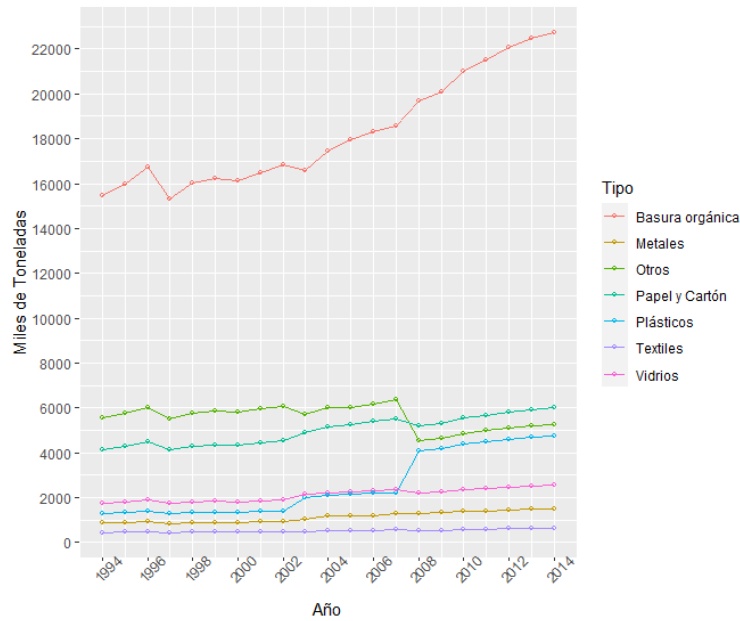


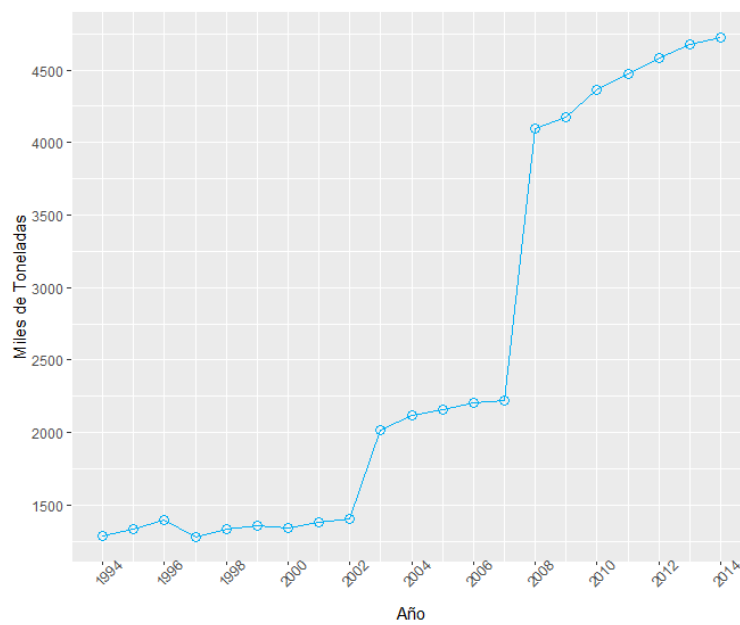
Figura 5.2: Generación de residuos sólidos urbanos por tipo de localidad

La generación de basura ha aumentado de forma generalizada tal como se describe en la figura 5.3(a) donde se describe la composición por tipo de residuos sólidos. Sin embargo, en el caso del plástico como se puede observar en la figura 5.3(b) se muestra un incremento a nivel nacional de casi 4 veces en un periodo de veinte años, dado que en 1994 se generaba cerca de 1 millón 300 toneladas al año y en 2014 la generación de basura plástica se aproximaba a los 5 millones de toneladas. Este hecho verifica que México no es la excepción en la tendencia mundial del crecimiento acelerado y sostenido en la producción y generación de plástico, que se expuso en el

Capítulo I



(a) Composición de residuo por tipo



(b) Residuo plástico

Figura 5.3: Generación de residuos sólidos en México (1994-2014)

Tal como se mostró en la gráfica anterior hay diferentes tipos de residuos sólidos; no obstante uno de los grandes problemas es la separación de cada uno de ellos.

La importancia de separar por tipo de residuo recae en que de esta manera se puede recuperar la materia y en algunos casos se puede reciclar. De lo contrario, gran parte de estos residuos se convertirá en materia desperdiciada porque una vez que llega a los océanos, vertederos o es incinerada es muy difícil recuperar estos materiales para ser reciclados. La recolección es un servicio público que comprende la colecta de los residuos sólidos urbanos (RSU), como el plástico, y su traslado hasta el sitio donde se tratan o disponen; aquellos que no se recolectan pueden ocasionar efectos negativos como: obstrucción de desagües y cursos de agua (causan inundaciones), contaminación de los cuerpos de agua y suelos, o convertirse en fuente de enfermedades para la población (Semarnat, 2016).

La disposición final de los residuos están relacionados con su depósito o confinamiento permanente en sitios e instalaciones que permitan evitar su diseminación y las posibles afectaciones a los ecosistemas y a la salud de la población (Semarnat, 2016). El mal manejo de los residuos plásticos se ve reflejado en las deficientes medidas ambientales propuestas en México. En este país, la política ambiental está enfocada a disponer los residuos sólidos urbanos a rellenos sanitarios que es una técnica de disposición de residuos que consiste en la disposición de capas de basura compactadas sobre un suelo previamente impermeabilizado para evitar la contaminación del acuífero y recubiertas por capas de suelo (Ulca, 2005) y en Rellenos de Tierra Controlada que son sitios que no cuentan con la infraestructura propia de un relleno sanitario, pero donde se dan las condiciones mínimas para la compactación y cobertura diaria (INEGI, 2017). En 2012, el 90 % de las zonas metropolitanas dispusieron sus residuos en rellenos sanitarios y sitios controlados (Semarnat, 2016).

Esta tendencia a la alza se aprecia en la figura 5.4 donde se puede ver que a mediados de la década de los noventa se usaban los rellenos sanitarios en un poco más del 15 % y hasta llegar casi un 65 % en 2014. De forma opuesta ocurrió con los Tiraderos a Cielo Abierto que no tienen ningún tipo de control ambiental ni protección de sanidad para la población. En el caso del reciclado, se observa en esta misma figura que la tasa de crecimiento es prácticamente imperceptible en un periodo de 20 años.

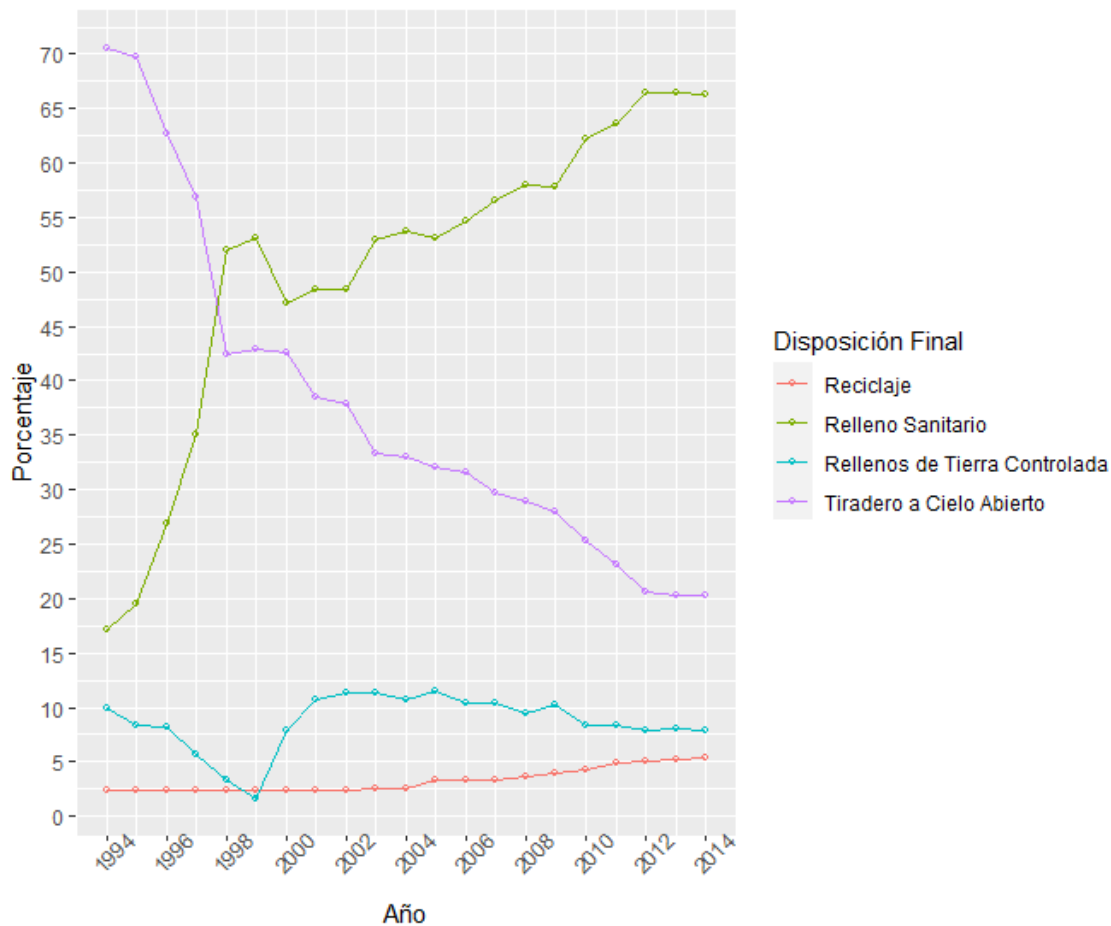


Figura 5.4: Disposición final de residuos sólidos

Como se describió en el Capítulo 4, el PET y el HDPE son los dos principales materiales que se utilizan para la fabricación de envases y embalajes que representan la mayor proporción de residuos plásticos. Según el reporte presentado por Greenpeace-México es el segundo país que más consume PET en el mundo, el primero en América en recuperar botellas de este material y además tiene la planta recicladora de PET más grande del mundo. Una de las razones por las que su recuperación ha resultado ser un buen negocio es debido a su alto precio de venta: \$6.80 por kg, esta cifra también depende del mercado internacional. Una de las características del PET es que se puede reciclar múltiples veces, pero para uso alimentario solo se permite un primer nivel, pasado éste se utiliza para una amplia variedad de productos finales como: fibra de relleno textil, correas y envases para usos no alimentarios como detergentes y productos fitosanitarios. Por el otro lado el PEAD (o HDPE por sus siglas

en inglés), no ha tenido el mismo nivel de aceptación en el negocio del reciclado, a pesar de que tiene buen precio de venta, \$5.00 por kg, el almacenamiento y acondicionamiento es costoso, ya que debe ser molido por tipo y color. Pese a que se puede reciclar el PEAD, el proceso resulta ser muy detallado. Se debe hacer la separación por el proceso con el que se fabricó cada pieza (inyección, extrusión, etc.), por el tipo de producto, por el color y en la selección se debe retirar todo aquello que se considere un contaminante del material.(GREENPEACE)

El uso de este par de materiales están inmersos en el día a día de todas las personas, nadie esta exento de su uso. Estos tipos de plásticos forma parte de la cotidianidad, utilizamos envases para asearnos, para condimentar nuestros alimentos, para hidratarlos, para desinfectar nuestro entorno, etc. Muchos de estos productos juegan un importantísimo papel en nuestra vida, en algunos casos es fácil su reemplazo, pero en otros casos la sustitución de un envase plástico para estos productos no es tan simple. Algunos ejemplos se ilustran en la figura [5.5](#) los cuales representan algunos de los productos que utilizan envases PET y PEAD.



Figura 5.5: Cotidianidad en el uso del plástico
Fotos tomadas por Ríos M.(2020)

Capítulo 6

Metodología

En este trabajo la metodología que se siguió consta de varias partes: 1) A partir del metabolismo industrial del sector de envases y embalaje del plástico se sustrae una red para aplicar análisis el flujo de materia (AFM). 2) Se calculan las medidas de centralidad de la red de flujo de materia. 3) Finalmente, se propone un modelo basado en agentes (MBA) con diferentes escenarios los cuales se van a comparar en función de los datos reales de México con el fin de obtener el mejor escenario que arroje mejores resultados. En los siguientes apartados se describe el modelo, los diferentes escenarios y los datos utilizados.

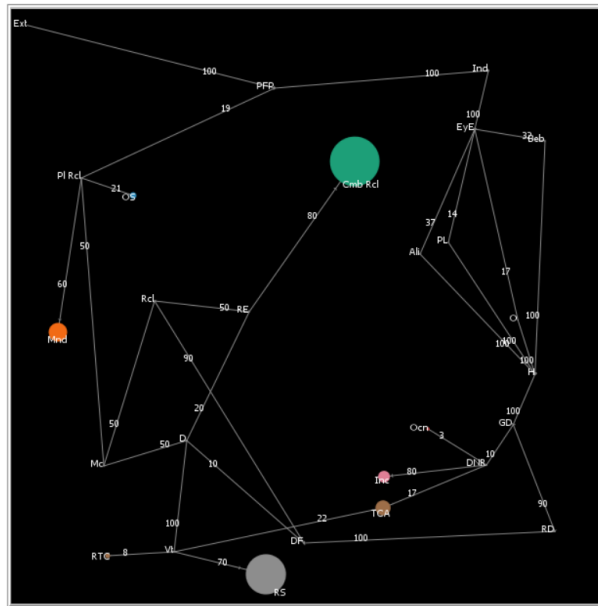
6.1. Modelo

El modelo basado en agentes programado en *Netlogo*, el cual es un software libre especializado para este tipo de modelo (Wilensky, 1999). El fin es simular el funcionamiento de una economía circular de los desechos plásticos producidos por los envases y embalajes, a partir de un análisis de flujo de materia.

A continuación se describen los elementos que se utilizan para la manipulación del modelo. En la figura 6.1 se desglosan todos los componentes que el usuario necesita conocer para llevar a cabo las simulaciones. En la imagen (a) se representa el *mundo* donde el usuario va a poder visualizar como se comporta el flujo de materia en la red

del metabolismo industrial. Las imágenes (b), (c), (d) y (e) representan los botones con los que se va a accionar el modelo. *Import – network* sirve para cargar el archivo que va a generar la red que se observa en el *mundo*, esta red está en función del Escenario que se va a analizar, en el apartado [6.1.2](#) se describe detalladamente cada escenario. El botón *setup* sirve para preparar la simulación, *go* es para iniciar la simulación y *move – node* es para acomodar la red de tal forma que el usuario tenga una mejor visualización. El deslizador, imagen (f), sirve para que el usuario pueda manipular la cantidad de materia que quiera simular, el rango va de 0 a 10000, donde 1000 equivale a una tonelada de plástico. Finalmente, el monitor (g) cuantifica el flujo de materia (plástico) que circula por la red del metabolismo industrial y el monitor (h) cuenta los ciclos, es decir el número de vueltas que da la materia dentro de la red antes de ser desechada.¹

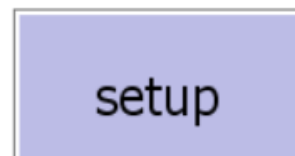
¹Para una mayor profundidad del modelo véase el Código del modelo basado en agentes en el Apéndice [C](#)



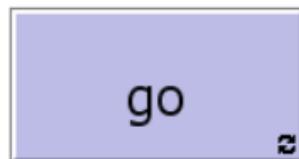
(a) Mundo



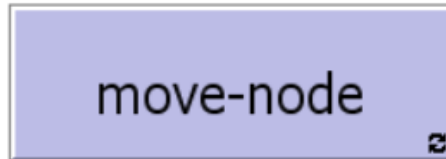
(b) Botón: Import-network



(c) Botón: setup



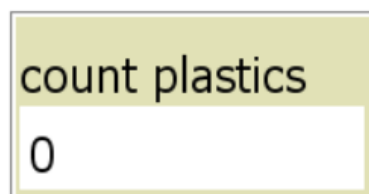
(d) Botón: go



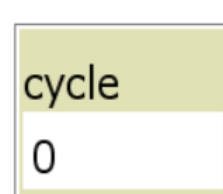
(e) Botón: go



(f) Deslizador: N



(g) Monitor: count plastics



(h) Monitor: cycle

Figura 6.1: Componentes para manipular el modelo

6.1.1. Elementos

Como se describió en el apartado [2.4.1](#), una red está conformada por enlaces y nodos. Con base en esta herramienta se planteó una red del metabolismo industrial (concepto desarrollado en el apartado [2.1.1](#)) y a partir de dicha red se plantea el modelo basado en agentes con el se hace un análisis de flujo de materia.

Enlaces

Los enlaces que corresponden a esta red son ponderados lo que significa que tienen un peso entre la unión de dos nodos. Cuando la red no tiene ninguna ramificación el valor es de 100 esto quiere decir que el 100 % de la materia fluye hacia el siguiente nodo. En el caso de que haya dos o más ramificaciones el 100 % de materia se difunde en diferentes fracciones. Sin embargo, una condición necesaria para el AFM es que exista un equilibrio en donde la suma de las ramificaciones, debe ser 100; dado que la materia solo se está transformando.

Nodos

Los nodos en esta red representan las etapas por la que pasa la materia desde la extracción del recurso natural hasta su disposición final (desde la cuna hasta la tumba) enmarcado en una economía circular. En este modelo enfocamos el análisis a los nodos atractores, estos se refieren a los nodos que funcionan como destino final del desecho. Debido a propiedades intrínsecas del sistema la materia se desecha de forma natural puesto que existen límites físicos y tecnológicos donde la materia no se puede recuperar, reciclar o reusar.

6.1.2. Escenarios

El MBA, descrito en el apartado [2.4.2](#), se aplicó para cinco diferentes escenarios utilizando como base los datos de México, para después proponer cuatro escenarios hipotéticos con el fin de encontrar los mejores resultados. Los escenarios se describen a continuación:

- Escenario Base: Real

Se estima el flujo de materia para el caso real en México donde el porcentaje de Reciclado es el 5 % de los residuos de envase y embalaje plásticos. El tipo de tecnología que se utiliza es reciclaje mecánico.

- Escenario 1: Ideal

Se plantea un escenario ideal donde se recicla el 100 % de los residuos de envase y embalaje plásticos. El tipo de tecnología que utiliza es reciclaje mecánico, se mantiene la tecnología disponible.

- Escenario 2: Inversión en nuevas tecnologías

El 90 % se recicla y se agrega la tecnología de recuperación de energía. Del total de residuos destinados a reciclaje el 50 % se recicla de forma mecánica y el otro 50 % se destina a la recuperación energética.

- Escenario 3: Disminución en el consumo de plástico

El 90 % se recicla, se reduce el consumo de envases y embalajes destinados a alimentos y bebidas y el total de residuos se destinan al reciclaje mecánico.

- Escenario 4: Disminución en el consumo de plástico e inversión en nuevas tecnologías

El 90 % se recicla, se reduce el consumo de envases y embalajes destinados a alimentos y bebidas y del total de residuos el 50 % se destina al reciclaje mecánico y el otro 50 % se utiliza para recuperación energética.

Para brindar una mayor validez a los resultados obtenidos de cada uno de los escenarios se sometieron a una prueba ANOVA. Esta prueba estadística tiene la finalidad de comparar las varianzas de las medias de los diferentes escenarios.

6.2. Datos

Debido a la falta de información, se utilizaron datos sobre el origen y destino de los desechos reportados en diversas fuentes de la literatura científica nacional e internacional. Estos datos se describen en el cuadro [6.1²](#):

| Origen | Destino | Peso (%) |
|--------------------------|--|----------|
| Envase y Embalaje | Alimentos | 37 |
| Envase y Embalaje | Bebidas | 32 |
| Envase y Embalaje | Productos de limpieza | 14 |
| Envase y Embalaje | Otros | 17 |
| Generación de Desecho | Desechos No Recolectados | 10 |
| Desechos No Recolectados | Océano | 3 |
| Desechos No Recolectados | Incineración | 80 |
| Desechos No Recolectados | Tiradero a Cielo Abierto | 17 |
| Generación de Desecho | Recolección de Desechos | 90 |
| Disposición Final | Desechos | 95 |
| Vertedero | Relleno Sanitario | 70 |
| Vertedero | Relleno de Tierras Controladas | 8 |
| Vertedero | Tiradero a Cielo Abierto | 22 |
| Disposición Final | Reciclaje | 5 |
| Mecánico | Desechos | 50 |
| Mecánico | Plástico Reciclado | 50 |
| Plástico Reciclado | Mundo | 60 |
| Plástico Reciclado | Polimerización, Fusión y Procesamiento | 19 |
| Plástico Reciclado | Otros Sectores | 21 |

Cuadro 6.1: Datos empleados para el Análisis de Flujo de Materia

²Las fuentes consultadas se pueden revisar en el Apéndice [B](#).

Capítulo 7

Resultados y Discusión

7.1. Análisis de la red del metabolismo industrial

En esta primera red que se describe en la figura [7.1](#) lo que se representa es una visión sistémica de la economía circular aplicada en el proceso de producción, consumo, desecho, reuso, recuperación y reciclaje del plástico. Se considera que esta es una visión sistémica pues además de tomar en cuenta el proceso productivo per se, se incorporan elementos de otros sistemas que interactúan intrínsecamente. Se toma en cuenta (rombos azules) el PIB, la población y las emisiones de dióxido de carbono a partir de la interacción de todos los elementos que configuran esta red. Lo anterior está fundamentado con base en la identidad de Kaya, expuesta en el apartado [4.3](#). La red del metabolismo industrial es fundamental como punto de partida de este análisis, dado que permite tener una valiosa aproximación intuitiva de las interacciones del sistema socio-económico-ambiental.

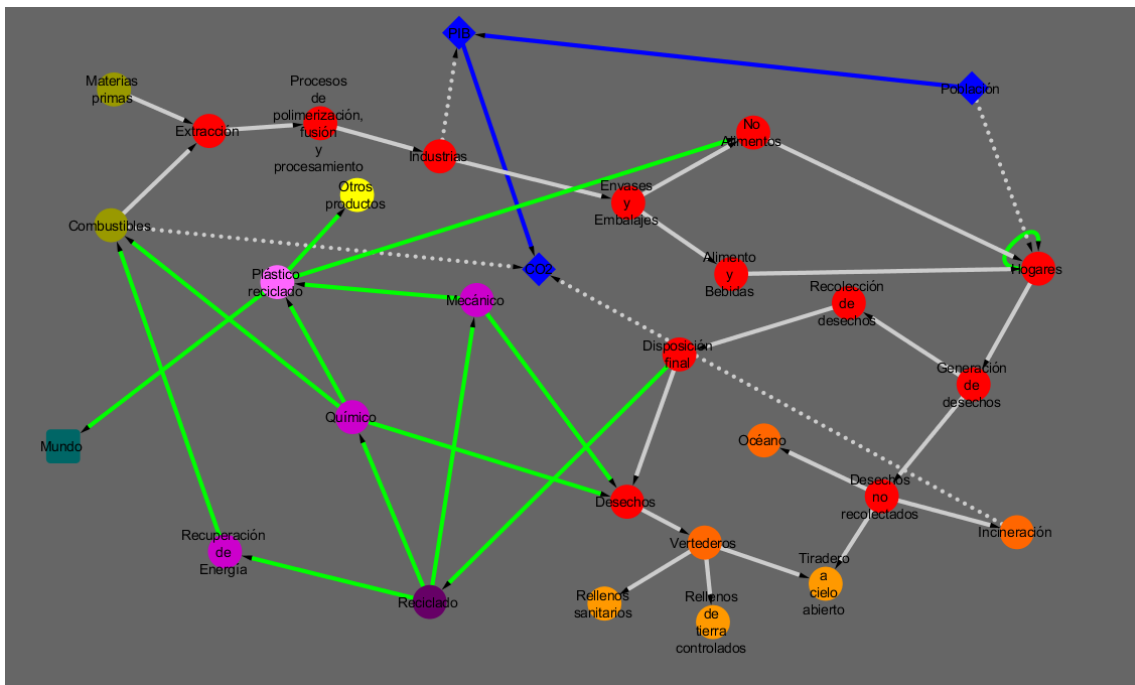


Figura 7.1: Red del metabolismo industrial del sistema socio-económico y ambiental

Desde el pensamiento sistémico en el que se ha desarrollado este trabajo podemos identificar el sistema social, económico y ambiental en el análisis de la economía circular de los desechos plásticos. En principio, el sistema social está representado con la *Población* quien a su vez tiene una relación directa con los *Hogares*, es decir que a mayor cantidad de población mayor cantidad de hogares y viceversa. En este sentido, el sistema social interactúa directamente con el sistema económico debido a que hay una relación directa entre *Población* y crecimiento económico representado por el *PIB*. A la par, el sistema social y económico, provoca un efecto negativo en el sistema ambiental pues a mayor crecimiento económico, mayor emisión de dióxido de carbono y en este caso particular: mayor cantidad de desechos plásticos. Todas las interacciones descritas se representan en la red de la figura 7.1 que tiene como objetivo fundamental mostrar esquemáticamente como inciden directa e indirectamente la interconexión entre los diferentes sistemas.

Posteriormente, se seleccionaron los nodos en los cuales existiera un flujo de materia (plástico), en otras palabras que en una conexión entre dos nodos solo fluyera materia. La figura 7.2 muestra la red del metabolismo industrial para el análisis de

flujo de materia. Es importante señalar que sobre esta red se analizan los resultados del análisis de centralidad y los resultados obtenidos de las simulaciones de los escenarios usando el MBA.

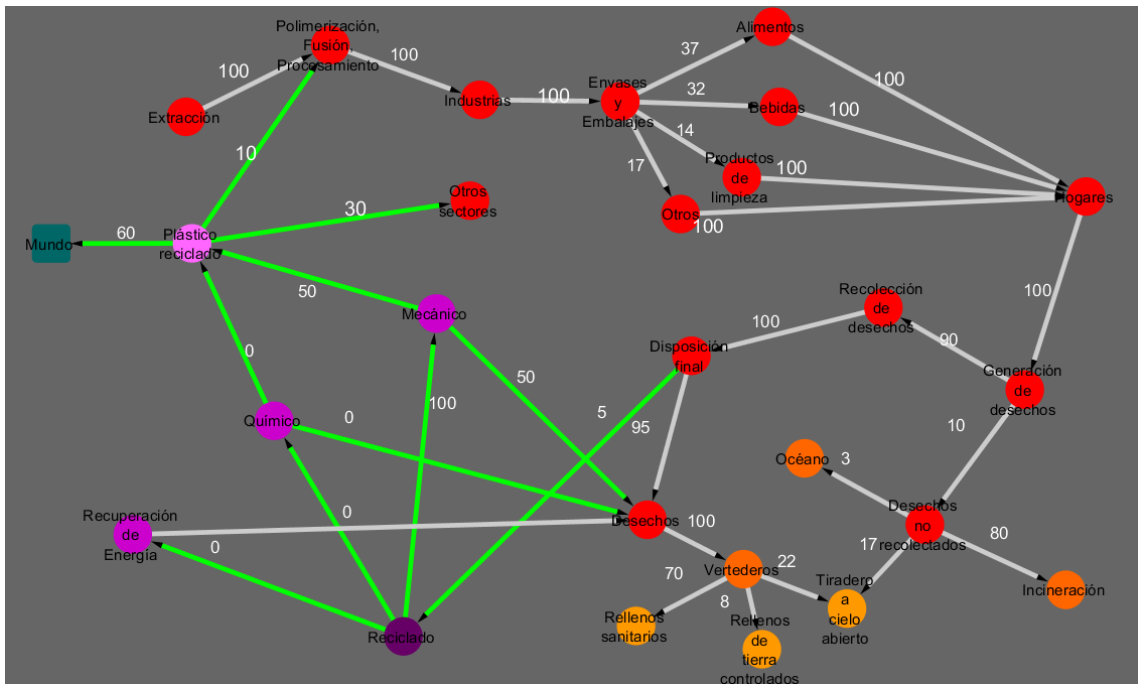


Figura 7.2: Red de flujo de materia

Los nodos en la figura [7.2](#) representan el proceso que se lleva a cabo desde la extracción de recursos hasta su desecho y solo en escasa medida son objeto para ser reciclados. Mientras que las flechas de los enlaces caracterizan la dirección del flujo de materia. Los nodos de color rojo simulan la trayectoria de una economía lineal (de la cuna a la tumba) y los enlaces de color verde representan una economía circular.

El nodo *Extracción* se refiere a la extracción de recursos, en el caso del plástico su mayor recurso no renovable es el petróleo, siguiendo la trayectoria de color rojo, le continúa la *Polimerización, Fusión y Procesamiento*, luego de este proceso la materia se incorpora en las *Industrias* para después convertirse en *envases y embalajes*. A partir de este nodo la red presenta su primera bifurcación dado que los usos de los envases y embalajes pueden ser para *Alimentos, Bebidas, Productos de Limpieza y Otros*. Todas estas presentaciones son consumidas por los *Hogares*. Mucho de este consumo será desechado en el corto, mediano, y en pocos casos, en el largo plazo a

lo que llamamos *Generación de desechos*; como se observa, la segunda bifurcación se presenta en la *Recolección de Desechos* y *Desechos No Recolectados*. Por un lado, la materia que no son recolecte tendrá como destino final (color naranja) el *Océano* (o algún manto acuífero), *Incineración* no controlada o *Tiraderos a cielo abierto*. Por el otro lado, la materia que se recolecte tendrá una *Disposición Final* que puede ser que la materia se recicle o sea desechada a los *Vertederos* (principalmente *Rellenos Sanitarios*). En caso de que la materia entre al proceso de *Reciclado* (color morado) tiene tres opciones de tecnología disponible *Reciclado Mecánico*, *Reciclado Químico* y *Recuperación de Energía*. En el caso de las dos primeras tecnologías mencionadas se tiene una ramificación entre materia que no se puede recuperar y que por lo tanto se destina a los *Desechos* y otra parte se convierte en *Plástico Reciclado*. Este plástico reciclado tiene tres destinos. El primero, es la exportación (representado por el nodo *Mundo*), el segundo es la conversión a otros productos distintos a envases y embalajes (nodos *Otros Sectores*) y el tercer destino es reincorporarse al ciclo de producción de envases y embalajes no alimenticios ¹.

7.2. Análisis de Medidas de Centralidad

A continuación se muestran los resultados obtenidos del análisis de la centralidad de grado, centralidad de intermediación y centralidad de cercanía, estas medidas se describieron en el apartado [2.4.1](#). Estos resultados se realizaron con base en la red de flujo de materia del metabolismo industrial, con el fin de profundizar el análisis de la estructura de dicha red.

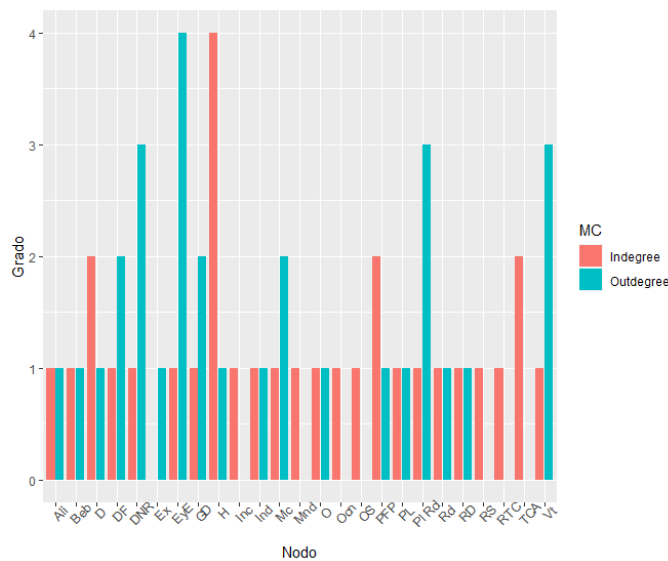
La figura [7.3](#) expone la Centralidad de Grado: de color rosa se representan las entradas de cada nodo (Indegree) y de color azul las salidas (Outdegree). Esta gráfica muestra que el nodo que más entradas tiene corresponde a Hogares (H), y estas entradas provienen de los productos de Envases y Embalajes (EyE). Este resultado nos da una primera evidencia de que el consumo de los hogares pudiera ser un componente clave de esta red. Los nodos que le siguen al tener más salidas corresponden a los Desechos no recolectados (DNR), Vertederos (Vt) y Plástico reciclado (Pl Rcl).

¹Para ver la con mayor claridad la red véase la Tabla de flujo de materia en Apéndice [D](#)

Los DNR y Vt se deben de tomar en cuenta porque cuando la materia se encuentra en esos nodos se pierde, es decir la materia pierde toda posibilidad de ser aprovechada. Por el contrario, el PI Rcl a mayor cantidad de salidas mayores posibilidades existen en cuanto a su aprovechamiento.



(a) Red de la Centralidad Indegree (b) Red de la Centralidad Outdegree
 El tamaño de los nodos mide los enlaces de entrada de cada uno de los nodos. El tamaño de los nodos mide los enlaces de salida de cada uno de los nodos.

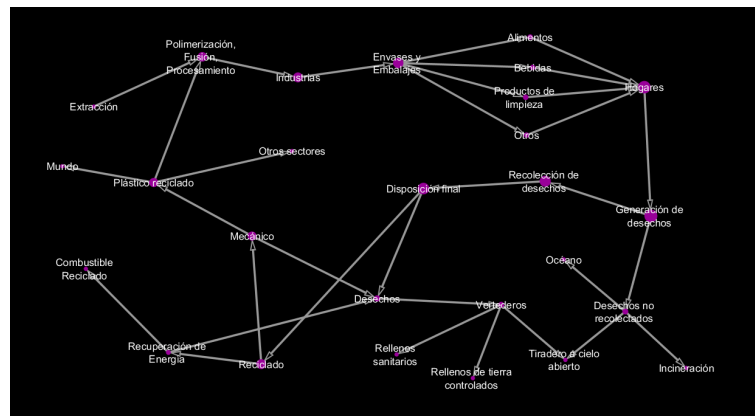


(c) Gráfica de la Centralidad de Grado (Indegree y Outdegree)

Figura 7.3: Centralidad de Grado de Red de Flujo de Materia

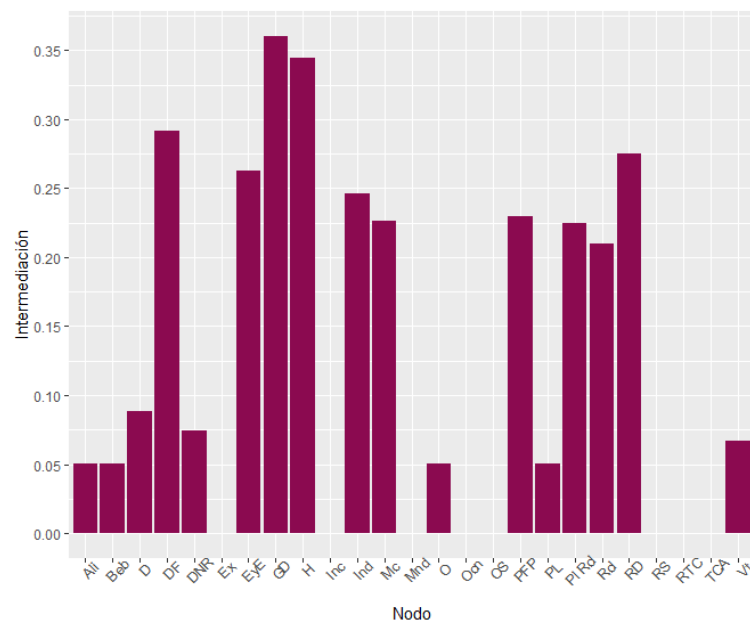
La centralidad de intermediación funge como un puente de conexión en la red. En la figura 7.4 se observan los resultados de esta medida de centralidad. Lo primero que resalta esta gráfica es que con esta medida no se obtienen resultados significativos que

den indicios de que algún nodo sea el intermediario de la red, pues todos los valores de los nodos son menores a 0.4; para que estos fueran considerados intermediarios dichos valores tendría que ser 1 o cercano a 1. Con esto se puede llegar a la conjetura que en la red todos los nodos ocupan un papel importante en el funcionamiento del flujo de la materia. Sin embargo, los nodos con valores más altos son Generación de Desechos (GD) y Hogares (H), pues alcanzan un valor de 0.35. Esto tiene sentido si se observa la red que corresponde a la figura [7.2](#) donde el enlace de los nodos GD y H es donde se conecta la parte de producción y consumo con la parte de desecho del plástico. Como se dijo anteriormente, en esa red todos los nodos tienen un nivel de intermediación, pero la desconexión del nodo H o GD se traduciría en un colapso entre la cadena de producción y consumo y la cadena de disposición de los desechos plásticos.



(a) Red de la Centralidad Intermediación

El tamaño de los nodos refleja el valor numérico de esta medida.

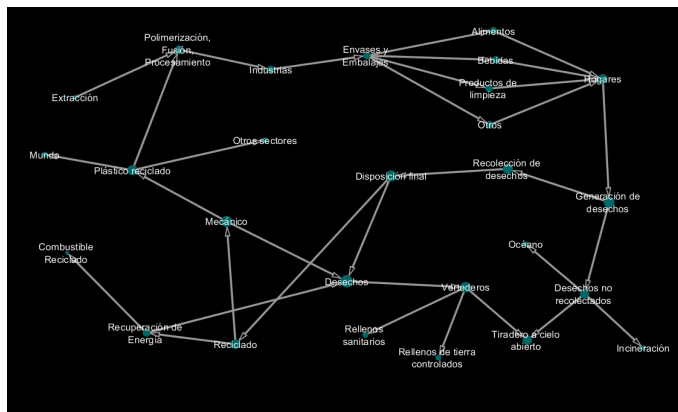


(b) Gráfica de la Centralidad de Intermediación

Figura 7.4: Centralidad de Intermediación de Red de Flujo de Materia

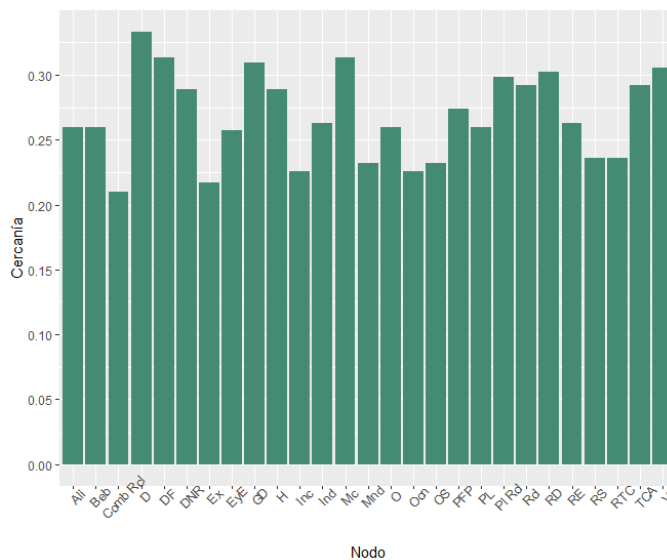
Por su parte, la centralidad de cercanía, presentada en la figura [7.5](#), muestra valores muy cercanos entre si; el valor más bajo oscila por el 0.20 y el más alto es un poco mayor al 0.30. Con estos resultados es difícil precisar que nodo se encuentra en promedio en la distancia más corta de todos los demás nodos, visualmente se puede apreciar mejor en la figura [7.5](#)-a que el tamaño de los nodos representan los

valores de la centralidad de cercanía y en sí no hay algún nodo que sobresalga. De modo de lista los nodos que tienen los valores más altos son Desechos (D) y luego Disposición Final (DF), Generación de Desechos (GD) y Reciclado Mecánico (Mc); sin embargo los valores que tienen estos cuatro nodo mencionado no se tienen la evidencia suficiente para señalarlos como nodos fundamentales para que la materia fluya de forma más rápida.



(a) Red de la Centralidad Cercanía

El tamaño de los nodos mide el valor numérico del promedio de las distancias más cortas desde un nodo hacia todos los demás.



(b) Gráfica de la Centralidad de Cercanía

Figura 7.5: Centralidad de Cercanía de Red de Flujo de Materia

7.3. Análisis del MBA

En el siguiente apartado se presentan los resultados obtenidos del modelo basado en agentes utilizando la red de flujo de materia que aplica el marco conceptual de la economía circular, desarrollado en el apartado [2.1](#), para los desechos plásticos. En específico los que provienen de la industria de envases y embalaje que en su mayoría corresponden a los plásticos tipo PET y HDPE.

Los resultados presentados a continuación se dividen en dos partes. En la primera, se analizan los ciclos, lo cual se refiere al número máximo de vueltas que la materia puede dar dentro de una economía circular. Estos ciclos se analizan comparando los diferentes escenarios y la variación de la cantidad de materia que se inserta en el modelo. En la segunda parte, se analizan los nodos atractores, estos representan el destino final en el ciclo de la materia. El análisis se realiza entre los diferentes sectores y con la variación de N.

A partir de los siguientes resultados se busca comparar el escenario base, que simula la situación real de México, con escenarios hipotéticos con el fin de encontrar cuál de ellos sería la mejor opción y, a su vez, señalar las limitaciones y posibles retos que nos enfrentamos al aplicar una economía circular en los desechos plásticos de envases y embalajes.

7.3.1. Ciclos

Como se mencionó anteriormente (inicio del apartado [7.3](#)) en esta sección se analizará los ciclos de la materia del MBA, se toma como referencia que el tiempo promedio de vida de un Envase y Embalaje es de 6 meses. Por lo tanto, en este modelo consideramos que un ciclo equivale a medio año, dos ciclos equivale a un año y así sucesivamente como se muestra en el Cuadro [7.1](#).

| Tabla de Conversión | |
|----------------------------|-------------|
| <i>Ciclos</i> | <i>Años</i> |
| 2 | 1 |
| 3 | 1.5 |
| 4 | 2 |
| 5 | 2.5 |
| 6 | 3 |
| 7 | 3.5 |

Cuadro 7.1: Tabla de equivalencia entre los ciclos del MBA y los años

En la figura [7.6](#) se obtuvieron los ciclos promedios en función del aumento paulatino de la tasa de reciclaje. Lo primero que se muestra es que hay una relación directa entre la tasa de reciclaje y la cantidad de ciclos, en otras palabras a mayor tasa de reciclaje mayor número de ciclos. También existe un límite en el número de veces que se puede reciclar la materia, aunque se reciclara el 100% de la materia. Es fundamental resaltar este resultado pues nos confirman el hecho de que la recuperación de la materia es finita. En este caso, tal como lo muestra la figura [7.6](#), el tope máximo de ciclos que la materia puede llegar a tener es de 7.5; esto sería un poco menos de 4 años de vida de la materia; lo que resulta muy bajo si lo comparamos con el tiempo que tarda en degradarse que va de 150 a 1000 años.

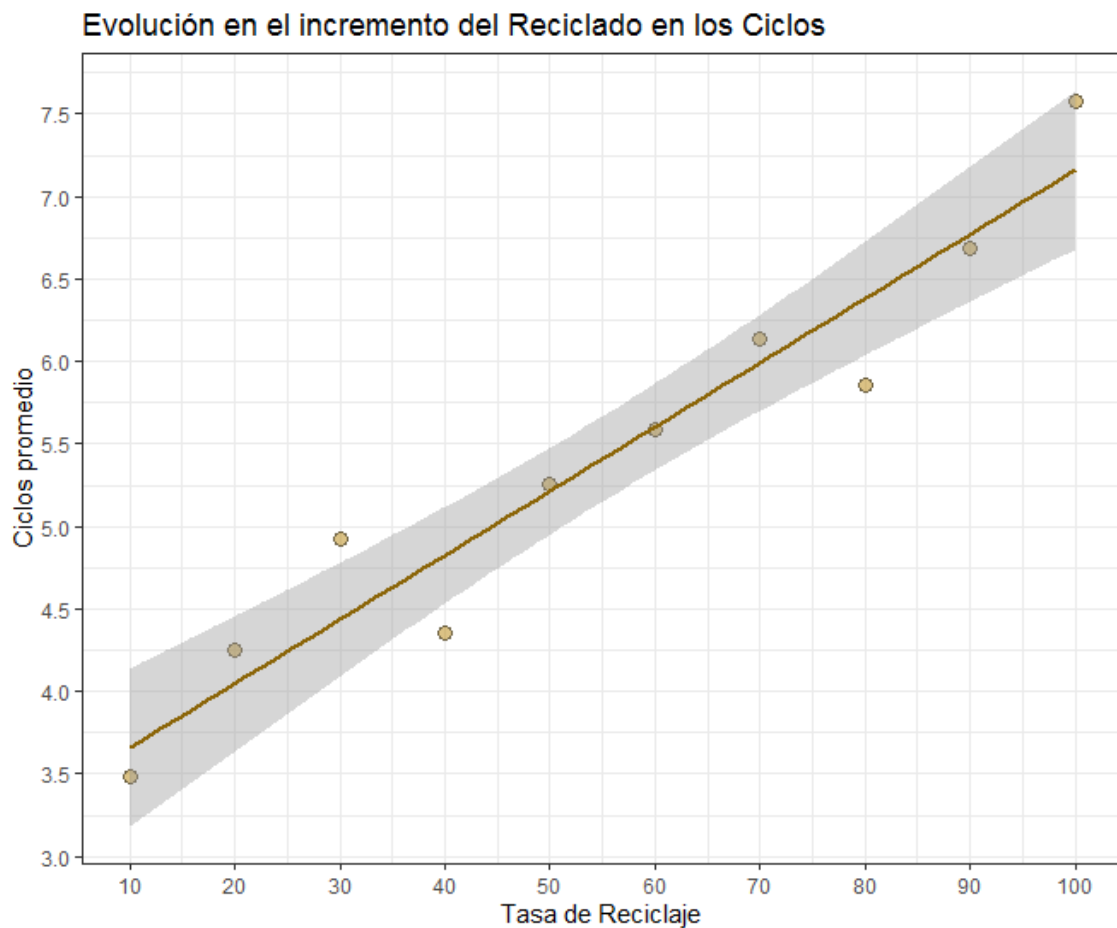


Figura 7.6: Número de ciclos promedio en relación con la tasa de reciclado

En los siguientes resultados se analiza el efecto que tiene el aumentar la cantidad de materia, definida como N , sobre el número de ciclos para cada uno de los escenarios. Donde N es la cantidad de unidades de materia que se incorporan a la red, en este caso estamos suponiendo que se mide en kilogramos. Se ejecutaron 300 corridas para cada N que se incrementó en 1000 unidades de materia hasta llegar a las 10000, todo este procedimiento se realizó para cada uno de los *Escenarios*.

En el Escenario Base (figura [7.7-a](#)) lo primero a denotar es que para $N = 1000$ y $N = 2000$ se acota el rango de la distribución de número de ciclos en un mínimo de un ciclo y un máximo de 4 ciclos y solo para ese par de valores de N es cuando representa el menor número de ciclos posible; dado que a partir de $N = 3000$ los rangos se mantienen uniformes y oscilan en valores que van de un ciclo hasta 7 ciclos. Sin embargo, en promedio la mayor concentración se encuentra en 3.5 ciclos.

En el Escenario 1 (figura 7.7-b) ni la distribución de cada uno de los valores de N ni los rangos para cada N son tan uniformes como en el Escenario Base, pero se puede observar que cuando $N = 5000$ el promedio (representado con un punto rojo) se estabiliza en un valor aproximado de 7 ciclos. Este patrón de comportamiento se repite para los demás Escenarios (2, 3 y 4) pues si se observa detenidamente se puede apreciar que en todos los casos cuando $N = 5000$ tiene prácticamente el mismo valor. Dicho valor es 5 ciclos, 6.5 ciclos y 6 ciclos respectivamente para cada uno de los escenarios.

Como era de esperarse el *Escenario 1*, que representa el escenario ideal donde se recicla el 100%, es el que sería el más eficiente en términos de uso y reuso de la materia. Sin embargo, es un escenario poco realista. Por otro lado, el *Escenario 3*, en el que también se obtienen buenos resultados, es más factible de lograr en el mediano plazo ya que da como resultado una tasa de reciclaje del 90% y mantener el reciclaje mecánico. Es importante señalar que para lograr estos objetivos no puede haber una simple ruta, dado que para ello se requiere una serie de acciones que involucran tanto la responsabilidad de las empresas en el destino final de los desechos producidos, como también la responsabilidad de los consumidores no solo en términos de consumo responsable sino porque, asimismo, se requiere una educación en la clasificación de residuos. Aunado a esto, el papel del Estado es fundamental debido a que es el promotor en la creación de un ambiente con reglas de operación que fomente una sinergia de cooperación entre todas las entidades involucradas: empresas, sociedad y gobierno.

Por su parte, el *Escenario 2* y *Escenario 4* también muestran buenos resultados; la diferencia es que para este par de escenarios se requiere una inversión en la infraestructura y tecnología de *Recuperación Energética* por lo que sería necesario un estudio socio-económico y ambiental de la rentabilidad de dicha inversión.

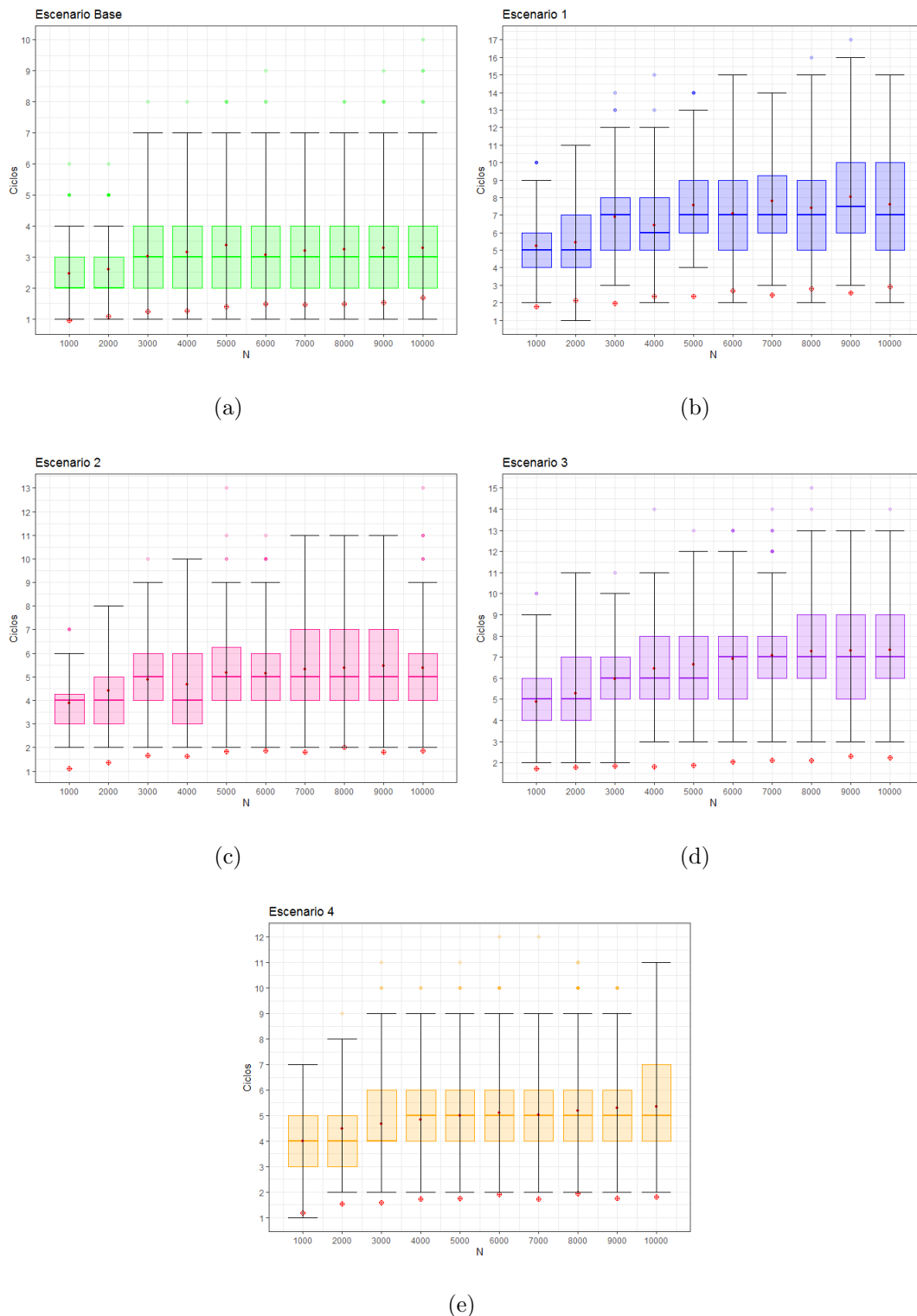
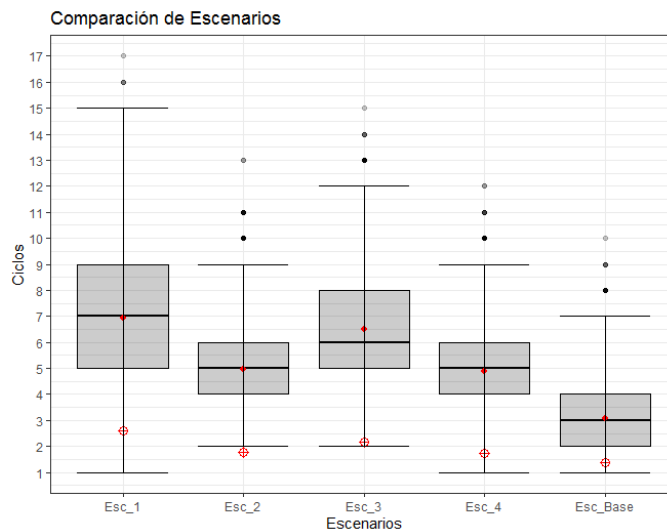


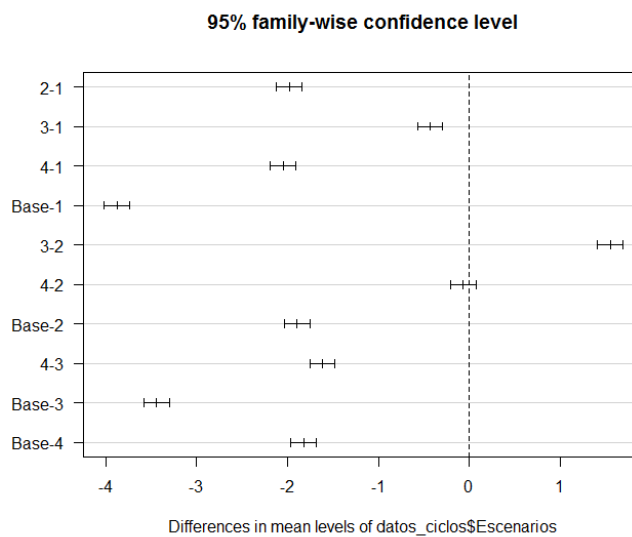
Figura 7.7: Ciclos en función de N

Las gráficas de bigotes tienen la cualidad de mostrar una mejor visualización de los datos y de las medidas de tendencia central. Las gráficas se dividen en cuartiles. Las cajas de colores muestran la distribución de los datos de la diferencia entre el valor del tercer cuartil y el primer cuartil; la línea horizontal que resalta es la mediana y es la media. Los bigotes representan el límite superior y el límite inferior; los puntos que están fuera de este rango son valores atípicos. Los puntos rojo que están fuera de la caja representan la desviación estándar.

A continuación en la figura [7.8](#) se muestran dos gráficas. En (a) se observa una comparación de los escenarios simulados. Los resultados muestran una clara ventaja de todos los escenarios en relación con el *Escenario Base*. Este pobre desempeño se puede explicar por la bajísima tasa de recuperación de la materia que hay actualmente en México. Como contraparte, se simularon escenarios alternos que pudieran fungir como alternativas al estado actual de este análisis de flujo de materia. El MBA sugiere que los resultados en estos escenarios son mejores. Es interesante señalar que por un lado el *Escenario 1* y el *Escenarios 3* presentan comportamientos similares entre sí; por otro lado el *Escenario 2* y *Escenario 4* también tiene resultados parecido.



(a) Comparación de escenarios



(b) Prueba ANOVA

Figura 7.8: Comparación de la evolución de los ciclos entre los diferentes escenarios

Lo descrito anteriormente se comprobó a partir una prueba ANOVA tal como se observa en la figura [7.8](#)-b. Según lo que esta prueba arrojó es que el *Escenario 1* y *Escenario 3* su variación es mínima al igual que la del *Escenario 2* y *Escenario 4*. Es importante recalcar que estadísticamente los demás pares de escenarios tienen una media que difiere significativamente. Esto prueba estadísticamente que cualquier escenario diferente al *Escenario Base* obtiene mejores resultados en cuanto al uso

y reuso de la materia.

7.3.2. Nodos Atractores

En esta sección se analiza la concentración de materia en los nodos atractores. Para este análisis se tomaron en cuenta 3000 datos para cada nodo que son 300 iteraciones para cada valor de N . Como resultado se puede observar que el nivel de dispersión es bajo ya que la mayoría de los puntos se encuentra muy cerca del promedio.

Por lo anterior, se puede conjeturar que no importa la cantidad de materia que se tenga en el sistema, pues esa variación no modifica el porcentaje de concentración que recibe cada uno de estos nodos atractores. A continuación, se analizará de manera puntual cada uno de los nodos atractores para el *Escenario Base* y los demás escenarios hipotéticos.

La figura [7.9](#) ilustra el nodo de *Incineración*; lo primero que se puede ver es que para todos los escenarios, incluyendo el *Base*, no hay una variación significativa en el porcentaje de materia pues oscila entre el 8% y 9%. Sin embargo, se puede ver cierta dispersión de los valores que tiende a porcentajes menores al 8%. Por lo cual, para este nodo no se puede elegir un mejor o peor escenario, pues sin importar cuál sea esta la concentración de la materia se mantiene constante.

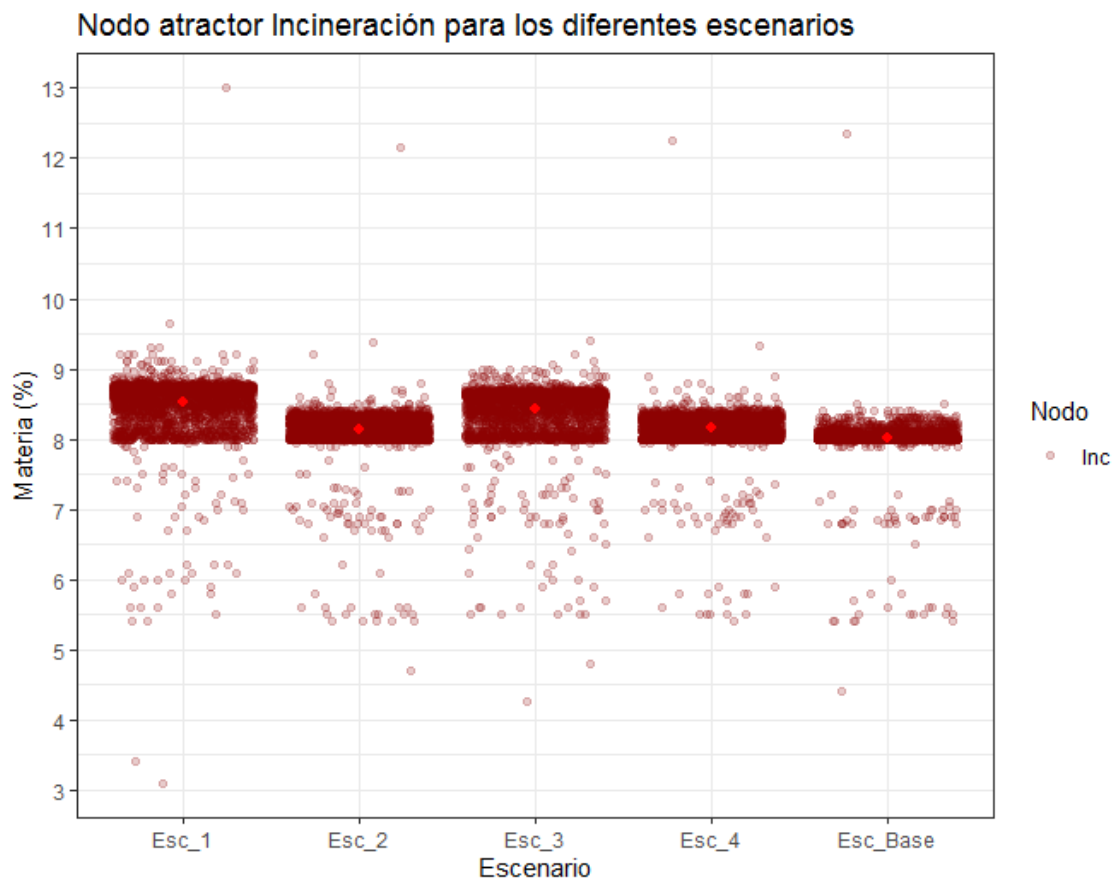


Figura 7.9: Nodo atractor Incineración para los diferentes escenarios

A continuación, la figura [7.10](#) muestra la concentración de materia que se destina al nodo *Océano*, al igual que el nodo anterior la concentración de la materia entre los escenarios se mantiene constante, su valor promedio está por debajo del 1%, lo cual es muy bajo. En este caso se observa que hay algunos puntos de dispersión con valores por encima del valor promedio. En términos generales, al igual que el nodo *Incineración*, no se observa un cambio significativo entre los diferentes escenarios.

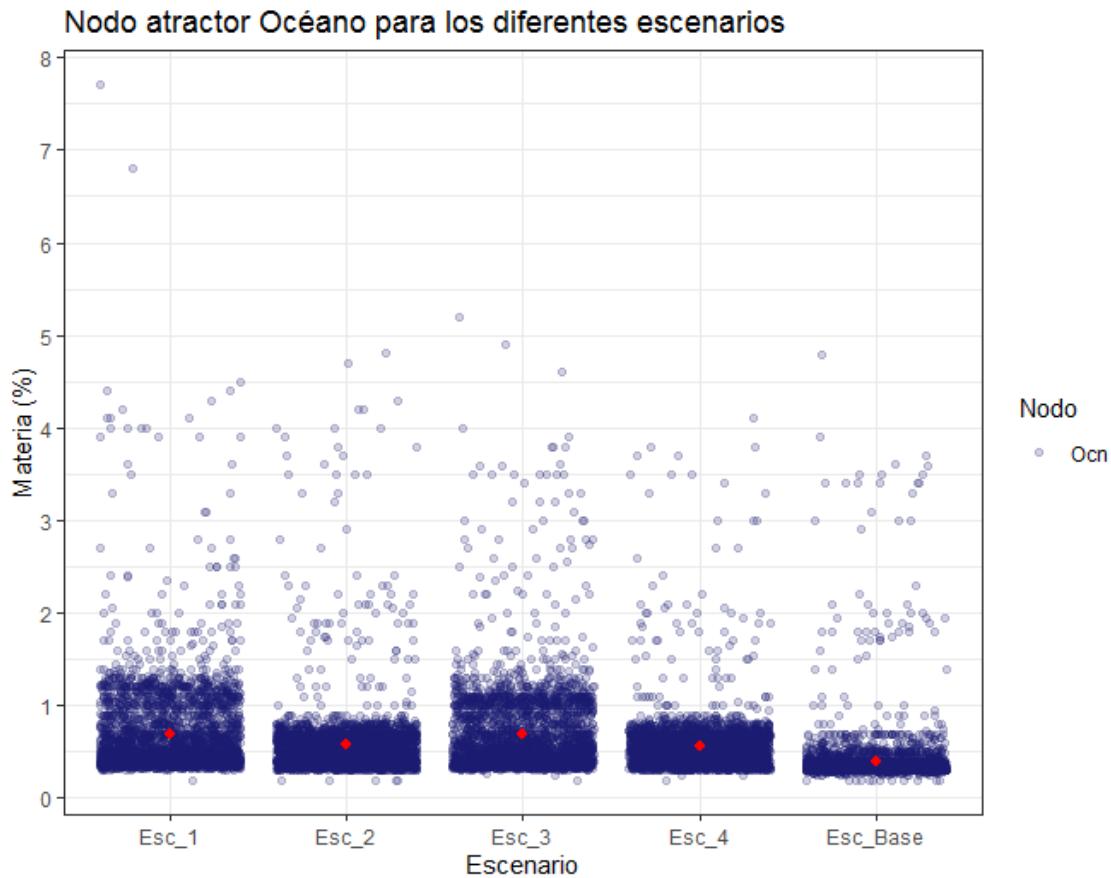


Figura 7.10: Nodo atractor Océano para los diferentes escenarios

A diferencia del par de nodos analizados anteriormente, el nodo atractor *Tiradero a Cielo Abierto (TCA)* muestra una distribución de la materia distinta para los diferentes escenarios. Esto se puede apreciar en la figura [7.11](#) que está a continuación. En este caso se observa que en el *Escenario Base* tiene una concentración de la materia de un poco más del 20%, mientras que los otros escenarios reportan una disminución considerable. El *Escenario 2* y el *Escenario 4* presentan la mínima concentración de la materia con un valor promedio del 10%; por su parte, el *Escenario 1* y el *Escenario 3* tienen un valor promedio que oscila entre el 12% y 14%. La disminución de materia en este nodo es fundamental debido a que el desecho plástico que termina en este tipo de vertederos no está controlada lo que conlleva a grandes repercusiones ambientales, pues en el mediano plazo muchos de estos desechos terminan en algún cuerpo de agua como ríos, lagos, lagunas o hasta en el océano. Lo que estos resultados muestran es que puede haber la posibilidad de disminuir la

concentración de la materia en *TCA* si se aplicara alguno de los escenarios que se proponen en este trabajo. En la propuesta específica del *Escenario 2* y *Escenario 4* se estaría hablando de una reducción de hasta el 50% de la concentración de materia en *TCA*.

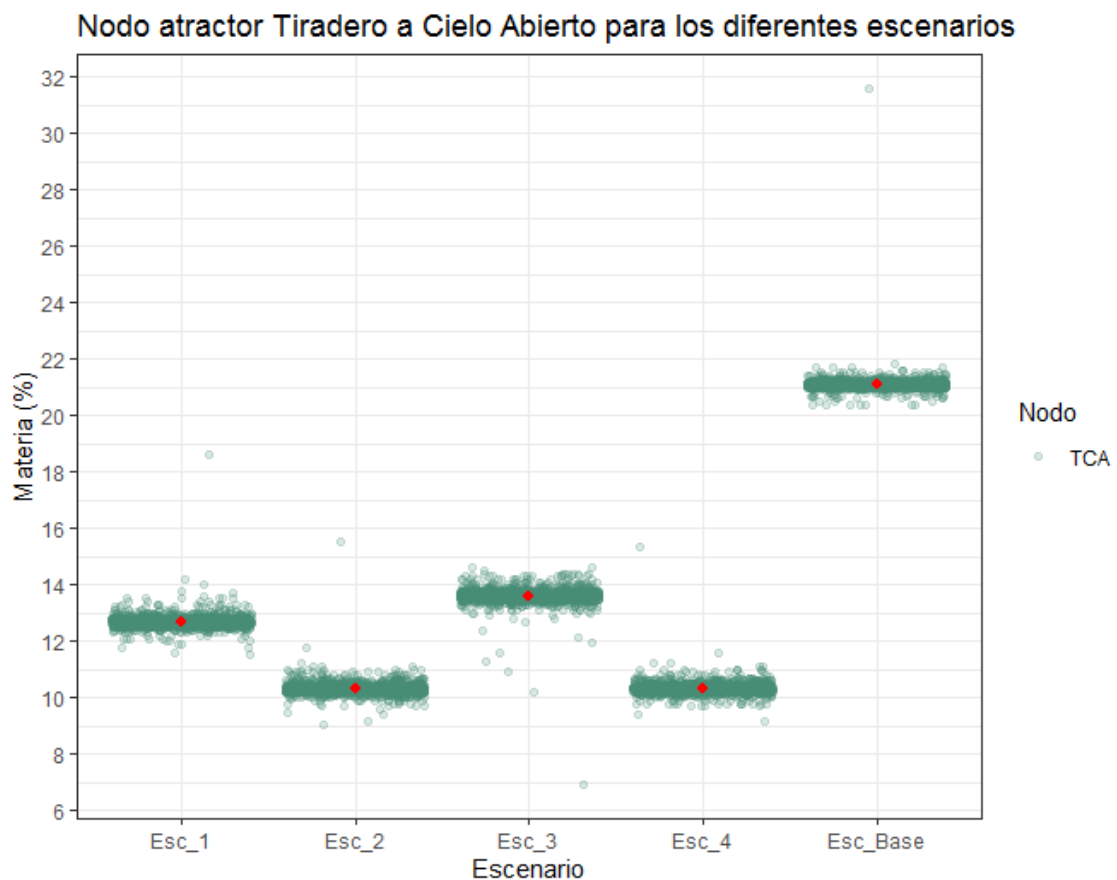


Figura 7.11: Nodo atractor Tiradero a Cielo Abierto para los diferentes escenarios

En la figura [7.12](#) se pueden ver los resultados del nodo atractor de *Relleno de Tierras Controladas (RTC)*. La concentración de la materia en este nodo es relativamente baja pues en todos los escenarios está por debajo del 8%. Sin embargo, el *Escenario Base* se mantiene a la cabeza con la mayor concentración con un promedio del 7%. Mientras que el *Escenario 2* concentra la menor cantidad de materia en aproximadamente un 3%, lo que implicaría una reducción de un 42% si se aplicara esta alternativa en lugar de mantener el *Escenario Base*. Lo que es importante resaltar es que este tipo de vertedero es controlado. No obstante, resulta un tanto incierto reconocer las diferencias con un relleno sanitario, en este sentido si la materia de

RTC se agregara a los rellenos sanitarios resultaría una concentración mucho más preocupante que la que existe actualmente.

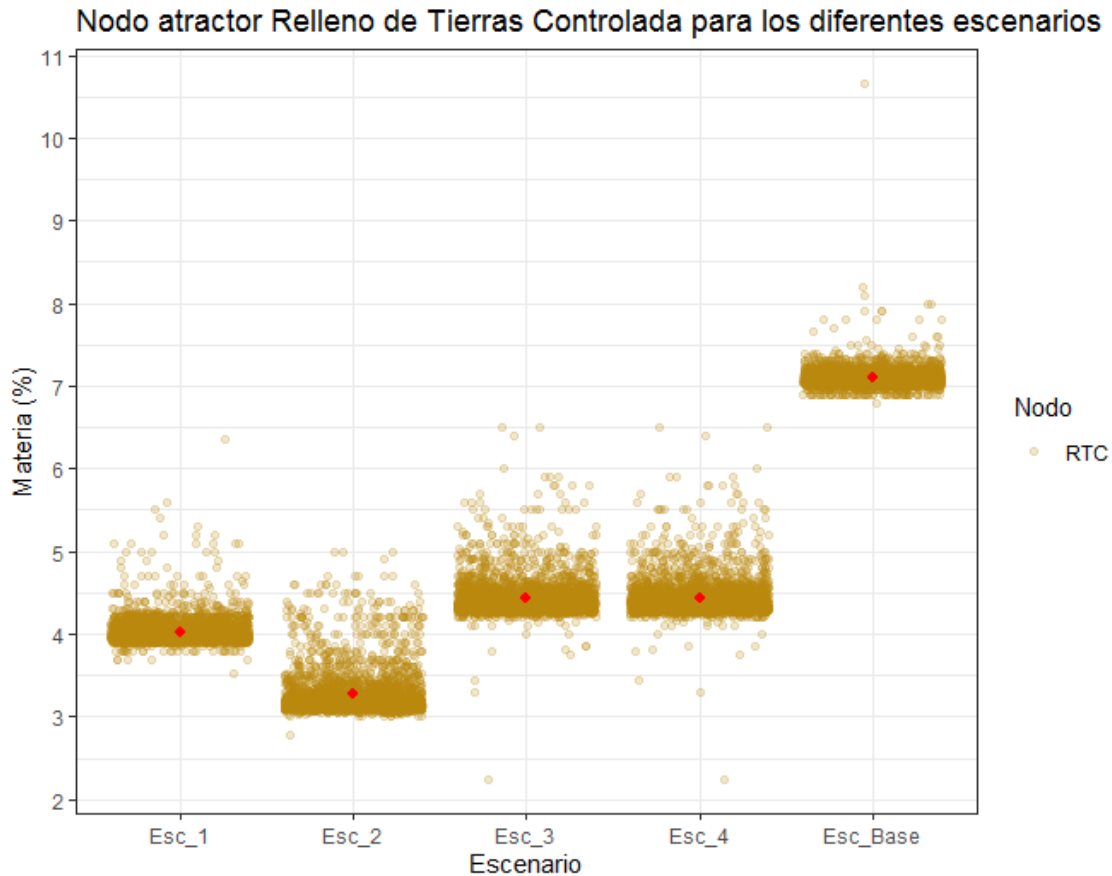


Figura 7.12: Nodo atractor Relleno de Tierras Controladas para los diferentes escenarios

Tal como se muestra en la figura [7.13](#) que presenta los resultados del nodo *Relleno Sanitario (RS)* la concentración de la materia es alarmante en el *Escenario Base* ya que representa un 60 % del total de la materia lo que significa que la mayor parte está en este nodo. Si bien es cierto que los *RS* son controlados, la realidad es que la mayor parte de los desechos que se deposita en este tipo de vertedero no recibe ningún tipo de valorización o recuperación. Aunado a esto, un *RS* no es viable para desechar los residuos plásticos debido al tiempo que dilatan en degradarse, lo que implica que se conviertan en basura acumulada sin posibilidad de reuso ni reciclaje. Hay un límite en la contención de basura, ese límite está dado por cuestiones de impacto ambiental como por ejemplo la descomposición de la tierra, cuestiones sociales como

la sanidad de la población y cuestiones económicas que se verían reflejadas en el costo de reparar el daño ambiental y social. Ciertamente el modelo no otorga un escenario en donde la materia desaparezca porque eso es imposible debido a límites físicos y químicos de la materia, sin embargo el *Escenario 2* y el *Escenarios 4* (figura 7.13) brindan una mejor opción con una reducción en la concertación de la materia de aproximadamente un 40% en comparación con el *Escenario Base*, esto resulta benéfico debido a que el ritmo de la tasa de acumulación de la materia se desacelera. Lo que se debe señalar es que esta alternativa solo aplica en el corto-mediano plazo puesto que en el largo plazo la acumulación de la materia es insostenible.

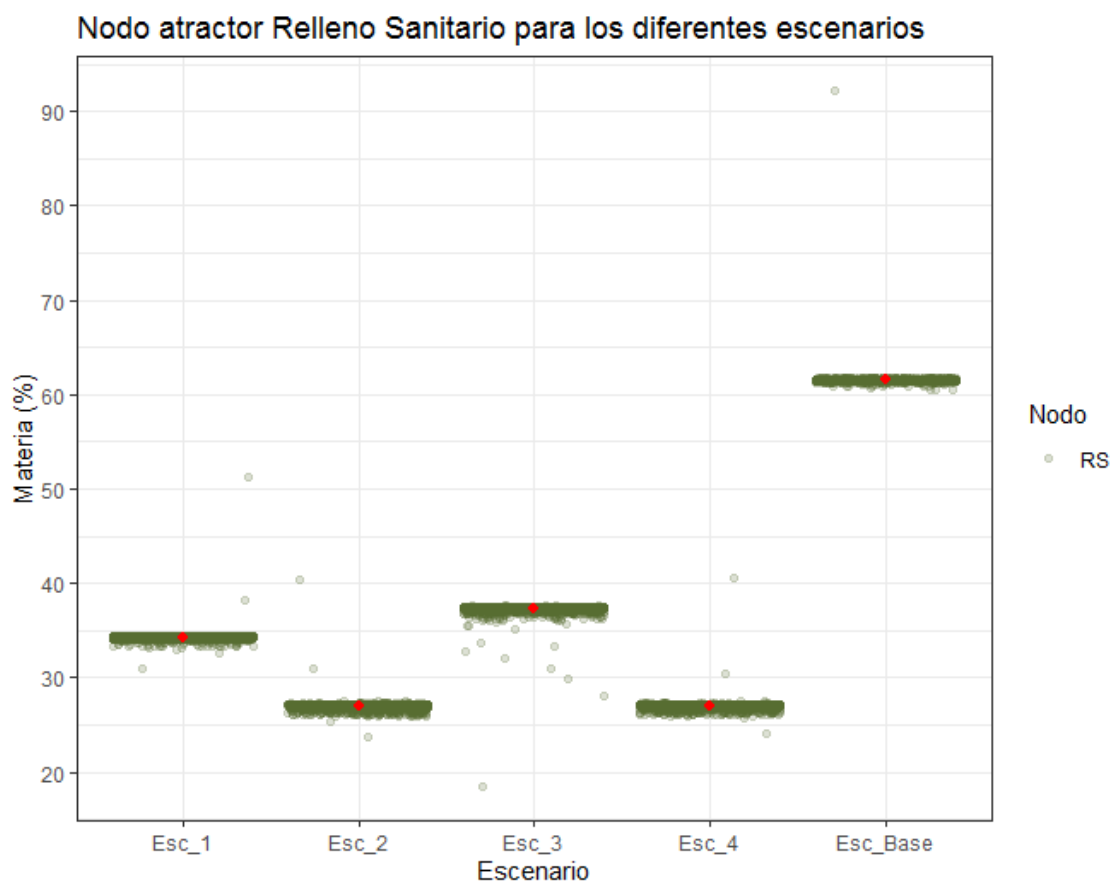


Figura 7.13: Nodo atractor Rellenos Sanitarios para los diferentes escenarios

El siguiente nodo atractor que se analiza es *Mundo (Mnd)*, este se refiere a las exportaciones de plástico reciclado que realiza México al resto del mundo. En la figura 7.14 se muestra el bajo nivel de concentración de materia que se tiene en el *Escenario Base* que es aproximadamente del 2.5%. Por el contrario, en el *Escenario*

1 y *Escenario 3* se obtiene una concertación alrededor del 25% y 30% las cuales representan cifras notablemente superiores. A pesar de ello, se encuentra una disyuntiva dentro de la lógica de la sustentabilidad; si bien es cierto que las exportaciones de plástico reciclado cumplen el objetivo de aprovechamiento de la materia, también es verdad que en el sistema social, económico e incluso en el ambiental se podrían desencadenar situaciones negativas. Dentro de la lógica económica, la exportación de plástico reciclado resulta tener un bajo arrastre en la economía mexicana debido al bajo nivel agregado que tiene. El plástico reciclado de exportación no es otra cosa que materia prima para la elaboración de productos con mayor valor agregado que forman parte del sector textil, automotriz, construcción, etc. Lo que significa que México estaría comprando lo que vendió en productos más caros. Sin embargo, es necesario un análisis más profundo en donde se pueda identificar el costo- beneficio no solo en lo económico sino también en lo social y ambiental.

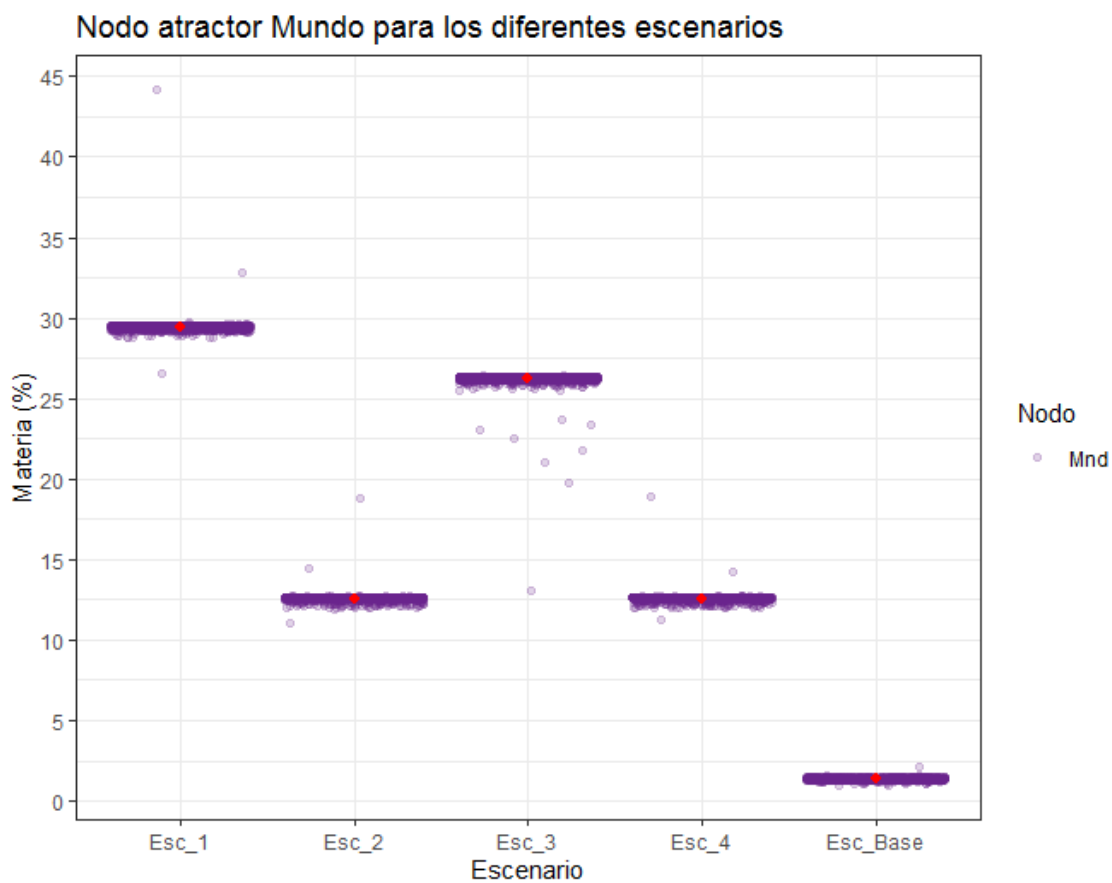


Figura 7.14: Nodo atractor Mundo para los diferentes escenarios

El nodo atractor que se representa en la figura [7.15](#) se refiere a *Otros Sectores (OS)* esto significa productos fabricados a partir del plástico reciclado que no son envases ni embalajes. En este sentido se espera que dichos productos tengan una vida útil más larga a diferencia de los envases y embalajes. En la gráfica inferior se nota una raquílica concertación de la materia en este nodo para el *Escenario Base* que tiene un valor menor al 1%. Mientras que el *Escenario 1* y el *Escenario 3* tienen aproximadamente 10% y 9%, respectivamente. A pesar de que estos dos últimos escenarios proponen una mayor participación en este nodo, el valor sigue siendo deficiente. Sin duda, se debe de incidir en que el flujo de materia se destine en una mayor proporción a este nodo ya que este abre la posibilidad de que la materia tenga una mayor durabilidad y uso; a diferencia del nodo *Mundo* en el que la fabricación de los nuevos productos se hace al exterior. El nodo *OS* propone que la manufactura se desarrolle a nivel nacional lo cual tendría un arrastre importante en la interacción de los sectores productivos y además generaría empleos. Sin embargo, los resultados de esta investigación sugieren que la mayor parte del plástico reciclado se exporta lo que significa la fuga de un importante generador de valor. Para contrarrestar esta situación se necesita la creación de un ambiente en donde el material reciclado se pueda incorporar a las industrias nacionales de los diferentes sectores que utilizan como materia prima el plástico para la elaboración de sus productos. Se debe de apostar a fortalecer las industrias nacionales más que a la exportación.

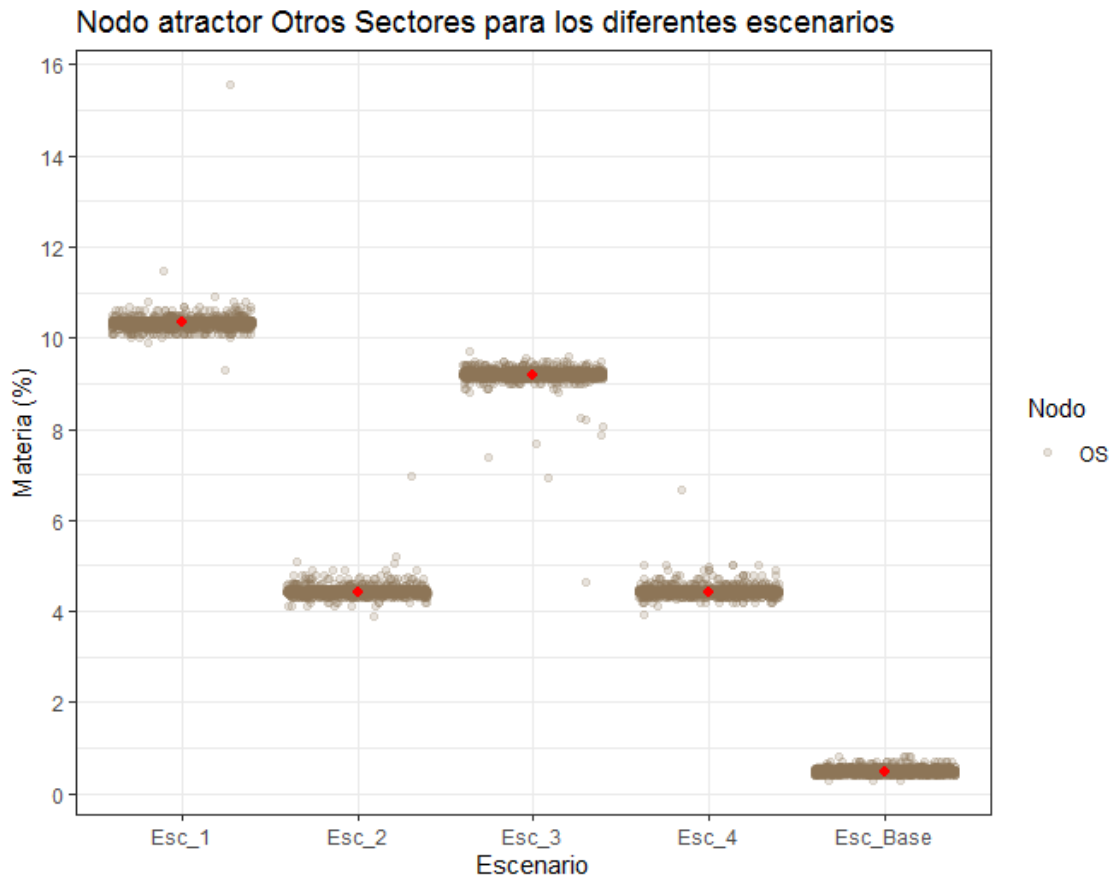


Figura 7.15: Nodo atractor Otros Sectores para los diferentes escenarios

La figura [7.16](#) es el nodo llamado *Combustible Reciclado (CombRcl)*, esta opción de manejo de residuos solo se aplicó en el *Escenario 2* y el *Escenario 4*, lo que propone es que a partir de la tecnología de *Recuperación Energética* se pueda recuperar la materia para convertirla en energía. En esta gráfica se puede observar que para los dos escenarios se obtienen los mismos resultados en términos de captación de la materia que se aproximan a un 34%. La particularidad que tiene este nodo es que resulta ser una opción muy beneficiosa en términos de recuperación de materia; pero, al igual que en el caso del nodo *Mundo* se necesita realizar un análisis de costo- beneficio en el aspecto económico y ambiental. Para poner en marcha esta tecnología se requiere una importante inversión. Además hay situaciones inherentes como la generación de dióxido de carbono y otros gases nocivos para la sociedad.

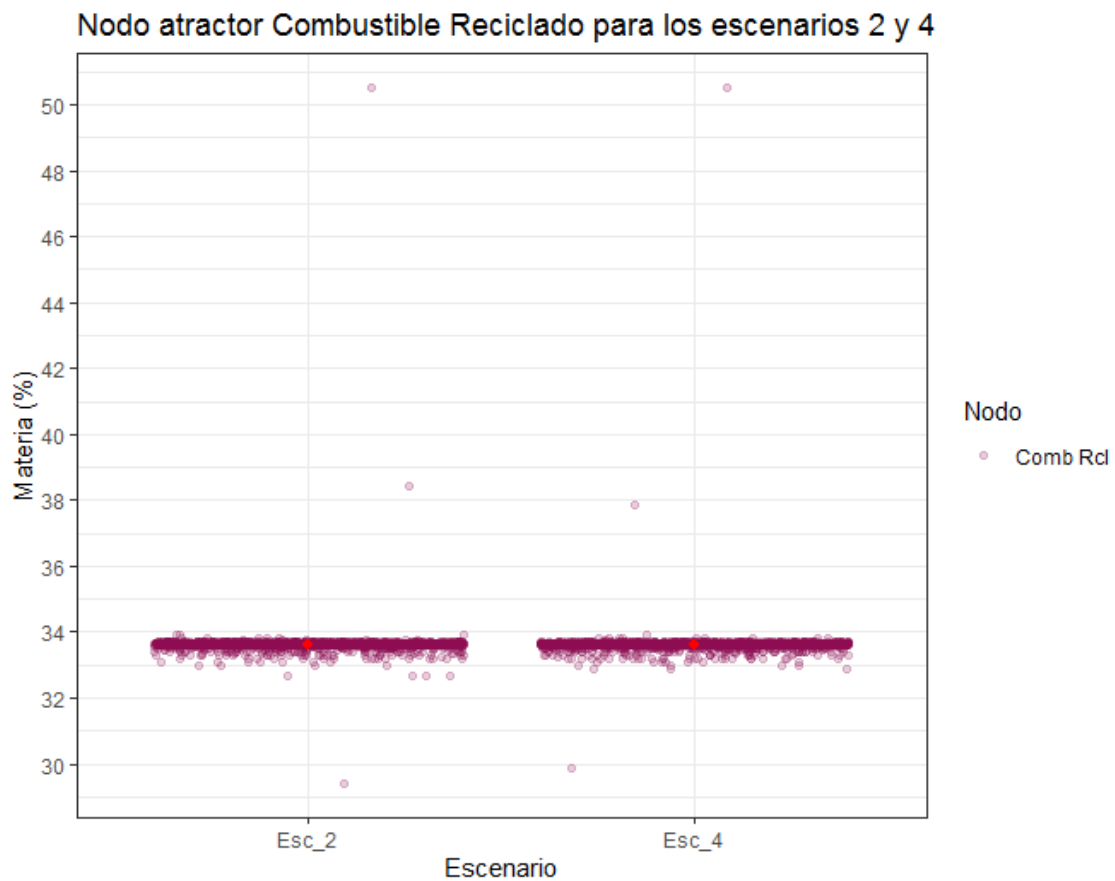


Figura 7.16: Nodo atractor Combustible Reciclado para los diferentes escenarios

Tal como se ha analizado en los resultados anteriores las limitantes físicas y tecnológicas impiden la recuperación de todos los componentes químicos que se utilizan para la elaboración del plástico para que se pueda reciclar en su totalidad. Sin embargo, es importante señalar que el hecho de reciclar, reusar o recuperar la materia, tal como lo propone la economía circular, sí produce una reducción en los desechos plásticos, pero es insuficiente para el mediano y largo plazo pues la materia plástica continúa en el ambiente y tarda mucho tiempo en degradarse. El uso, tratamiento y manejo que se le ha dado al plástico es insostenible, es necesario cambiar la forma de cómo lo producimos y cómo lo consumimos.

7.4. Síntesis Final

En esta sección se presenta el cuadro [7.2](#)² con un resumen de los resultados obtenidos del MBA, con el fin de obtener una conclusión más precisa del escenario más eficiente y con ello proponer soluciones. Como se pudo apreciar a lo largo de este apartado ningún escenario es perfecto, todos tienen cosas positivas y negativas; sin embargo, a partir de ellos se puede trabajar para obtener mejores oportunidades en términos de eficiencia en el manejo de residuos plásticos de envases y embalajes.

| Escenarios | Ciclos | | Nodos Atractores (%) | | | | | | | Puntuación |
|------------|------------|------------|----------------------|------------|------------|-----------|------------|-----------|----------------|------------|
| | (promedio) | <i>Inc</i> | <i>Ocn</i> | <i>TCA</i> | <i>RTC</i> | <i>RS</i> | <i>Mnd</i> | <i>OS</i> | <i>CombRcl</i> | |
| Base | 3 | 8 | 0.5 | 21 | 7 | 60.5 | 2.5 | 0.5 | NA | 10 |
| 1 | 7 | 8.5 | 1 | 13 | 4 | 35 | 30 | 10.5 | NA | 23 |
| 2 | 5 | 8 | 0.5 | 11 | 3.5 | 25 | 12.5 | 4.5 | 34 | 22 |
| 3 | 6.5 | 8.5 | 1 | 14 | 4.5 | 35 | 25 | 9 | NA | 18 |
| 4 | 5 | 8 | 0.5 | 11 | 4.5 | 25 | 12.5 | 4.5 | 34 | 20 |

Cuadro 7.2: Cuadro resumen de resultados

Como se podía anticipar, el *Escenario Base* tiene los peores resultados por lo que un cambio en el consumo y manejo de residuos plásticos de los envases y embalajes es indispensable. En términos generales, de acuerdo a los resultados puede haber dos caminos posibles. Por un lado aumentar la tasa de reciclaje con las mismas tecnologías que se tienen hasta el momento en el país. Por el otro lado, además de aumentar la tasa de reciclaje se debería de invertir en nuevas tecnologías de recuperación energética. La cuestión es decidir cuál es la mejor opción, cabe señalar que por cuestiones de tiempo en este trabajo no se realizó un análisis de costo-beneficio el cual aportaría mucho a esta investigación debido a que nos daría más elementos para decidir el escenario más factible. Sin embargo se tiene contemplado realizar este análisis para una próxima investigación. A continuación se hará una

²Para construir el cuadro resumen de resultados se comparó lo que se obtuvo en el análisis de ciclos y en el análisis de los nodos atractores. Los colores que se observan se jerarquizaron y se evaluaron con diferentes puntuaciones: el verde con 4 puntos, el amarillo con 3 puntos, el naranja con 2 puntos y el rojo con un punto. El color dependió de la posición en que se encontraba cada escenario: primero en función del que tenía mayor número de ciclos y segundo en función de la concentración de materia para cada nodo atractor. Al final se sumaron las puntuaciones y se obtuvo un valor cuantitativo del nivel de eficiencia de los escenarios.

breve descripción de los pros y contras de cada uno de los escenarios.

Según el Cuadro [7.2](#) el *Escenario 1* obtuvo la puntuación más alta si bien con este escenario se puede dar uso de la materia por más tiempo ya que reporta en promedio el número de ciclos más alto. Además, en este escenario se exporta la materia en un porcentaje mayor que en resto. Las desventajas que tiene el *Escenario 1* en primer lugar es que se considera un escenario poco realista, después la concentración de materia en los vertederos, en especial *Rellenos Sanitarios*, es diez puntos porcentuales más elevada a comparación del *Escenario 2* y *Escenario 4* y finalmente los nodos de *Incineración* y *Océano* presenta un incremento minúsculo sobre el *Escenario Base*.

El segundo con mejor puntuación corresponde al *Escenario 2* en donde se plantea una inversión en uso de nuevas tecnología para el aprovechamiento de la materia como es la *Recuperación Energética*. En términos de disposición de la materia resulta tener buenos resultados ya que la reducción en la concentración de la materia en vertederos se reduce casi un 50 % en relación de lo que se tiene en el *Escenario Base*. Sin embargo en este caso hay una reducción considerable de la materia que se destina a la exportación o a *Otros Sectores* esto es debido a que un 34 % de esta materia se transforma en *Combustible Reciclado*.

En tercer lugar está el *Escenario 4* que tal como se puede observar en el Cuadro [7.2](#) hay una similitud en los resultados con el *Escenario 2*.

Finalmente, el *Escenario 3* tiene la puntuación más baja de los cuatro escenarios propuestos. No obstante, es importante resaltar que este escenario en general presenta resultados muy buenos en comparación con el *Escenario Base*. La diferencia es que en este escenario no se propone invertir en nuevas tecnologías, sino obtener una eficiencia óptima en el manejo de los residuos plásticos en función de las tecnologías disponibles en México. Lo que se sugiere es que con este escenario se maximizan los beneficios en términos de la disposición de los residuos ya que la reducción del *Relleno Sanitario* es significativa en relación con el *Escenario Base* y una importante proporción de la materia se destina como plástico de exportación.

Además el tiempo de uso de la materia es casi igual al *Escenario 1*. Por lo que se puede concluir que el manejo de los residuos plásticos no depende de una mejora en la tecnología sino en la eficiencia de la disposición final de los residuos plásticos de envases y embalajes.

Capítulo 8

Conclusiones

El plástico es un material derivado del petróleo que se utiliza en la mayor parte de los sectores económicos a nivel global. El gran reto es cómo hacer para que la tasa de crecimiento tan acelerada de los desechos plásticos se reduzca. En los últimos años se ha registrado que casi un 50 % de estos desechos provienen de la industria de empaque de plástico, es decir productos desechables o de un solo uso. Esto nos introduce a un callejón sin salida, pues si basamos una economía que depende de un material (en este caso el plástico) elaborado con un recurso finito que, además el uso que le damos es por un tiempo ridículamente corto; se llega a la conjetura que el actual sistema productivo es insostenible tanto en lo medioambiental como en lo económico y lo social.

La economía circular pretende dar un giro al actual sistema productivo lineal, sin embargo estos bucles de retroalimentación que propone están acotados por la tecnología que se tiene para el reciclaje y reuso de desechos plásticos. Además, los costos sociales y ambientales que provoca el reciclaje de este material son altos por la cantidad de dióxido de carbono que emite este proceso y la cantidad de energía que se requiere. La economía circular puede ser una estrategia de política ambiental para mitigar el problema en el corto plazo, pues en el mediano y largo plazo los desechos plásticos seguirán existiendo en la misma proporción de lo que se tiene hoy en día. En suma esta medida no es suficiente si se desea transitar hacia la Sustentabilidad.

El modelo basado en agentes resulta un herramienta novedosa que permitió hacer un análisis de flujo de materia y, a la vez, aplicar un enfoque sistémico. Con el uso de este modelo se pudo descubrir aspectos del problema a los que, posiblemente, no se hubiera podido llegar a la luz de otros instrumentos de análisis. En primer lugar, se detectaron algunos nodos atractores que son muy relevantes para la mitigación de los desechos plásticos de envases y embalajes. En ese sentido resulta fundamental analizar de forma muy puntual la evolución del nodo *Rellenos Sanitarios* en los diferentes atractores pues como se mostró los resultados son alarmantes, por lo que es de suma importancia hacer un ajuste en la Política Ambiental para mejorar la disposición final de los residuos. Por el otro lado, se plantea la necesidad de invertir en nuevas tecnologías capaces de transformar la materia en energía, sin perder de vista que dichas tecnologías traen consigo una serie de inconvenientes.

De acuerdo al MBA donde se analizó la red de flujo de materia se encontró que que si la producción de plástico aumenta manteniendo la baja tasa de reciclaje que se tiene actualmente (alrededor del 5%), no hay un cambio significativo en la proporción de materia que se destina a los vertederos y a la exportación. Por el contrario, si se aumenta la tasa de reciclado o bien si se reciclará al 100% la materia, se puede observar que existiría un límite en su recuperación. Por lo tanto, no es viable proponer esquemas de producción donde se busque tener cero desperdicios.

En este trabajo se propusieron varios escenarios hipotéticos con el fin de proporcionar alternativas y mejoras en el manejo de residuos plásticos de envases y embalajes a partir de una simulación de una economía circular. La principal conclusión es que para disminuir la cantidad de materia que se destina a los vertederos hay dos rutas (en ambas opciones se tiene que aumentar de manera drástica la tasa de reciclaje): en la primera opción se propone invertir en nueva tecnología y la segunda es mantener la tecnología actual. Para tomar una decisión de la ruta más adecuada es necesario un estudio más detallado del costo- beneficio. Sin embargo, de acuerdo a los resultados presentados no se requiere invertir en nuevas tecnologías para obtener un mejor desempeño en el manejo de los residuos plásticos de envases y embalajes.

Capítulo 9

Recomendaciones

Si bien es cierto que la exportación del plástico reciclado significa beneficiosos para el país, también se debería de fomentar de una cadena de valor que incluya la reconversión de la materia en productos más duraderos y con mayor valor agregado. Se debe buscar la creación de un ambiente propicio para incentivar a la industria del reciclado nacional y evitar fugas de valor.

El combate contra la acumulación de los desechos plásticos no depende únicamente de un mejor modelo económico, sino de la autoorganización de la sociedad. El cambio de hábito en el consumo individual hará que emerjan nuevos patrones en lo colectivo. Para ello se necesitan incentivos y sobre todo concientizar a los individuos. Por el lado, es necesario que las empresas se hagan responsables de los desechos de sus productos. En este sentido se requiere una economía de servicios donde el productor no solo produzca su producto sino también se haga cargo de los envases y embalajes desde la cuna hasta la tumba. El Estado juega un papel esencial, se va a desempeñar como mediador entre productores y consumidores y va a poner las condiciones necesarias para propiciar una sinergia entre los agentes económicos. El Estado no es el único agente sobre el que recae la responsabilidad de incentivar a la población para cambiar su forma de consumo, también debe de coadyuvar al sector industrial invirtiendo en mecanismos y plataformas que permitan la recolección de envases y embalajes plásticos de forma eficiente. solo a partir de la cooperación y la

ayuda mutua es como se pueden tejer puentes que nos permitan transitar hacia la sustentabilidad.

Para transitar hacia una verdadera sustentabilidad es necesario que nosotros como individuos nos despojemos de paradigmas arcaicos en donde el uso y desuso, el desperdicio y el consumo irracional de los objetos predomina. Es necesario crear conciencia de nuestra interrelación con el medio en el que habitamos y sobre todo conciencia en el efecto que tiene cada una de nuestras acciones en la sociedad, en el ambiente y en la economía; porque al final el planeta es un solo sistema que depende de nuestras acciones colectivas.

Apéndice A

Características de los tipo de plásticos

| CÓDIGO | TIPO DE PLÁSTICO | | METODO DE RECICLAJE | CARACTERÍSTICAS | ENLACE |
|--------|------------------|----------------------------|--|---|--|
| 1 | PET | Politereftalato de etileno | Puede ser reciclado en proceso primario de operación mecánico o secundario de operación química. El método químico puede ser por pirólisis o glicólisis o metanolisis. | El polímero del PET es generalmente fácil de reciclar porque la cadena de polímero tiene buena resistencia térmica, por lo que no hay degradación de la cadena del polímero durante el proceso de reciclaje. Esto permite que el PET se recicle una gran cantidad de veces antes de que se vuelva inutilizable, aunque la contaminación puede reducir el número de ciclos. Debe evitarse las mezclas con PVC produce mal olor y cambio de color. | https://www.ecologic.com/reciclaje-de-pet https://todoenpolimeros.com/2019/02/11/el-plastico-mas-facil-de-reciclar-parte-1/ |
| 2 | HDPE | Polietileno alta densidad | El método más usado es mecánico, pero por su eficiencia en la recuperación y uso de energía el más recomendable es químico por despolimerización térmica. El proceso mecánico, la operación de separación de densidades por flotación se complica cuando hay una mezcla con el PP por tener similar densidad | El proceso químico por hidrólisis, glicólisis o metanolisis, otorga alta pureza al polímero reciclado, que incluso puede ser mezclado con el polímero virgen y pueden ser utilizado en envases de consumo humano. Debe evitarse la utilización de elementos de PVC, ya que pueden provocar decoloración y malos olores. El HDPE y el PP son opacos y menos densos que el agua, por lo que son difíciles de separar en el reciclado. Se recomienda utilizar mezclas hasta 5% de PP para evitar grumos en el proceso de reciclado | https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/608513/89_2020_Documento_Plastico.pdf http://www.cedexmateriales.es/catalago-de-residuos/37/residuos-plasticos/gestion-del-residuo/valorizacion-material/250/reciclaje-quimico.html |

| | | | | | |
|---|------|---------------------------|--|--|--|
| 3 | PVC | Policloruro de vinilo | El PVC es prácticamente reciclable, debido a que es un plástico que procede de la sal (57%) y petróleo (43%). Los métodos empleados es principalmente mecánico, pero también el método químico. Para el método químico se utiliza pirólisis cuando el contenido es superior al 10%, pero en mezclas con contenido hasta 1% se utilizan hidrocarburos y craqueo | El PVC es fácilmente reciclado y con menor grado de degradación, el reciclaje está generalmente limitado debido al hecho de que varios polímeros se encuentran presentes en el plástico PVC. haciendo una transformación difícil y de inferiores propiedades físicas del material resultante. Las mezclas más favorables es con el PEHD y debe evitarse mezclar con PET, incluso cantidades muy pequeñas de PET (en el orden de partes por millón) pueden contaminar gravemente el producto reciclado e inutilizarlo para la mayor parte de las aplicaciones. Las aplicaciones del PVC es múltiple, pero destaca tubería, perfiles, mangueras, suelas de zapatos e incluso artículos automotrices. | https://www.cepex.com/wp-content/uploads/2017/07/dossier_informativo_pvc_reciclaje.pdf file:///C:/Users/Ignacio/Downloads/110-Texto%20del%20art%C3%A1culo-2369-1-10-20160727.pdf |
| 4 | LDPE | Polietileno baja densidad | El método más usado en el reciclaje del peld es mecánico, pero por su eficiencia en la recuperación y uso de energía el más recomendable es químico por la operación de hidrólisis. | La recuperación en el método mecánico es baja 35% y de mala calidad, por ello es de baja rentabilidad y prácticamente reducida su reciclado. Su recuperación al incrementar su densidad (mayor a 1) es utilizado en tuberías, mangueras, paneles etc. El polímero reciclado es utilizado en mezcla con el HDPE o PP | |

| | | | | | |
|---|----|---------------|--|---|---|
| 5 | PP | Polipropileno | El método más usado es mecánico, pero por su eficiencia en la recuperación y uso de energía el más recomendable es químico. El proceso mecánico, la operación de separación de densidades por flotación se complica con el PEHD por tener similar densidad | Debe evitarse la utilización de elementos de PVC, ya que pueden provocar decoloración y malos olores. El principal polímero contaminante del PP reciclado es el HDPE de las botellas, cierres y componentes añadidos. El PP y el HDPE son opacos y menos densos que el agua, por lo que son difíciles de separar en el proceso. Los actuales sistemas de reciclado del PP pueden tolerar la utilización de capas de EVOH. De manera similar, se toleran el MXD6 y otras capas de barrera basadas en nylon | |
| 6 | PS | Poliestireno | Para el reciclado del EPS se utiliza en método densificación mecánica y el método de compactación térmica. El método químico utiliza la técnica de purificación molecular | El reciclado requiere un proceso con mayor tecnología, sin embargo puede alcanzar hasta el 100% de recuperación de polímero. El EPS puede reutilizarse hasta el 50% con polímero virgen en la fabricación de productos aislantes, materiales de la construcción, ladrillos, productos espumados e incluso composta. El reciclado químico por purificación molecular, permite la recuperación de EPS alta pureza, con un contenido similar al polímero virgen. proceso que utiliza hasta un 91% menos de recursos energético que el reciclado del papel. | https://www.amarilloverdeyazul.com/envases-y-embalajes-de-poliestireno-expandido-poliespan-o-corcho-blanco/ , https://knauf-industries.es/materias-primas-de-plastico-reciclado/ |

Apéndice B

Fuentes consultada para la red del metabolismo industrial

| Origen | Destino | Peso (%) | Descripción | Fuente |
|----------------------------|------------------------|----------|--|---|
| Materias Primas (petróleo) | Extracción | 4 | La producción mundial de petróleo y gas se destina a la fabricación de plásticos. | Dato tomado de: https://www.plasticgarbageproject.org/es/vida-plastico y http://ciencia.unam.mx/keer/766/una-vida-de-plastico |
| Combustibles (gas natural) | Extracción | 9 | Se calculó un estimado del combustible que se destina a la industria química en la cual la producción plástica está inmersa. (Estimación propia) | Dato tomado de SENER, véase en: https://datos.gob.mx/busca/dataset/prospectivas |
| Extracción | Polimerización | 13 | Se suma el flujo de materias correspondientes a los enlaces de los nodos Materias Primas-Extracción y Combustibles-Extracción. | |
| Polimerización | Fusión y procesamiento | 13 | Se suma el flujo de materias correspondientes a los enlaces de los nodos Materias Primas-Extracción y Combustibles-Extracción. | |
| Fusión y procesamiento | Industrias | 13 | Se suma el flujo de materias correspondientes a los enlaces de los nodos Materias Primas-Extracción y Combustibles-Extracción. | |

86 APÉNDICE B. FUENTES CONSULTADA PARA LA RED DEL METABOLISMO INDUSTRIAL

| | | | | |
|-------------------------|--------------------------------|-------------------|---|---|
| Industrias | PIB | 71 | Se toma la MAGDA de las zonas metropolitanas sobre el PIB nacional. | https://imco.org.mx/medicion-de-la-actividad-economica-con-grandes-datos-magda/ |
| Industrias | Producto | 47 | De la producción total de plástico el 47% corresponde a productos de envases y embalajes. | Dato tomado de: Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. Science advances, 3(7), e1700782. |
| Producto | Hogares | 47 | De la producción total de plástico el 47% corresponde a productos de envases y embalajes. | Dato tomado de: Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. Science advances, 3(7), e1700782. |
| Hogares | Hogares | Aleatorio (0-100) | Este bucle se refiere al porcentaje que el consumidor destina al reúso del material plástico. | Dato propuesto por el autor. |
| Hogares | Generación de desechos | 11 | Existen diversos materiales (papel/ cartón, textiles, vidrio, metales y basura orgánica) que generan RSU el 11% corresponde a plástico. (Estimación propia) | INEGI (2016). Anuario estadístico y geográfico de los Estados Unidos Mexicanos 2016. |
| Generación de desechos | Recolección de desechos | 90 | No se toma en cuenta la recolección informal como la pepena. (Estimación propia) | INEGI (2016). Anuario estadístico y geográfico de los Estados Unidos Mexicanos 2016. |
| Recolección de desechos | Disposición final | 90 | Se mantiene el flujo de material | |
| Disposición final | Desechos | 95 | Se obtiene de la diferencia de los datos existentes de recolección de RSU. | https://foroconsultivo.org.mx/INCYTU/documentos/Completa/INCYTU_19-034.pdf |
| Generación de desechos | Desecho no recolectados | 10 | | |
| Desecho no recolectados | Océano | 3 | | |
| Desecho no recolectados | Incineración | 80 | | |
| Desecho no recolectados | Tiradero a cielo abierto | 2 | | |
| Incineración | No controlada | 80 | | |
| Incineración | Recuperación Energética | No Aplica | No existe esta tecnología en México. | |
| Recuperación Energética | Combustibles | No Aplica | | |
| Desechos | Incineración | 0 | | |
| Desechos | Vertederos | 95 | Proporción de la disposición final (Estimación propia) | INEGI (2016). Anuario estadístico y geográfico de los Estados Unidos Mexicanos 2016. |
| Vertederos | Tiradero a cielo abierto | 21 | Proporción de la disposición final (Estimación propia) | INEGI (2016). Anuario estadístico y geográfico de los Estados Unidos Mexicanos 2016. |
| Vertederos | Rellenos de tierra controlados | 8 | Proporción de la disposición final (Estimación propia) | INEGI (2016). Anuario estadístico y geográfico de los Estados Unidos Mexicanos 2016. |
| Vertederos | Rellenos sanitarios | 66 | Proporción de la disposición final (Estimación propia) | INEGI (2016). Anuario estadístico y geográfico de los Estados Unidos Mexicanos 2016. |
| Disposición final | Reciclado | 5 | Proporción de la disposición final (Estimación propia) | INEGI (2016). Anuario estadístico y geográfico de los Estados Unidos Mexicanos 2016. |

| | | | | |
|---------------|------------------------|-----------|---|--|
| Reciclado | Químico | No Aplica | No existe esta tecnología en México. | |
| Químico | Combustibles | No Aplica | | |
| Químico | Polimerización | No Aplica | | |
| Químico | Desechos | No Aplica | | |
| Reciclado | Mecánico | 100 | En México el reciclado mecánico es la forma en que se recicla en plástico. | |
| Mecánico | Fusión y procesamiento | 50 | Según la literatura revisada el plástico se puede reciclar en promedio 4 veces. Por cuestiones de higiene envases que tienen como destino productos alimenticios no se reciclan más de una vez. Para el caso de las botellas PET se necesita el 50% de material virgen. | https://blogs.elpais.com/eco-lab/2010/10/cuantas-veces-se-puede-reciclar.html#:~:text=Este%20es%20un%20proceso%20%C3%A9rmico,unos%204%20%C3%B3%205%20veces. , https://vivirsinplastico.com/plastico-se-puede-reciclar/. https://www.nationalgeographic.com/news/2017/07/plastic-produced-recycling-waste-ocean-trash-debris-environment/. https://actua.greenpeace.org.mx/reciclar-no-es-suficiente |
| Mecánico | Desechos | 50 | | |
| Combustibles | CO2 | 5 | Relación entre las emisiones netas de CO2 y las emisiones proveniente de la fabricación de combustibles (petróleo y gas natural) (Estimación propia) | SEMARNAT, INECC, (2018). Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2015 (INEGYCEI). |
| PIB | CO2 | 19 | Relación entre las emisiones netas de CO2 y la emisiones emitidas por las industrias de manufactura y construcción en la utilización de energía. (Estimación propia) | SEMARNAT, INECC, (2018). Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2015 (INEGYCEI). |
| No controlada | CO2 | 0.2 | Relación entre las emisiones netas de CO2 y las emisiones de quema a cielo abierto de residuos sólidos. (Estimación propia) | SEMARNAT, INECC, (2018). Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2015 (INEGYCEI). |
| Población | Hogares | 63 | Población de las zonas metropolitanas entre la población total del país. (Estimación propia) | SEGOB, SEDATU, CONAPO (2018). Sistema Urbano Nacional 2018. |
| Población | PIB | 45 | Índice de Gini De México | Banco Mundial. Véase en: https://datos.bancomundial.org/indicador/SI.POV.GINI?end=2018&locations=MX&start=1989 |

Apéndice C

Código del modelo basado en agentes

```
Archivo Editar Herramientas Tamaño Pestañas Ayuda
Ejecutar Información Código
Buscar Comprobar Procedimientos Sinrgado automático
1 extensions[csv]
2 breed[plastics plastic]
3 plastics-own[types cycles]
4 breed[nodes node]
5 nodes-own[id name No-plastics]
6 links-own[weight]
7 globals [lista counter cycle RellenoSanitario sizeAux archivo]
8 to setup
9   ca
10  file-close-all
11  set archivo "salida.csv"
12  file-open archivo
13  ;show "archivo abierto:" archivo
14  import-network
15  create-initial-plastics
16  set RellenoSanitario one-of nodes with [name = "RS"]
17  set sizeAux -1
18  ; create-turtles 1
19  reset-ticks
20 end
21
22 to import-network
23   ca
24   set counter 0
25   set-default-shape nodes "circle"
26   file-open "FlujoMateria_Rc190_Mc50_RE50.csv"
27   let line csv:from-row file-read-line
28   ;show line
29   while[not file-at-end?]
30   [
31     set line (csv:from-row file-read-line ",")
32     let n1 item 0 line ;source
33     let n2 item 1 line ;target
34     let n3 item 2 line ;flux
35   ]
36   create-new-node n1
```

```

Archivo Editar Herramientas Tamaño Pestañas Ayuda
Ejecutar Información Código
Buscar... Comprobar | Procedimientos |  Sangrado automático

37 create-new-node n2
38
39 let s one-of turtles with [name = n1]
40 let t one-of turtles with [name = n2]
41 ;show line
42 if s != t
43 [
44   ask s [
45     create-link-to t [set weight n3 set thickness weight / 300 set label weight]
46   ]
47 ]
48
49 ; check-the-conservation-of-mater
50
51 ;layout-circle turtles ((world-width - 1) / 2)
52 ;repeat 100 [display layout-spring turtles links 0.2 20 1]
53 layout-nodes
54
55 file-close
56 reset-ticks
57 end
58
59 to layout-nodes
60 layout-circle sort nodes max-pxcor - 20
61 ask nodes
62 [
63   if count my-out-links > 1
64   [
65     let oln out-link-neighbors
66     let i -10
67     if any? nodes-here
68     [
69       ask oln
70       [
71         ;set ycor [ycor] of myself + 1
72         set xcor (xcor + 1) mod (max-pxcor - 1)

```

```

Archivo Editar Herramientas Tamaño Pestañas Ayuda
Ejecutar Información Código
Buscar... Comprobar | Procedimientos |  Sangrado automático

73   set i i + 1
74   ]
75 ]
76 ]
77 ]
78
79 ask one-of nodes with [name = "05"] [setxy 0 0]
80 end
81
82 to move-node
83 ;let nd nobody
84 while [mouse-down?]
85 [
86   let nd min-one-of nodes [distancexy mouse-xcor mouse-ycor]
87   ask nd [setxy mouse-xcor mouse-ycor]
88 ]
89 end
90
91
92 to create-new-node [s]
93
94 if not any? nodes with [name = s]
95 [
96   create-nodes 1
97   [
98     set id counter
99     set name s
100    set label name
101    show (word id ":" name)
102    set No-plastics turtle-set []
103    resize
104   ]
105   set counter counter + 1
106 ]
107 end
108

```

```

Archivo Editar Herramientas Tamaño Pestañas Ayuda
Ejecutar Información Código
Buscar Comprobar Procedimientos Sangrado automático

109 to create-initial-plastics
110   set cycle 0
111   let n0 one-of nodes with [id = 0]
112   ask n0[setxy min-pxcor + 5 max-pycor - 5]
113   create-plastics N
114   [
115     let plas self
116     move-to n0
117     set color red
118     ;ask n0 [set No-plastics lput plas No-plastics ]
119     set types "V" ;virgen plastic
120     ;face one-of nodes with [id = 1]
121   ]
122   ask n0 [set No-plastics plastics-here resize]
123 end
124
125
126
127 to go
128   if ticks > 30
129   [if ticks mod 10 = 0 [set sizeAux [size] of RellenoSanitario]]
130   ask nodes
131   [
132
133     move-plastics
134   ]
135   ask nodes
136   [
137     set No-plastics plastics-here
138     if name = "P1 Rcl"
139     [
140       ask No-plastics [set types "R"]
141       if count No-plastics != 0 [set cycle cycle + 1]
142     ]
143     resize display
144   ]

```

```

Archivo Editar Herramientas Tamaño Pestañas Ayuda
Ejecutar Información Código
Buscar Comprobar Procedimientos Sangrado automático

145 ; ask turtles [diffuse-neighbors]
146 if detener? [
147   file-close-all
148   set archivo "salida.csv"
149   file-open archivo
150   file-print (word "ID," "Cantidad de plástico," "N=", " N )
151   foreach sort-on [id] nodes
152   [x ->
153     ask x [file-print (word id "," count No-plastics)]
154   ]
155
156   file-close
157   stop]
158 tick
159 end
160
161 to-report histograma
162   let s ""
163   foreach sort-on [id] nodes
164   [x ->
165     ask x [set s (word s "," ((count No-plastics) / N) )]
166   ]
167   report s
168 end
169
170
171 to move-plastics
172   set No-plastics plastics-here
173   let nodo self
174   let amount-of-plastic count No-plastics
175   ;ask my-out-links
176   [
177     ; set amount-of-plastic lput ((weight / 100) * Total-plastic) amount-of-plastic
178     ;
179     if amount-of-plastic != 0
180     [

```

```

Archivo Editar Herramientas Tamaño Pestiglas Ayuda
Ejecutar Información Código
Buscar... Comprobar | Procedimientos |  Sangrado automático

181 let link-EyE-Ali nobody
182 if name = "EyE"
183 [
184   set link-EyE-Ali one-of links with [end1 = myself and end2 = (one-of nodes with [name = "Ali" and name = "Beb"])]
185 ]
186
187 ask my-out-links
188 [
189   if any? [plastics-here] of myself
190
191   [
192     let t end2
193     ifelse(self != link-EyE-Ali)
194     [
195
196       let plas nobody
197       ;show plas
198       ifelse (weight / 100) * amount-of-plastic > count [plastics-here] of myself or ((weight / 100) * amount-of-plastic) < 1 [
199         set plas [plastics-here ] of myself
200       ]
201       [
202         set plas n-of ( ((weight / 100) * amount-of-plastic)) [plastics-here] of myself
203       ] ;show plas
204
205       ask plas
206       [
207         move-to t
208         ask nodo [resize]
209         ask t [ resize]
210       ]
211     ]
212   ]
213   [
214     if any? [plastics-here with [types = "V"]] of myself
215     [
216       let plas nobody

```

```

Archivo Editar Herramientas Tamaño Pestiglas Ayuda
Ejecutar Información Código
Buscar... Comprobar | Procedimientos |  Sangrado automático

217 ;show plas
218 ifelse (weight / 100) * amount-of-plastic > count [plastics-here with [types = "V"]] of myself or ((weight / 100) * amount-of-plastic) < 1 [
219   set plas [plastics-here with [types = "V"]] of myself
220 ]
221 [
222   set plas n-of ( ((weight / 100) * amount-of-plastic)) [plastics-here with [types = "V"]] of myself
223 ]
224 ask plas
225 [
226
227   move-to t
228   ask nodo [resize]
229   ask t [ resize]
230 ]
231 ]
232 ]
233 ]
234 ]
235 ]
236 end
237
238 to resize
239 set size 50 * count plastics-here / ( N )
240 display
241 end
242
243 to-report detener?
244
245
246 report sizeAux = [size] of RellenoSantario
247 end
248
249 ;to-report tamaño
250 ; let l sort-on [matter] turtles
251 ; let m []
252 ; foreach l

```

Apéndice D

Tabla de la red del flujo de materia del metabolismo industrial

| ORIGEN | DESTINO | FLUJO |
|--|--|-------|
| Extracción | Polimerización, fusión y procesamiento | 100 |
| Polimerización, fusión y procesamiento | Industrias | 100 |
| Industrias | Otros Sectores | 53 |
| Industrias | Envases y Embalajes | 47 |
| Envases y Embalajes | Alimentos | 37 |
| Envases y Embalajes | Bebidas | 32 |
| Envases y Embalajes | Productos de limpieza | 14 |
| Envases y Embalajes | Otros | 17 |
| Alimentos | Hogares | 37 |
| Bebidas | Hogares | 32 |
| Productos de limpieza | Hogares | 14 |
| Otros | Hogares | 17 |
| Hogares | Generación de desechos | 100 |
| Generación de desechos | Desecho no recolectados | 10 |
| Desecho no recolectados | Océano | 3 |
| Desecho no recolectados | Incineración | 80 |
| Desecho no recolectados | Tiradero a cielo abierto | 17 |
| Generación de desechos | Recolección de desechos | 90 |
| Recolección de desechos | Disposición Final | 100 |
| Disposición Final | Desechos | 95 |
| Desechos | Vertederos | 100 |
| Vertederos | Rellenos Sanitarios | 70 |
| Vertederos | Rellenos de tierra controlada | 8 |
| Vertederos | Tiradero a cielo abierto | 22 |
| Disposición Final | Reciclado | 5 |
| Reciclado | Recuperación de Energía | 0 |
| Reciclado | Química | 0 |
| Reciclado | Mecánico | 100 |
| Mecánico | Desechos | 50 |
| Mecánico | Plástico reciclado | 50 |
| Plástico reciclado | Mundo | 60 |
| Plástico reciclado | Otros Sectores | 20 |
| Plástico reciclado | Productos de limpieza | 10 |
| Plástico reciclado | Otros | 10 |

Bibliografía

- Arandes, J. M., Bilbao, J., and López, D. (2004). Reciclado de residuos plásticos. *revista Iberoamericana de Polímeros*, 5(1):28–45.
- Arena, U., Mastellone, M. L., and Perugini, F. (2003). Life cycle assessment of a plastic packaging recycling system. *The international journal of life cycle assessment*, 8(2):92–98.
- Ayres, R. U. (1998). Industrial metabolism: work in progress. In *Theory and Implementation of Economic Models for Sustainable Development*, pages 195–228. Springer.
- Bourguignon, D. (2017). Plastics in a circular economy: opportunities and challenges. *EPR Service, Editor*.
- Bringezu, S. and Moriguchi, Y. (2018). Material flow analysis. In *Green accounting*, pages 149–166. Routledge.
- Brooks, A. L., Wang, S., and Jambeck, J. R. (2018). The chinese import ban and its impact on global plastic waste trade. *Science advances*, 4(6):eaat0131.
- Brouwer, M. T., van Velzen, E. U. T., Augustinus, A., Soethoudt, H., De Meester, S., and Ragaert, K. (2018). Predictive model for the dutch post-consumer plastic packaging recycling system and implications for the circular economy. *Waste management*, 71:62–85.
- Capra, F. and Luisi, P. L. (2014). *The systems view of life: A unifying vision*. Cambridge University Press.

- CEDEX (2013). *Residuos plásticos*. Ministerio de Fomento. Gobierno de España.
- Chalmin, P. (2019). The history of plastics: from the capitol to the tarpeian rock. *Field Actions Science Reports. The journal of field actions*, (Special Issue 19):6–11.
- Clift, R. (1997). Overview clean technology—the idea and the practice. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology: International Research in Process, Environmental AND Clean Technology*, 68(4):347–350.
- Cocho, G. (2017). *Ciencia Humanismo Sociedad: De los sistemas complejos a la imaginación heterodoxa*, chapter Dinámica de la materia compleja viva. CopIt ArXives y Editora C3.
- Ding, Z., Gong, W., Li, S., and Wu, Z. (2018). System dynamics versus agent-based modeling: A review of complexity simulation in construction waste management. *Sustainability*, 10(7):2484.
- Erkman, S. (1997). Industrial ecology: an historical view. *Journal of cleaner production*, 5(1-2):1–10.
- Espinosa, A., Walker, J., et al. (2011). *A complexity approach to sustainability: theory and application*, volume 1. World Scientific.
- Gallopín, G. C. (2003). *Sostenibilidad y desarrollo sostenible: un enfoque sistémico*. Cepal.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., and Hultink, E. J. (2017). The circular economy—a new sustainability paradigm? *Journal of cleaner production*, 143:757–768.
- Geng, Y. and Doberstein, B. (2008). Developing the circular economy in China: Challenges and opportunities for achieving 'leapfrog development'. *The International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 15(3):231–239.
- Georgescu-Roegen, N. (1994). ¿Qué puede enseñar a los economistas la termodinámica y la biología? In *De la economía ambiental a la economía ecológica*, pages 303–319. Icaria.

- Gershenson, C. (2013). ¿Cómo hablar de complejidad? *Llengua, Societat i Comunicació*, 11:14–19.
- Geyer, R., Jambeck, J. R., and Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science advances*, 3(7):e1700782.
- Ghisellini, P., Cialani, C., and Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner production*, 114:11–32.
- Giannis, A., Chen, M., Yin, K., Tong, H., and Veksha, A. (2017). Application of system dynamics modeling for evaluation of different recycling scenarios in singapore. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 19(3):1177–1185.
- Goyal, S., Esposito, M., and Kapoor, A. (2018). Circular economy business models in developing economies: lessons from India on reduce, recycle, and reuse paradigms. *Thunderbird International Business Review*, 60(5):729–740.
- INEGI (2017). Anuario estadístico y geográfico de los Estados Unidos Mexicanos 2017. http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/AEGEUM_2017/702825097912.pdf.
- Institute, S. F. (2020). Complexity explorer. <https://www.complexityexplorer.org/explore/glossary/>.
- Johansson, A. (2002). Industrial ecology and industrial metabolism: use and misuse of metaphors. *A handbook of industrial ecology*, 70.
- Kumar, S., Teichman, S., and Timpernagel, T. (2012). A green supply chain is a requirement for profitability. *International Journal of Production Research*, 50(5):1278–1296.
- Lieder, M. and Rashid, A. (2016). Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry. *Journal of Cleaner Production*, 115:36–51.

- Lifset, R. and Graedel, T. E. (2002). Industrial ecology: goals and definitions. *A handbook of industrial ecology*, pages 3–15.
- Liu, J., Dietz, T., Carpenter, S. R., Alberti, M., Folke, C., Moran, E., Pell, A. N., Deadman, P., Kratz, T., Lubchenco, J., et al. (2007). Complexity of coupled human and natural systems. *Science*, 317(5844):1513–1516.
- Mitchell, M. (2009). *Complexity: A Guided Tour*. Oxford University Press.
- Morillas, A. V., Valdemar, R. M. E., Villavicencio, M. B., and Pérez, M. V. (2014). El reciclaje de los plásticos.
- Naciones Unidas (2018). Agenda 2030 y los objetivos de desarrollo sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe. *CEPAL*. Santiago.
- Nakamura, S. and Kondo, Y. (2002). Input-output analysis of waste management. *Journal of Industrial Ecology*, 6(1):39–63.
- Naredo, J. M. (2010). *Raíces económicas del deterioro ecológico y social*. Siglo XXI de España Editores, SA.
- Newman, M. (2018). *Networks*. Oxford university press.
- Nguyen-Trong, K., Nguyen-Thi-Ngoc, A., Nguyen-Ngoc, D., and Dinh-Thi-Hai, V. (2017). Optimization of municipal solid waste transportation by integrating gis analysis, equation-based, and agent-based model. *Waste Management*, 59:14–22.
- Pearce, D. W. and Turner, R. K. (1990). *Economics of Natural Resources and the Environment*. JHU Press.
- Peter, C. and Swilling, M. (2014). Linking complexity and sustainability theories: Implications for modeling sustainability transitions. *Sustainability*, 6(3):1594–1622.
- Poletto, J. A. and Da Silva, C. L. (2009). Influencia de la separación de residuos sólidos urbanos para reciclaje en el proceso de incineración con generación de energía. *Información tecnológica*, 20(2):105–112.

- Prieto-Sandoval, V., Jaca-García, C., and Ormazabal-Goenaga, M. (2017). Economía circular: Relación con la evolución del concepto de sostenibilidad y estrategias para su implementación. *Universidad de Montevideo, Facultad de Ingeniería*, (15).
- Railsback, S. F. and Grimm, V. (2019). *Agent-based and individual-based modeling: a practical introduction*. Princeton University Press.
- Riechmann, J. (2003). Biomímesis: el camino hacia la sustentabilidad. In *Industria como naturaleza: hacia la producción limpia*, pages 25–48. Los Libros de la Catarata.
- Ritchie, H. and Roser, M. (2018). Plastic pollution. <https://ourworldindata.org/plastic-pollution>.
- Sayama, H. (2015). *Introduction to the Modeling and Analysis of Complex Systems*. Open SUNY Textbooks.
- Scalco, A., Ceschi, A., Shiboub, I., Sartori, R., Frayret, J.-M., and Dickert, S. (2017). The implementation of the theory of planned behavior in an agent-based model for waste recycling: A review and a proposal. *Agent-Based Modeling of Sustainable Behaviors*, pages 77–97.
- Semarnat (2016). *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave Verde. Edición 2015*. Semarnat. <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/index.html>.
- Stonedahl, F. and Wilensky, U. (2008). Netlogo diffusion on a directed network model. *Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL*.
- Tong, X., Nikolic, I., Dijkhuizen, B., van den Hoven, M., Minderhoud, M., Wäckerlin, N., Wang, T., and Tao, D. (2018). Behaviour change in post-consumer recycling: Applying agent-based modelling in social experiment. *Journal of Cleaner Production*, 187:1006–1013.

- Torre-Marín, G. C., Granados, R. S., Herrera, G. R., and Martínez, F. R. (2009). Ecología industrial y desarrollo sustentable. *Ingeniería*, 13(1):63–70.
- Ullca, J. (2005). Los rellenos sanitarios. *La granja. Revista de Ciencias de la Vida*, (4):2–17. Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca, Ecuador.
- Van Eygen, E., Laner, D., and Fellner, J. (2018). Circular economy of plastic packaging: Current practice and perspectives in Austria. *Waste Management*, 72:55–64.
- Wasserman, S. and Faust, K. (1994). *Social Network Analysis: Methods and Applications*. Structural Analysis in the Social Sciences. Cambridge University Press.
- WCED (1987). Our Common Future; (Brundtland Report). <https://www.are.admin.ch/are/en/home/media/publications/sustainable-development/brundtland-report.html>.
- Wilensky, U. (1999). Netlogo centre for connected learning and computer-based modelling. *Northwestern University, Evanston, IL*. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo>.
- Winans, K., Kendall, A., and Deng, H. (2017). The history and current applications of the circular economy concept. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68:825–833.
- Zoya, L. G. R. and Roggero, P. (2015). Modelos basados en agentes: aportes epistemológicos y teóricos para la investigación social. *Revista mexicana de ciencias políticas y sociales*, 60(225):227–261.