

**Estado del arte para el diseño de una cadena de recuperación de llantas  
usadas en el contexto urbano considerando los lineamientos para su  
formulación y modelación**

**Asistente**

**Adriana Viviana Ávila Perdomo**

**Tutor:**

**Angie Marcela Ramírez Rubio**

**Co-tutor:**

**Prof. Andrés Alberto García León**

**Universidad de Ibagué**

**Facultad de Ingeniería**

**Programa de Ingeniería Industrial**

**2018**

## Contenido

<b>1. Resumen.....</b>	<b>3</b>
<b>2. Marco teórico de la caracterización de metodologías de formulación y modelamiento de cadenas de suministro inversas.....</b>	<b>5</b>
2.1 El concepto de cadenas de suministro inversas .....	5
2.2 Elementos de una cadena de suministro inversa.....	8
2.3 Decisiones en el diseño de cadenas de suministro.....	14
<b>3. Casos relacionados con cadenas de suministro inversas .....</b>	<b>18</b>
3.1 Comparativo entre tres estructuras de LI propuestas por distintos autores .....	18
3.2 Casos de CSI de neumáticos que incluyen decisiones de diseño (localización, inventario o transporte) .....	22
<b>4. Aspectos relevantes en la modelación matemática que intervienen en el diseño de una cadena de recuperación de llantas usadas en el contexto urbano. ....</b>	<b>25</b>
4.1 Fuentes de incertidumbre en cadenas de suministro inversas.....	25
4.2 El enfoque de sostenibilidad en el diseño de cadenas de suministro .....	30
4.3 Modelación matemática de cadenas de suministro inversas .....	31
4.4 Aspectos a considerar en el diseño de la cadena de recuperación de llantas usadas en Ibagué.....	36
<b>5. Conclusiones, contribuciones y limitaciones.....</b>	<b>37</b>
<b>6. Bibliografía .....</b>	<b>39</b>

## 1. Resumen

El problema general de la investigación es la ineficiente gestión logística de las llantas usadas, en el cual se evidencia el desaprovechamiento de los beneficios económicos (Subulan, Taşan, & Baykasoğlu, 2015) y el impacto negativo generado al medio ambiente. Encontrar formas de aprovechar estos residuos urbanos es una gran estrategia que contribuye al mejoramiento de la situación ambiental actual; además del impacto negativo al medio ambiente, una disposición final de estos artículos puede representar un daño a la salud debido a los gases expulsados de las llantas o la proliferación de epidemias a causa del estancamiento de agua que se genera en temporadas de lluvia (de Figueiredo & Mayerle, 2008).

El objetivo general de la presente asistencia de investigación es identificar las bases conceptuales, premisas teóricas y elementos a considerar para el diseño de una cadena de abastecimiento dedicada a la recuperación de llantas usadas en el contexto urbano considerando su formulación y modelamiento.

El logro del objetivo implica satisfacer tres objetivos específicos que son: Construir un marco teórico que permita caracterizar metodologías para la formulación y el modelamiento de cadenas de suministro inversas, el cual se alcanza mediante la referencia de algunas investigaciones y revisiones de literatura con el fin de extraer información sobre distintos conceptos y definiciones de las CSI (Cadena de suministro inversa), así como de sus principales elementos o actividades involucradas y finalmente una breve explicación de las distintas decisiones que intervienen en el diseño de CS (cadenas de suministro) involucradas con la localización, inventarios y transporte. En el diseño de CS intervienen una serie de importantes decisiones relacionadas con la ubicación de las instalaciones, el inventario, y el transporte que contribuyen al desempeño eficiente de la misma y al equilibrio generado entre costo-servicio (Sarache Castro & Morales Chávez, 2016). Las decisiones de localización pretenden ubicar las distintas instalaciones encontradas en una CS de modo que las mismas puedan tener una buena interacción entre ellas, teniendo en cuenta también las decisiones de transporte que tienen como finalidad la reducción de costos y de tiempos. Finalmente el objetivo de las decisiones de inventario es el de escoger las mejores cantidades, tiempos y técnicas para poder suplir la demanda de los clientes y responder a cambios inesperados en la misma.

El segundo objetivo consiste en caracterizar casos empíricos referenciados en la literatura científica relacionadas con el diseño de cadenas de abastecimiento inversas el cual se logra a partir de un comparativo de tres estructuras de logística inversa (LI) propuestas por distintos autores y en la recopilación de algunos estudios de CSI de neumáticos relacionados con sus decisiones de diseño “localización, transporte e inventario”.

El tercer y último objetivo específico consiste en identificar los aspectos relevantes para la modelación matemática que intervienen en el diseño de una cadena dedicada a la recuperación de llantas usadas en el contexto urbano, para esto se realiza una recopilación de las distintas fuentes

de incertidumbre en CSI para algunos sectores de la industria, como el enfoque de sostenibilidad y algunos aspectos de modelación matemática que se emplean en la LI.

Las contribuciones de esta asistencia de investigación están relacionadas principalmente con brindar una base teórica en el diseño de CSI generales y de neumáticos, pues proporcionan información base para la comprensión de la terminología empleada en las CSI, del mismo modo expone distintos ejemplos encontrados en la bibliografía para casos de LI de llantas en distintos países los cuales sirven de guía y como punto de comparación de escenarios de desarrollo de redes de LI.

El presente documento contiene información relacionada al diseño de cadenas de abastecimiento inversas, para esto se abordan tres puntos principales; el primero presenta un marco teórico de la caracterización de metodologías de formulación y modelamiento de cadenas de suministro inversas (Sección 2) , el segundo punto menciona algunos casos de la literatura de CSI (Sección 3), y el tercer punto presenta los aspectos relevantes en la modelación matemática que intervienen en el diseño de una cadena de recuperación de llantas usadas en el contexto urbano (Sección 4).

Para su desarrollo, los distintos puntos se componen de distintos aspectos; el primero está compuesto de tres partes principales, la primera de estas aborda el concepto de CSI, la segunda menciona distintos elementos de una CSI y finalmente una parte sobre las decisiones de diseño en una CSI. El segundo punto presenta un comparativo de tres estructuras de LI propuestas por distintos autores y una revisión de algunos estudios relacionados con las decisiones de diseño mencionadas anteriormente en CSI de neumáticos. Y finalmente la tercera parte menciona las fuentes de incertidumbre, el enfoque de sostenibilidad y la modelación matemática en general de las CSI, y la presentación de tres casos de estudio específicos que mencionan características puntuales de modelación matemática.

Finalmente en las Secciones 5 y 6 se presentan las conclusiones y la bibliografía respectivamente.

## **2. Marco teórico de la caracterización de metodologías de formulación y modelamiento de cadenas de suministro inversas**

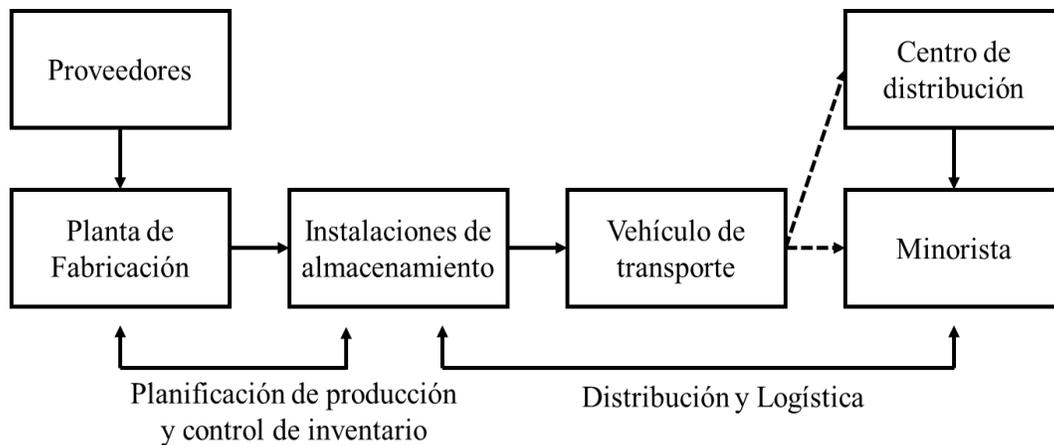
Este marco teórico se constituye de tres partes importantes para la formulación y modelamiento de CSI, estas son: la primera la revisión de conceptos de CSI brindados por autores en diferentes años y desde perspectivas puntuales. Luego se describirán a partir de estructuras los elementos que componen una CSI, para esto se mencionan algunos pasos clave y se detalla una revisión y clasificación de estructuras con distintas actividades de LI en sectores industriales específicos. Finalmente se describirá de forma general las decisiones comprendidas en el triángulo de la toma de decisiones logísticas propuesto por Ballou (2004).

### **2.1 El concepto de cadenas de suministro inversas**

Para entender de manera sencilla el concepto de cadena de suministro inversa (CSI), se debe conocer el concepto básico de CS. Para Chopra & Meindl (2008) una CS es la unión de varios entes que trabajan de manera directa o indirecta en dar una respuesta satisfactoria a una necesidad planteada por el cliente; estas personas incluyen aparte del fabricante y proveedores, transportistas, almacenistas, vendedores, inclusive a los clientes.

Por otro lado, según Ballou (2004), logística y CS se entiende como el grupo de actividades que deben realizarse de manera repetida a través del canal de flujo, donde la materia prima se transforma en producto final y a su vez se le añade valor para el cliente. Por las diferencias de ubicación entre los distintos puntos clave en esta transformación, se hace necesario que estas actividades mencionadas anteriormente se repitan varias veces antes de que el producto llegue al mercado. Del mismo modo estas actividades se repetirán de nuevo en el momento en que se reciclen los productos usados. De esta forma se garantiza el cumplimiento de los requerimientos de los consumidores y la responsabilidad con el medio ambiente.

En pocas palabras, se entiende la CS mediante las definiciones proporcionadas anteriormente por Chopra & Meindl (2008) y Ballou (2004), cómo el conjunto de distintos actores que interactúan entre sí, para cumplir con los requerimientos o necesidades del cliente, mediante la creación de un bien o un servicio. Además en la definición de Ballou (2004), se menciona la logística, como la repetición de actividades que se llevan a cabo en todos los procesos antes (logística directa LD) y después (logística inversa LI) de la creación de un producto. Esta combinación de actividades directas e inversas en una CS se le conoce como cadena de suministro de ciclo cerrado (CSCC) o *CLSC* por sus siglas en Inglés (*Closed Loop Supply Chain*) (Heydari, Govindan, & Jafari, 2017); Estas cadenas maximizan el concepto de cadenas de abastecimiento a través de la exploración de los flujos y su relación entre ellos (Zeballos, Méndez, Barbosa-Povoa, & Novais, 2014).



*Figura 1.* Procesos involucrados en una cadena de suministro  
Fuente: (Beamon, 1998)

En la *Figura 1* Beamon (1998) propone una CS con seis elementos. Inicia con los proveedores que aprovisionan la planta de fabricación con materias primas para la elaboración de los productos; una vez fabricados los productos, se envían a las instalaciones de almacenamiento para luego transportarlos a los centros de distribución o a los minoristas a través de vehículos de transporte. Adicional a esto se puede evidenciar que la interacción entre la planta de fabricación y el almacenamiento son parte de la planificación de producción y el control de inventario, y que a partir del almacenamiento hasta el centro de distribución o los minoristas, se realiza la distribución y logística.

Cuando se habla de las actividades que se realizan en los procesos después de la creación de un producto, se hace referencia al término de Cadena de suministro Inversa o CSI (o *RSC* por sus siglas en inglés *Reverse Supply Chain*) o también conocida como Logística Inversa o LI (Govindan, Popiuc, & Diabat, 2013) que “consiste en una serie de actividades requeridas para recolectar productos usados de los consumidores y reprocesarlos para recuperar sus valores de mercado restantes o disponer de ellos” (Battaia & Gupta, 2015, p. 587); esto ocurre cuando el cliente voluntariamente o por alguna motivación u obligación externa devuelve el producto usado a su lugar de origen para luego ser reprocesado, reutilizado, entre otras actividades que realizarán en su momento los eslabones de la CSI.

También las empresas desempeñan un papel importante, ya que solo por iniciativa del cliente, el proceso de LI no se llevaría a cabo; se tienen en cuenta razones que pueden ser legales, económicas o comerciales (Lambert, Riopel, & Abdul-Kader, 2011) que promueven la implementación de la LI en las CS, y otras también como las regulaciones ambientales (Battaia & Gupta, 2015) que obligan a las empresas y sus procesos a actuar responsablemente con el medio ambiente.

Entendida desde el punto de vista industrial una CSI se define como el “proceso mediante el cual un fabricante acepta sistemáticamente productos o piezas enviados previamente desde el punto

de consumo para su posible reutilización, refabricación, reciclado o eliminación” (Rahman & Subramanian, 2012, p. 239).

Una aproximación similar a la anterior es la propuesta por Prahinski & Kocabasoglu (2006), que define a la CSI como el conjunto de actividades necesarias para recuperar un producto después del uso de un cliente, con el fin de desecharlo o recuperar el valor restante. Por lo tanto se puede afirmar que un producto conserva su valor aun después de haber pasado por las manos de un cliente, haciendo a un lado la idea sobre la única disposición que pueda tener sea el cesto de la basura.

Teniendo en cuenta las operaciones sobre algunos factores esenciales en una CSI, se entiende como “el proceso de planificación, implementación y control del flujo eficiente y rentable de materias primas, inventario en proceso, productos terminados e información relacionada desde el punto de consumo hasta el punto de origen con el fin de recuperar el valor o realizar una eliminación adecuada” (Roger & Tibben-Lembke, 1998, p. 268), lo que quiere decir que es el mismo proceso solo que en dirección opuesta a la CS de flujo directo; en otras palabras, esta comprende todas las actividades que recuperan un producto usado para luego desecharlo o reutilizarlo (Guide, Jr & Van Wassenhove, 2002).

Formalmente, la LI es definida como “un segmento especializado de logística que se centra en el movimiento y la gestión de productos y recursos después de la venta y después de la entrega al cliente. Incluye devoluciones de productos para reparación y/o crédito” (Vitasek, 2013, p. 168).

Por consiguiente, una CSI cumple la función de continuar el ciclo, en sentido inverso de una CS con el fin de agregar valor a los “desechos”, y evitar generar un impacto negativo al medio ambiente. En otras palabras, “es la serie de actividades que se requieren para recuperar un producto usado de un cliente y, o bien disponer de él o reutilizarlo” (Guide, Jr & Van Wassenhove, 2002, p. 1). En el entorno empresarial, se entiende como “una estrategia comercial que actúa como la fuerza motriz de poner en práctica las actividades de recuperación de manera efectiva con el fin de aumentar la sostenibilidad” (Ayvaz, Bolat, & Aydın, 2015, p. 391). De ese modo, se puede ver que la LI ha llegado a contribuir con las buenas prácticas de manufactura, por lo tanto las empresas han visto la necesidad de adoptarlas “esto se debe a que los residuos pueden transformarse en recursos que pueden ser utilizados de nuevo a través de actividades sostenibles, como la reutilización y el reciclaje” (Shaharudin, Govindan, Zailani, Tan, & Iranmanesh, 2017, p. 1145).

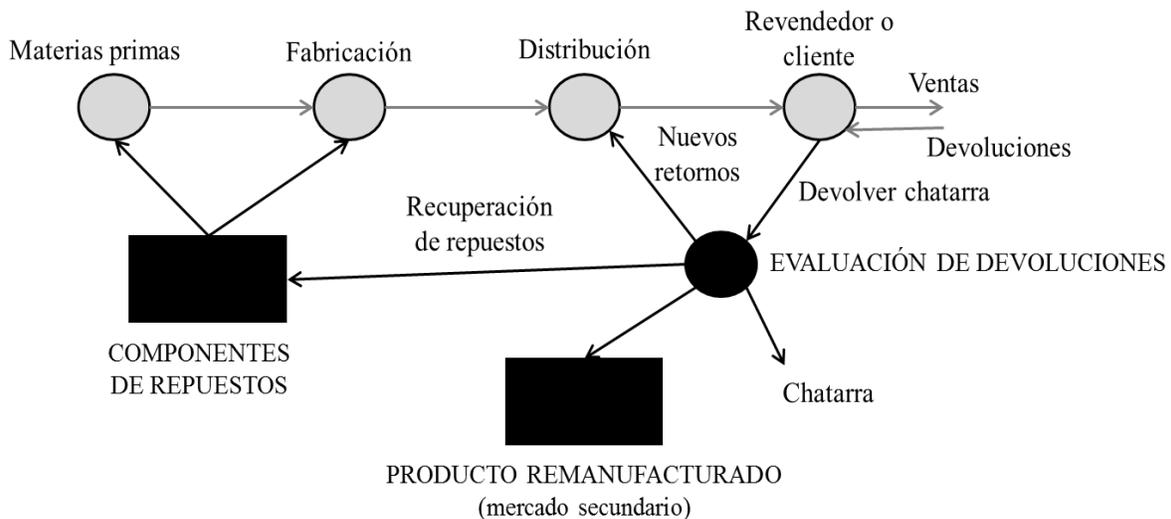
La idea de LI surge de la necesidad de las empresas de desarrollar productos sostenibles y amigables con el medio ambiente, para satisfacer la nueva demanda de productos de este tipo. Además como se mencionaba anteriormente, las reglamentaciones ambientales rigurosas, y la disminución de las materias primas empleadas en la fabricación de los productos han incrementado la importancia de las cadenas de suministro inversas (Battaia & Gupta, 2015). Esta disminución del uso de recursos se logra a partir de los tres procesos más importantes según

Ayvaz et al. (2015), la reutilización, refabricación y el reciclaje, todo esto con el fin de competir de forma organizacional, de cumplir con las regulaciones ambientales y de incentivar la compra de productos recuperables (Shaharudin et al., 2017).

Por ejemplo en el caso de los neumáticos, desde el año 2003 la Unión Europea exige a los fabricantes de llantas que desarrollan sus actividades en Europa, que implementen el reciclaje de cada neumático usado cada vez que vendan uno (Guide, Jr & Van Wassenhove, 2002), esto quiere decir que a partir de este año por cada neumático vendido se reciclará uno usado, obteniendo como resultado la buena gestión inversa de la CS de llantas usadas. En este mismo continente existen tres modelos de gestión de neumáticos EOL que se encargan desde distintas perspectivas del manejo de estos artículos al final de su vida útil (Uruburu, Ponce-Cueto, Cobo-Benita, & Ordieres-Meré, 2013).

## 2.2 Elementos de una cadena de suministro inversa

Según Fleischmann, Beullens, Bloemhof-Ruwaard, & Wassenhove(2001) el proceso de las cadenas de abastecimiento inversa se desarrolla en cinco pasos clave: Adquisición del producto, LI, inspección y disposición, reacondicionamiento y distribución y ventas.



*Figura 2.* Una CSI para devolución de productos  
Fuente: (Blackburn, Guide, Souza, & Wassenhove, 2004)

La *Figura 2* muestra la estructura de una CSI para productos comerciales. Inicia con la devolución del producto por parte del cliente al revendedor (adquisición del producto), luego se evalúan las devoluciones (LI) para su correcta inspección y disposición. Se realizan además pruebas de diagnóstico que permiten determinar qué acción de eliminación es la que mayor valor logra extraer del producto devuelto por el cliente. Los productos devueltos por los clientes que nunca se utilizaron se envían de nuevo al canal de distribución directa, esto quiere decir que se devuelven al canal con el fin de enviar estos productos a otros clientes, ya que conservan las

mismas características de un producto nuevo. Los productos que no se reutilizan o remanufacturan por lo general se destruyen físicamente para venderlos como chatarra o reciclaje. Los que se remanufacturan se destinan a ser vendidos en mercados donde la gente suele comprar artículos conocidos como de segunda mano o simplemente de segunda. Otra forma de emplear las devoluciones de los clientes es a través de la utilización de estos productos como partes de repuesto por reclamos de garantía con el fin de disminuir el costo que este servicio implicaría (Blackburn et al., 2004).

De otra manera, dependiendo del tipo de producto que maneja la CSI, las etapas o eslabones de la misma varían, así como las acciones de eliminación o recuperación que se empleen para recuperar el valor del producto usado.

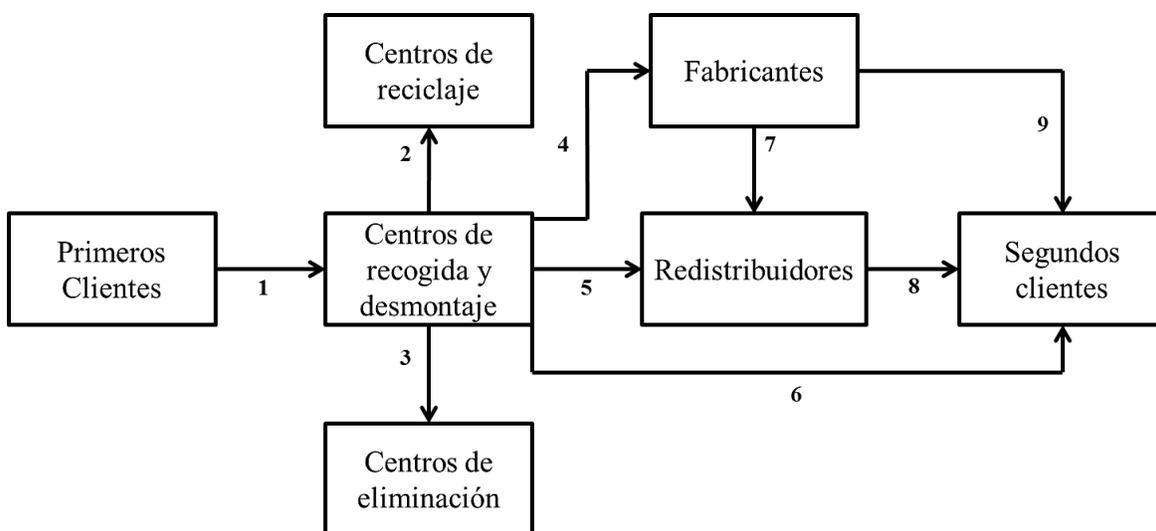


Figura 3.Red propuesta de CSI.

Fuente: Soleimani & Govindan (2014)

La *Figura 3* detalla una red completa de una CSI con sus etapas y flujos enumerados. Se pueden apreciar en el modelo siete entidades o actores y nueve flujos en total, los cuales según Soleimani & Govindan(2014) se describen a continuación como sigue:

La lectura de la figura se realiza de izquierda a derecha, por lo tanto:

- Inicia con los **primeros clientes** que son quienes venden el producto usado a los centros de recogida y desmontaje (flujo 1).
- Estos **centros de recogida** o centros de recolección compran los productos usados de los primeros clientes y teniendo en cuenta la calidad de estos productos, se decide el siguiente paso a seguir.
- Si la calidad de algunas partes de estos productos es aceptable, y lo único que requieren es una pequeña reparación entonces pueden ser enviados directamente a los segundos



3	(Srivastava, 2008)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-
4	(Soleimani & Govindan, 2014)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-
5	(Zhou & Piramuthu, 2013)	✓	✓		✓	✓		✓	-
6	(Habibi, Battaïa, Cung, & Dolgui, 2017)	✓		✓		✓		✓	Desechos eléctricos y electrónicos
7	(G. T. Tsoufhas, Pappis, & Minner, 2002)	✓					✓	✓	Baterías SLI
8	(Gu & Gao, 2017)	✓	✓	✓		✓			-
9	(Dissanayake & Sinha, 2015)	✓	✓			✓			Remanufactura de moda
10	(G. T. Tsoufhas et al., 2002)	✓		✓		✓	✓	✓	Análisis de inventario de baterías SLI
11	(Pedram et al., 2017)	✓	✓			✓		✓	Neumáticos
12	(Ortegon, Nies, & Sutherland, 2013)	✓	✓	✓		✓	✓	✓	Turbinas de viento
13	(Blackburn et al., 2004)		✓	✓		✓			Devoluciones comerciales
14	(Thierry, Salomon, Van Nunen, & Van Wassenhove, 1995)				✓	✓	✓	✓	-
15	(Rahman & Subramanian, 2012)				✓	✓	✓	✓	-
16	(Cruz-Rivera & Ertel, 2009)		✓		✓	✓	✓	✓	Automóviles

Fuente: Elaboración propia

De la Tabla 1 se puede extraer que las tres etapas de LI más frecuentes en la revisión fueron la *refabricación*, el *reciclaje* y la *inspección y disposición*; la opción de refabricación se mencionó en quince (15) de los dieciséis (16) casos lo que corresponde a un porcentaje de 93,75% (15/16), por otro lado el reciclaje fue mencionado en once de los dieciséis (16) casos que corresponden a un 68,75% y finalmente la inspección y disposición correspondiente a un 62,50% (10/16). Además, en los estudios citados la investigación se basa en un producto en específico. Por ejemplo, se encuentra el estudio de las turbinas de viento, que en comparación de los otros productos esta CSI involucra más actividades de LI.

Una explicación más detallada de cada una de estas actividades presentadas en la Tabla 1 se muestra a continuación:

- **Adquisición de productos / recolección:** La adquisición de productos consiste en el proceso de obtención de productos, partes o recursos usados por los clientes, este proceso lo realizan por lo general los minoristas por su cercanía a los clientes (Agrawal, Singh, & Murtaza, 2016).“La recolección se refiere a llevar los productos del cliente a un punto de

recuperación. En este punto, los productos son inspeccionados, es decir, se evalúa su calidad y se toma una decisión sobre el tipo de recuperación” (de Brito & Dekker, 2004, p. 11).

- **Inspección y Disposición:** Inspección se refiere a la evaluación del estado de los productos y selección de la actividad más rentable para su reutilización (Blackburn et al., 2004). La disposición se refiere al proceso que sigue inmediatamente después de inspeccionados los productos usados para su procesamiento (Agrawal et al., 2016). Existen distintas alternativas de disposición, entre las más comunes se encuentran reusar, reparar, refabricar, reciclar y la disposición final (Thierry et al., 1995).
- **Desmontaje:** El desmontaje es un proceso que se desarrolla dentro del proceso de re fabricación o restauración (Radhi, 2012). El objetivo es extraer las materias primas y otras piezas posibles a los productos usados (McGovern & Gupta, 2011). Das, Yedlarajah, & Narendra (2000), mencionan cinco objetivos claves del desmontaje, los cuales en términos generales se refieren a la importancia de extraer las piezas útiles que pueden reutilizarse en otros productos y separar de los componentes del producto usado para determinar los tóxicos y eliminarlos, entre otros.
- **Reparación:** Esta actividad requiere un desmontaje mínimo, normalmente la reparación puede ser realizada en el mismo lugar donde se encuentra el cliente, o en lugares especiales de reparación por parte de los fabricantes o mediante la subcontratación del servicio (Thierry et al., 1995). Para Sasikumar & Kannan (2008), la reparación tiene como fin volver los productos defectuosos a mejores condiciones, en algunos casos con pérdidas de calidad.
- **Restauración:** Cuando el reprocesamiento ocurre en el nivel modular, el proceso se conoce como restauración (de Brito & Dekker, 2004). Para Radhi (2012) y Blackburn et al. (2004) la restauración es la misma refabricación y la define como la transformación del producto devuelto por el cliente en el mejor estado, evitando llevar a cabo procesos que dañen la estructura del mismo. Sasikumar & Kannan (2008) mencionan que la restauración busca proporcionar una calidad específica a los productos usados.
- **Refabricación o remanufactura:** Se entiende como la transformación del producto usado por el cliente teniendo en cuenta las especificaciones originales iniciales de fabricación (Blackburn et al., 2004). “La refabricación implica el desmontaje de productos, piezas y módulos” (Agrawal et al., 2016, p. 42). Esta reduce el empleo de materia prima virgen, lo que la hace importante en la producción sostenible y gestión de residuos (Krystofik, Wagner, & Gaustad, 2015). Ejemplos de industrias de remanufactura

son las de “automóviles, productos electrónicos y neumáticos” (Sasikumar & Kannan, 2008, p. 158).

- Reuso o reutilización:** Según Radhi (2012), la reutilización es el proceso de emplear de nuevo el producto usado por el cliente como materia prima en la producción de otro bien, sin necesidad de realizar alguna reparación, únicamente limpieza o algún arreglo menor. Estos productos también pueden ser vendidos a otras empresas (Sellitto, 2018). Algunos ejemplos de este tipo de actividad son las botellas, contenedores y pallets reutilizados (Radhi, 2012). En el diseño de nuevos productos, esta actividad es conocida como ecodiseño (Sellitto, Luchese, Bauer, Saueressig, & Viegas, 2017).
- Reciclaje:** El proceso de reciclaje conlleva el desmontaje total de los productos usados y su clasificación en las distintas categorías de materiales (Agrawal et al., 2016), su propósito es la recuperación de material (Radhi, 2012), “sin preocuparse por la conservación de las estructuras del producto” (Sasikumar & Kannan, 2008, p. 157). Esto quiere decir que “no se preocupa por el valor funcional de los productos” (Ortegon et al., 2013, p. 195).
- Eliminación (depósito de basura):** “La eliminación implica el transporte, el vertido y la incineración”(Agrawal et al., 2016, p. 43). Se escoge la eliminación como última opción cuando el producto ya no posee valor relevante (Sellitto, 2018).

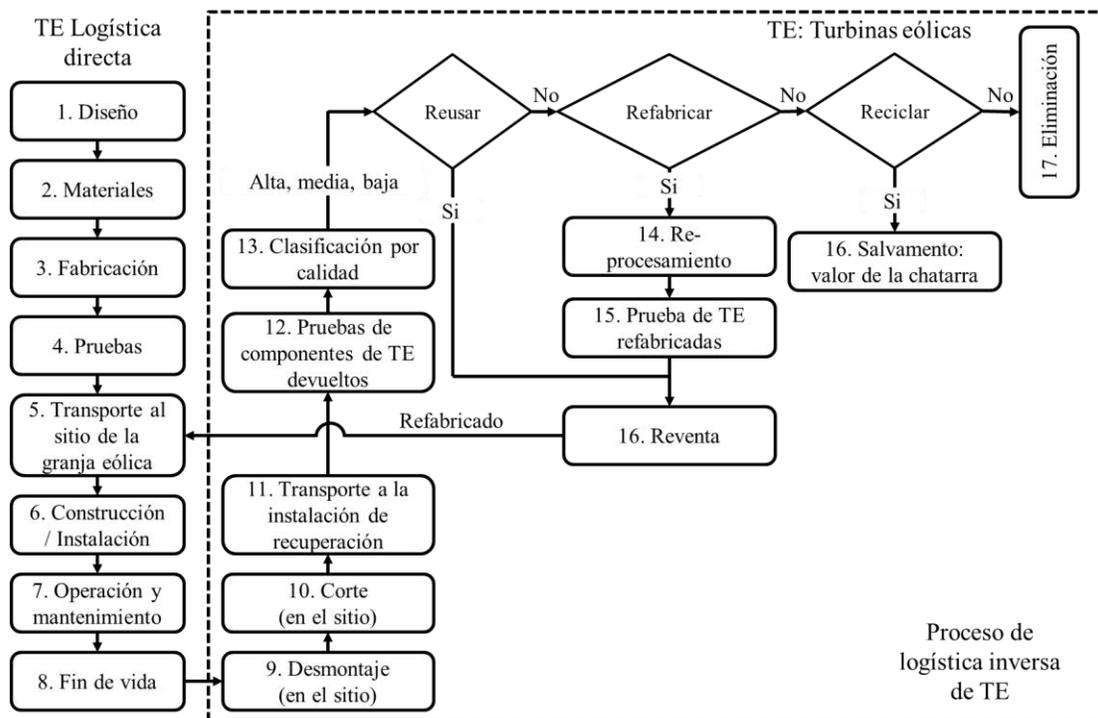


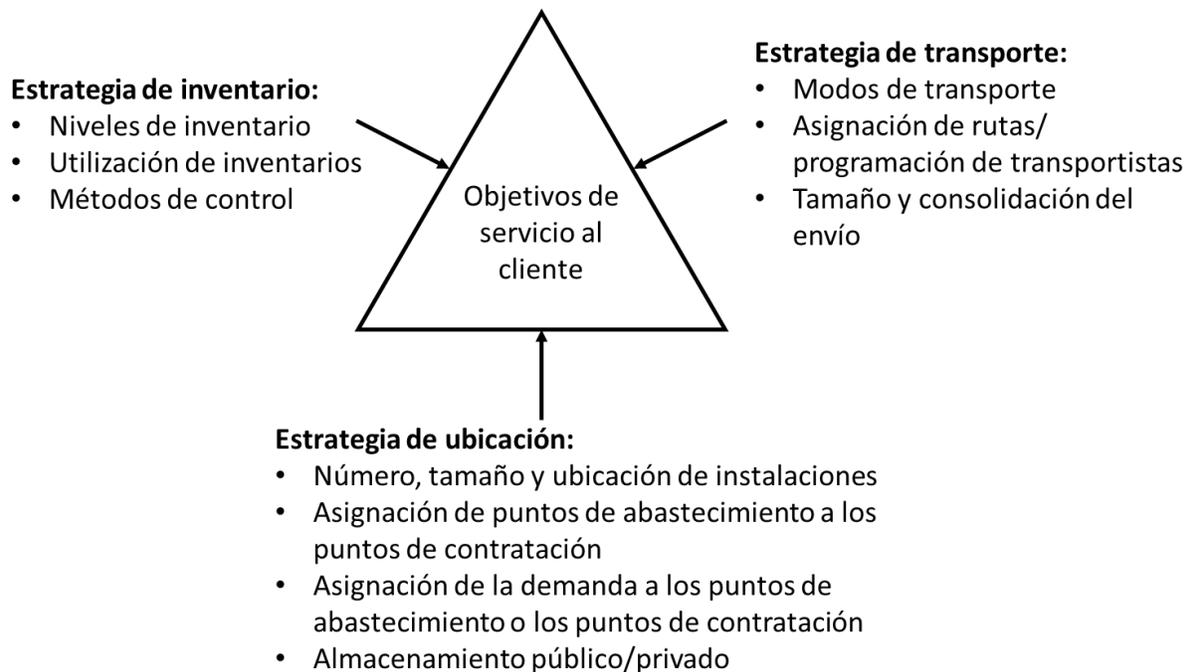
Figura 4. Logística directa e inversa para Turbinas Eólicas (TE)

Fuente:(Ortegon et al., 2013)

En la *Figura 4* se encuentra el modelo propuesto por Ortegon et al.(2013) para el caso de las TE, el cual inicia después del paso ocho (fin de vida) con el desmontaje del producto, seguidamente del corte y el transporte de los componentes a la instalación de recuperación. Estos componentes se inspeccionan mediante pruebas, se limpian y clasifican teniendo en cuenta su calidad para luego reprocesarlas mediante reutilización, reacondicionamiento o refabricación; después de la refabricación o remanufactura, estos se prueban y si son de alta calidad significa que pueden volverse a utilizar; por otro lado si el resultado del reprocesamiento no fue satisfactorio, las empresas encargadas de la recuperación fijan un valor del material para una venta posterior como chatarra; finalmente los componentes que se consideran irrecuperable se envían a eliminación bien sea a vertederos o incineración.

### 2.3 Decisiones en el diseño de cadenas de suministro

Ballou (2004) tiene en cuenta tres decisiones estructurales importantes en el diseño de CS las cuales están relacionadas con la localización, los inventarios y el transporte, que en conjunto conforman el *Triángulo de la toma de decisiones logísticas* (Ver *Figura 5*) donde el resultado de estas decisiones es el servicio al cliente.



*Figura 5.* Triángulo de la toma de decisiones logísticas  
Fuente: (Ballou, 2004)

#### 2.3.1 Estrategia de ubicación:

Las decisiones de **localización** o de ubicación de instalaciones están enfocadas en definir la ubicación de los distintos nodos que conforman la CS esto quiere decir fijar geográfica y

estratégicamente las plantas manufactureras cerca a los proveedores y de la red de distribución y por otro lado los almacenes cerca al mercado, entre otras opciones (Sarache Castro & Morales Chávez, 2016). Las decisiones de localización son importantes en el diseño de la CS ya que impactan fuertemente en “los plazos de entrega, costos de transporte y costos de operación de la instalación” (Sarache Castro & Morales Chávez, 2016, p. 54).

Las decisiones de ubicación fijan la cantidad, ubicación y tamaño de las instalaciones que se emplearán (Ballou, 2004) además estas decisiones tienen en cuenta distintos factores que las afectan. Sarache Castro & Morales Chávez (2016) dividen estos factores en tres sectores empresariales: manufactura, banca, y distribuidores minorista, los cuales se encuentran en la Tabla 2.

Tabla 2  
*Factores de mayor influencia en tres sectores empresariales*

<b>Sectores</b>		
<b>Manufactura</b>	<b>Banca</b>	<b>Distribuidores minorista</b>
1. Disponibilidad de mano de obra calificada	1. Disponibilidad de mano de obra calificada	1. Presencia de competidores
2. Regulaciones ambientales	2. Disponibilidad de infraestructura de transporte	2. Precios de la tierra
3. Disponibilidad de infraestructura de transporte	3. Proximidad a los aeropuertos principales	3. Precios de la construcción
4. Impuesto a la propiedad	4. Impuestos a la propiedad	4. Disponibilidad de capital financiero
5. Incentivos locales a la inversión	5. Impuestos estatales	5. Costos de los servicios públicos

Fuente: (Sarache Castro & Morales Chávez, 2016)

Existen diversos métodos de localización de instalaciones propuestos en la literatura, sin embargo la clasificación de Duarte Castillo (2015) los divide en cuatro grupos generales los cuales son métodos exactos, multicriterios, heurísticos, metaheurísticos. La Tabla 3 elaborada por Sarache Castro & Morales Chávez (2016) contiene algunas clasificaciones y métodos más comunes en localización de instalaciones.

Tabla 3  
*Clasificaciones y métodos más usados en la solución FLP (facility location problem)*

<b>Clasificación</b>	<b>Métodos</b>
Métodos exactos	Branch and bound, programación entera mixta, programación multiobjetivo, método del transporte, programación dinámica, procedimiento de generación de columnas, método del centro de gravedad, árboles de decisión, análisis de regresión.
Técnicas multicriterio discretas	Electre (I,II,III,IV), promethee (I,II,III,IV,V,VI), GAI, teoría de la utilidad multicriterio y método AHP.
Métodos heurísticos	Enfoque Greddy, búsqueda de vecindad (neighborhood search), CPLF, búsqueda local (local search)

Fuente: (Sarache Castro & Morales Chávez, 2016)

### 2.3.2 Estrategia de transporte

“Las decisiones de transporte se refieren al movimiento del inventario de un punto a otro en la cadena de suministro” (Viet, Behdani, & Bloemhof, 2018, p. 70), impactando de esta forma el desempeño económico y ambiental de la misma (Dekker, Bloemhof, & Mallidis, 2012).

A nivel estratégico dos decisiones son importantes en el diseño de CS, estas son: la escogencia del modo (féreo, acuático, carretero, aéreo o ducto) y medio de transporte y el diseño de rutas (Sarache Castro & Morales Chávez, 2016) a través de distintos factores que asegurarán una buena y factible decisión sobre transporte.

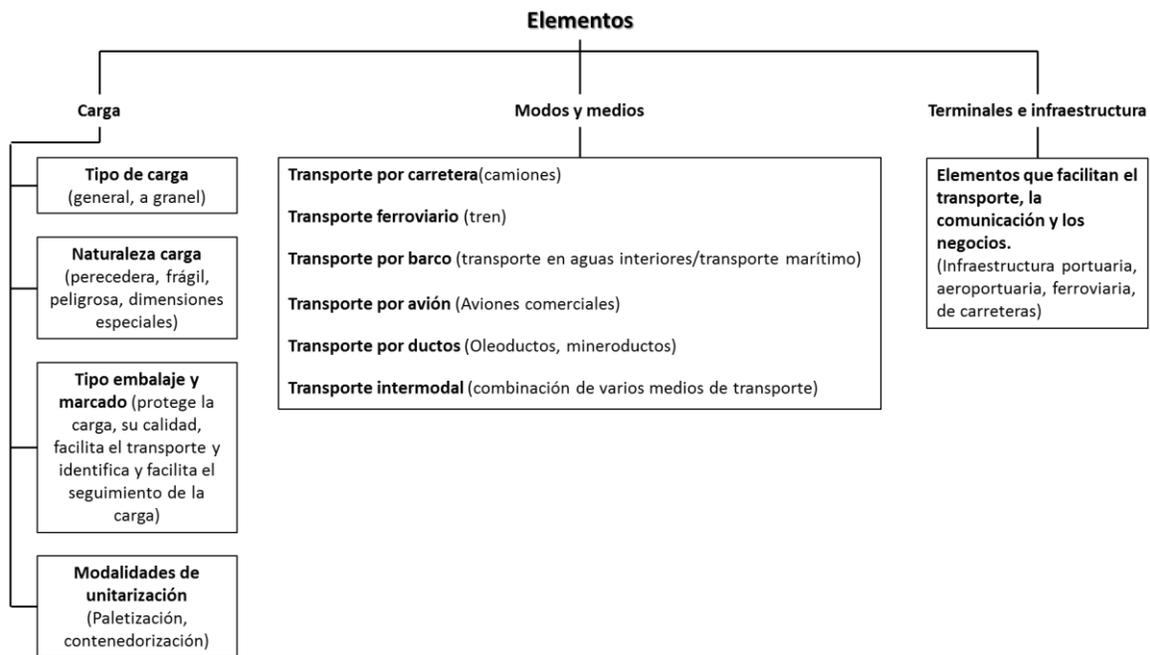


Figura 6. Elementos relacionados con las decisiones de transporte

Fuente: Elaboración propia a partir de Sarache Castro & Morales Chávez (2016), Ruibal Handabaka (1994).

### 2.3.3 Estrategia de inventario

“Los inventarios forman parte del flujo físico de materiales de una cadena de abastecimiento y cumplen una función reguladora que permite mantener la continuidad de los procesos de abastecimiento, producción, distribución y demás actividades conexas” (Sarache Castro & Morales Chávez, 2016, p. 89). Teniendo en cuenta las áreas de una empresa los niveles de inventario varían, ya que en algunas de estas es preferible mantenerlos altos (área de ventas) y por otro lado es más conveniente manejar pocas cantidades (área financiera) (Sarache Castro & Morales Chávez, 2016).

Existen distintas formas en que los inventarios se presentan a lo largo de una CS, algunas de estas son: materia prima, producto en proceso, producto terminado entre otras (Sarache Castro & Morales Chávez, 2016).

Los inventarios se presentan tanto en la logística directa como en la logística inversa, estos últimos (Bakker, Riezebos, & Teunter, 2012) los clasifican en tres categorías: obsoletos, deteriorados o productos en buen estado. Los obsoletos hacen referencia a aquellos productos que han perdido valor comercial por causas del cambio en temporadas o estaciones. Los deteriorados son aquellos que se han dañado o averiado y ya no poseen valor en el mercado, y finalmente los terceros son los productos devueltos por los clientes con el fin de reubicarlos en otros mercados. En la literatura se encuentran diversas contribuciones que abordan temas sobre la modificación de los modelos de inventarios con el fin de incorporar a estos temas sobre sostenibilidad ambiental (Sarache Castro & Morales Chávez, 2016).

Conocer algunas características o parámetros principales de las CS como lo son su definición, sus partes o elementos principales, y los diferentes tipos de decisión que se toman en el diseño de CS es importante, pues facilita el reconocimiento de los pasos a seguir y las cuestiones a tener en cuenta al diseñar CS en cualquier sector industrial. Esto quiere decir que inicialmente se conocen las bases conceptuales que enmarcan los temas relacionados al diseño de CS y seguidamente se proporciona una serie de casos que amplían los temas abordados en la parte conceptual.

Lo descrito en este capítulo evidencia que el diseño de una CSI contiene principalmente una base teórica necesaria para comprender su forma de operar y de transformar los bienes obtenidos de los clientes, al final de su vida útil y del mismo modo proporcionarles valor. Este marco teórico consistió inicialmente en abordar distintos puntos de vista y conceptos de la CSI; de este modo comprendiendo el concepto desde sectores diferentes y en distintos años. Seguidamente se proporcionó una serie de elementos y actividades llevadas a cabo en distintas CSI y finalmente se mencionaron las decisiones que se llevan a cabo en el diseño de una CS, estas son decisiones de localización, inventarios y transporte, las cuales tratan temas que responden a interrogantes como: ¿dónde es el mejor lugar para ubicar las instalaciones involucradas en los procesos de LI?, ¿cuál es el modo y medio de transporte a emplear con el fin de reducir costos y disminuir el impacto ambiental generado al medio ambiente? , ¿Cuáles son las cantidades óptimas de

inventario a almacenar en los distintos puntos? Entre otros. Al responder de una forma fundamentada a través del desarrollo de modelos matemáticos se encuentran casos de CSI en distintos sectores industriales y algunas de ellas con capacidad de adaptarse a otros sectores.

### 3. Casos relacionados con cadenas de suministro inversas

A continuación se brindará un comparativo entre tres estructuras de LI propuestas en años distintos y considerando actividades de LI similares o diferentes entre ellas y al final de estos un caso particular de llantas donde se exponen las principales actividad de LI involucradas en el caso de neumáticos. Seguidamente se encontrará una revisión de literatura que expone algunos casos de neumáticos que tienen en cuenta aspectos relacionados con decisiones de diseño (localización, transporte e inventario).

#### 3.1 Comparativo entre tres estructuras de LI propuestas por distintos autores

A continuación se realiza una comparación entre tres estructuras de LI propuestas por diferentes autores.

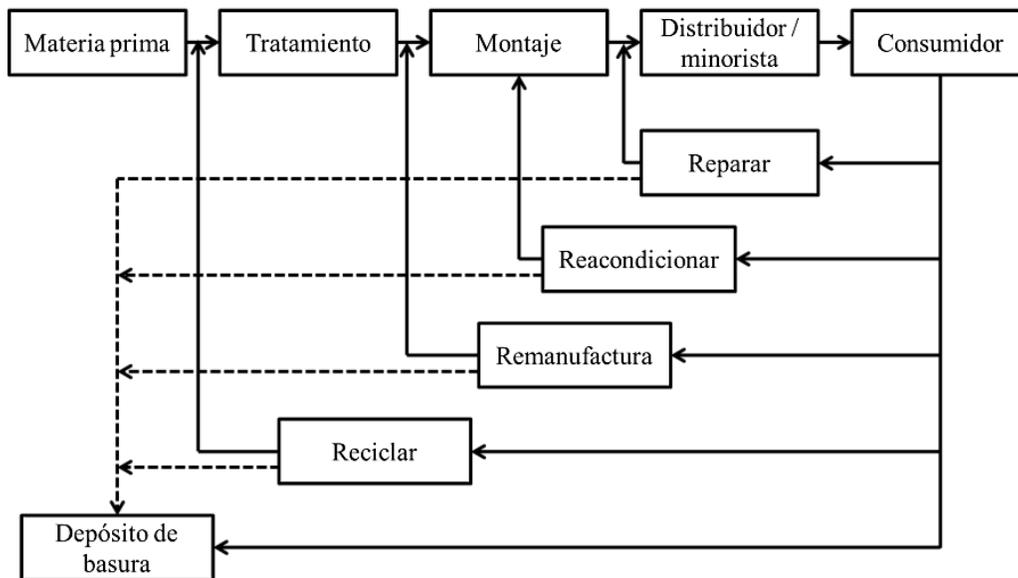


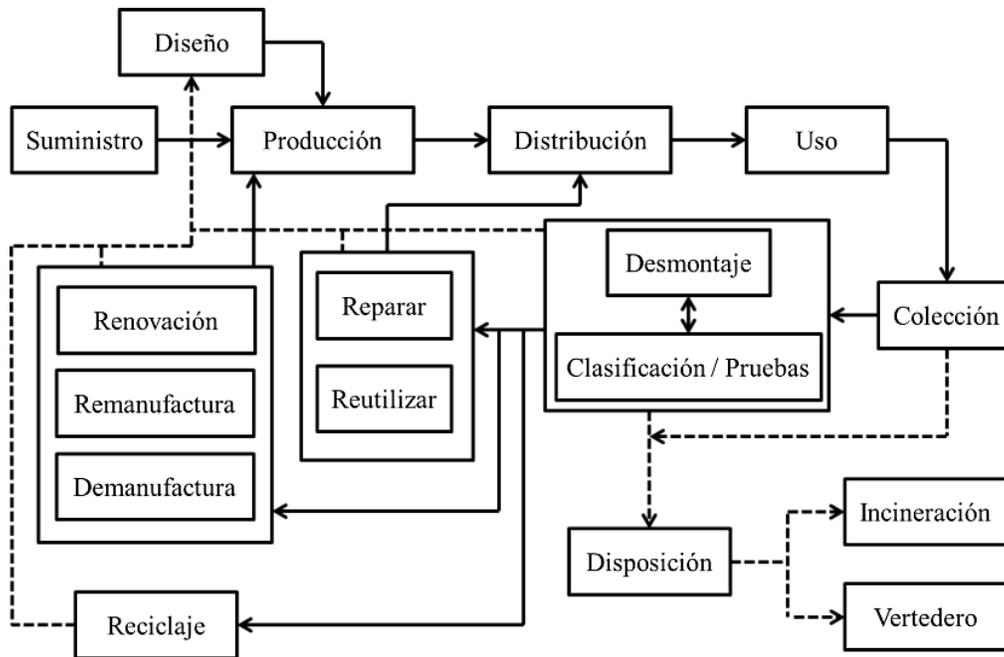
Figura 7. Opciones de disposición de productos en procesos de CSCC

Fuente:(Khor & Udin, 2012)

La Figura 7 muestra una CSCC, donde el flujo directo del producto o servicio tiene una dirección de izquierda (materia prima) a derecha (consumidor), pasando por distintas etapas, tales como el tratamiento, montaje, distribuidor entre otros. En otras palabras se evidencia la transformación de la materia prima en un bien o servicio mediante un tratamiento, montaje y una posterior distribución al cliente final.

En la figura también se pueden apreciar acciones de la LI tales como reparar, reacondicionar, remanufactura, reciclar, y finalmente el depósito de basura, todas estas con una función

específica y un punto de devolución distinto. En el caso de las reparaciones, el producto reparado ingresa a la CS para luego ser de nuevo distribuido. Por otro lado, el reacondicionamiento del producto, se realiza en la etapa de montaje que es donde se adecuará y distribuirá posteriormente. La actividad de remanufactura sitúa a los productos para el montaje y posteriormente la distribución, y el reciclaje de los productos usados, deben ser nuevamente tratados y seguir con el mismo ciclo. Finalmente, en caso de que ninguna de estas actividades pueda llevarse a cabo, se usará el depósito de basura como disposición final de estos productos. Sasikumar & Kannan (2008) proponen un modelo más robusto que comprende las siguientes actividades:



*Figura 8.* Marco de actividades de la CSI  
Fuente: Sasikumar & Kannan(2008)

El modelo propuesto en la *Figura 8* ilustra que inicialmente se debe contar con suministros y un diseño previo a la producción del bien o servicio, para luego distribuirlo, y llegar al cliente final que le proporcionará un uso y finalmente lo desechará. En este momento inicia el ciclo inverso, que incluye la recolección de estos bienes para luego proceder con las actividades de desmontaje y clasificación /pruebas, para luego reparar, reutilizarlo o enviar a reciclaje estos componentes y luego volver a distribuirlos. Del mismo modo los productos que se renuevan, remanufacturan o de manufacturan pueden ser parte del diseño o bien pueden ir directamente a producción. Finalmente los productos que no son enviados a ninguna de las actividades de ciclo inverso mencionadas anteriormente, serán enviados a una disposición final tal como la incineración o un vertedero.

El modelo propuesto por Sasikumar & Kannan(2008) en comparación con el propuesto por Khor & Udin (2012), tiene en cuenta más actividades en la CSI, y además considera dos formas de disposición (incineración y vertedero).

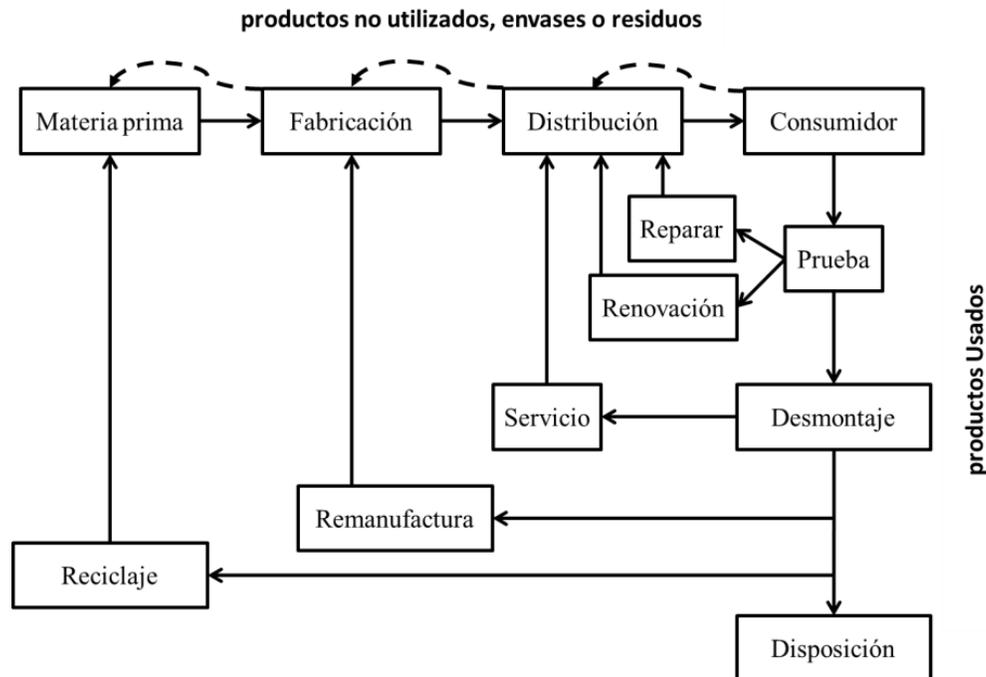


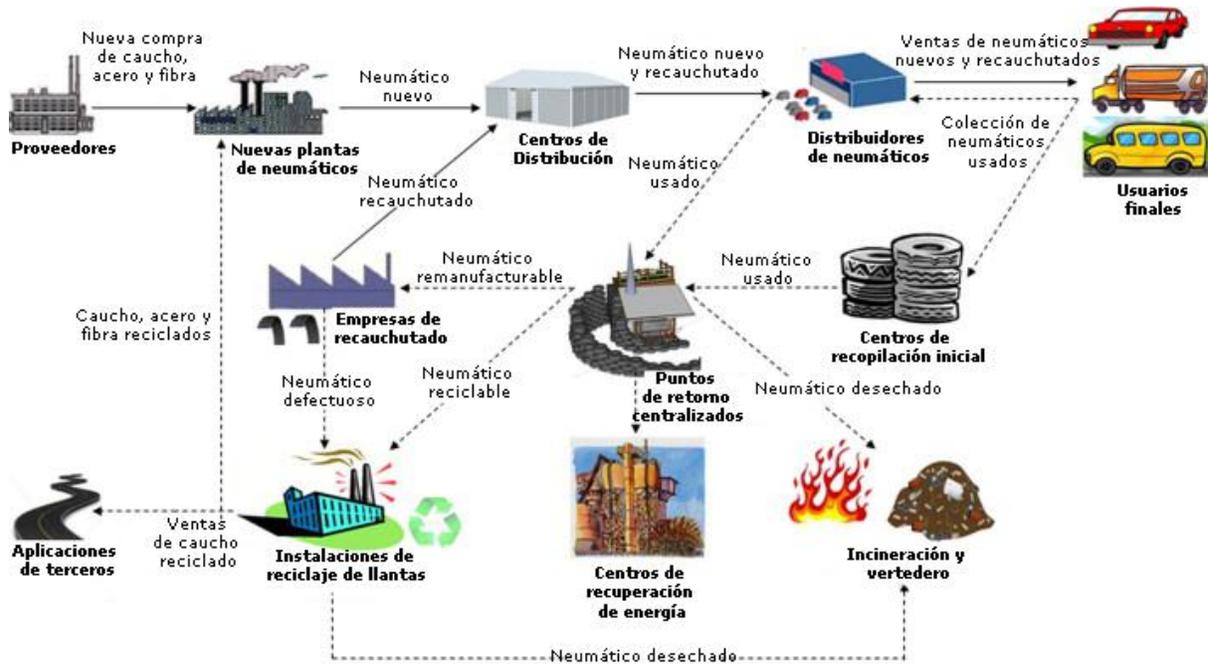
Figura 9. Diagrama de flujo básico de actividades de LI  
Fuente: (Srivastava, 2008)

Otro modelo propuesto es el expuesto por Srivastava(2008) (ver Figura 9). En términos generales, la CS de flujo directo inicia con la materia prima, seguidamente la fabricación del bien o servicio y por último la distribución a los consumidores. Después de esto inicia en dirección contraria el flujo de unidades, en este sentido se procede a realizar la prueba que determina si el bien usado requiere reparación, renovación o desmontaje, para ser luego distribuido directamente en el caso de la reparación y renovación, o enviado a servicio y luego a distribución en el caso de optar por desmontaje. Esta última forma de manipular el bien usado (desmontaje), puede generar partes que serán remanufacturadas o recicladas, y en el final de los casos una disposición diferente a las mencionadas.

Se puede ver que los tres modelos contienen en general las cuatro etapas principales de una CS de flujo directo que son 1) materia prima, 2) montaje, producción o fabricación, 3) Distribución y finalmente el 4) consumidor. Además, también cuentan con distintas etapas de LI en común que se le aplican a los productos usados, como lo son la reparación, remanufactura, reciclaje y disposición final, entre otras que contienen de más algunos diagramas. En general los tres diagramas son aproximaciones acertadas de las partes principales que componen una CSI.

## Caso particular: Llantas

Las CS de llantas también pueden ser abordadas como CSCC. En la *Figura 10* se muestra el diseño de una red de CSCC que tiene en cuenta el impacto ambiental con múltiples opciones de recuperación propuesta por Subulan et al. (2015).



*Figura 10.* CSCC con múltiples opciones de recuperación para llantas

Fuente: (Subulan et al., 2015)

En la CS directa propuesta en la *Figura 10*, llegan llantas nuevas y recauchutadas a los centros de distribución con el fin de satisfacer las demandas de los vendedores de neumáticos y cumplir con los requisitos de los mercados de segunda respectivamente. En la CSI, una parte de las llantas usadas inician el ciclo cuando están al final de su vida útil. Los neumáticos devueltos por los usuarios tienen un tratamiento inicial de inspección, luego consolidación y seguidamente de clasificación teniendo en cuenta distintas opciones de recuperación. Los neumáticos que se encuentran en buenas condiciones para ser recauchutados se envían a los centros correspondientes para tal fin, por otro lado los que no se encuentran en estas mismas condiciones pueden ser empleados en otros usos alternativos como recuperación de energía, reciclaje entre otros, según el estado en que se encuentren (Subulan et al., 2015). Teniendo en cuenta lo expuesto en el diagrama, se evidencia que “los neumáticos de desecho se pueden utilizar de cinco formas alternativas: reutilización directa, recauchutado, reciclaje, recuperación de energía y eliminación (relleno o incineración)” (Subulan et al., 2015, p. 2667). El recauchutado “es un proceso que permite volver a utilizar la cubierta del neumático y poner una nueva banda de rodadura, preservando así las cualidades que aseguran su uso como nuevo” (Uruburu et al., 2013,

p. 683), por lo tanto es una actividad que permite realizar un nuevo uso al neumático empleado y gastado previamente.

### 3.2 Casos de CSI de neumáticos que incluyen decisiones de diseño (localización, inventario o transporte)

Las decisiones de diseño relacionadas con localización de instalaciones, inventarios y transporte están también presentes en CSI de neumáticos. En el estudio realizado por De Souza & D'Agosto (2013) en diferentes países del mundo principalmente del continente europeo, se puede apreciar que en estos países existe una gestión de residuos enfocada en neumáticos, pues para el cien por ciento de estos países existían leyes reguladoras de los procesos de llantas de desecho, y en la mayoría de estos sitios estudiados, existen leyes en contra del envío de llantas de desecho directamente a vertederos; esto hace que exista una unión de esfuerzos entre los diferentes implicados para enfrentar el impacto ambiental generado por las llantas ante una mala disposición de las mismas al final de su vida útil.

Tabla 4

*Decisiones estratégicas en casos de neumáticos*

<b>Decisión</b>	<b>Autor(es)</b>	<b>Caso (País)</b>	<b>Modelo</b>
Localización	(Pedram et al., 2017)	Industria de llantas (Irán)	MILP ( <i>Mixed-integer linear programming</i> )
	(Amin, Zhang, & Akhtar, 2017)	Red de CSCC (Canadá)	MILP
	(Sasikumar, Kannan, & Haq, 2010)	Empresa de recauchutado (India)	MINLP
	(Dehghanian & Mansour, 2009)	Modelo de cuatro ciudades pobladas (Irán)	MOGA ( <i>Multi-objective genetic algorithm</i> )
	(Fathollahi-Fard, Hajiaghaei-Keshteli, & Mirjalili, 2018)	Provincia de Mazandaran (Irán)	Modelo de asignación de ubicaciones
Transporte	(de Figueiredo & Mayerle, 2008)	Reciclaje de llantas irrecuperables (Estados del sur de Brasil)	Modelo analítico
	(De Souza & D'Agosto, 2013)	Cadena de producción del cemento (municipio de Brasil)	Modelo conceptual
	(Costa-Salas, Sarache, & Überwimmer, 2017)	Red de reciclaje de llantas descartadas (Manizales, Colombia)	Modelo de simulación
Inventario	(Bazan, Jaber, & El Saadany, 2015)	Industria de recauchutado de neumáticos (Canadá)	Modelo de logística inversa
	(Subulan et al., 2015)	Industria del neumático (región egea de Turquía)	MILP
	(Pereira et al., 2018)	CSCC de neumáticos (Brasil)	Modelo de pronóstico

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 4 resume la información de algunos documentos revisados relacionados a casos de estudio de cadenas de suministro de neumáticos, los cuales abordan casos de la industria de los neumáticos, empresas de recauchutado entre otros en distintos países. Se puede ver que la mayoría de estos estudios se centran en países de América (norte o sur) y los demás se distribuyen entre Irán, la India y Turquía. Son pocos los estudios publicados sobre CS de Neumáticos, en los últimos años se han publicado menos de diez (Fathollahi-Fard et al., 2018). El modelo más común es el MILP.

Teniendo en cuenta las decisiones sobre localización se encontró que el modelo MILP propuesto por Pedram et al.(2017) (ampliación del modelo propuesto por Creazza, Dallari, & Rossi(2012)) determina la cantidad óptima, las ubicaciones y el flujo entre cada uno de los centros de la red (distribución, recolección, recauchutado y reciclaje). El caso de estudio abordado es una industria de neumáticos en Irán donde se fabrican y se venden dos tipos de llantas (para carros y camiones); quieren implementar la red de LI para las llantas de camiones. El modelo propone una capacidad de producción limitada para los fabricantes, para los demás centros (distribución, minoristas, recolección, recauchutado y reciclaje) la capacidad es conocida y sus ubicaciones son fijas y definidas de manera previa.

En el estudio llevado a cabo por Amin et al. (2017) se tuvieron en cuenta localizaciones reales y distancias entre estas instalaciones reales mediante el uso de Google maps para el diseño de la CSCC de llantas en Toronto, Canadá. En el modelo de programación no lineal de enteros mixtos propuesto por Sasikumar et al. (2010) se consideran las decisiones relacionadas con la cantidad de instalaciones y las ubicaciones de estas entre otras decisiones; ellos asumen una distancia de máximo 15 millas entre los puntos de colección de artículos y los clientes.

En el modelo propuesto por Fathollahi-Fard et al. (2018) se manejan tres niveles, siendo los fabricantes el primer nivel, los distribuidores el segundo y el tercero es la función de los colectores en devolver los neumáticos usados en el circuito inverso. En este modelo se asumen algunas instalaciones fijas como los proveedores, recicladores y mercados. A partir de la solución óptima de cada nivel se determinan las distintas ubicaciones de cada instalación.

Por otro lado la solución algorítmica propuesta por de Figueiredo & Mayerle (2008) soluciona el problema de diseño de red de recolección de neumáticos y su transporte en el caso en que al reciclador le exijan una cierta cantidad recolectada en un tiempo determinado; este modelo contempla un solo productor de llantas y determina la cantidad y ubicación de los centros receptores; además contempla la posibilidad de un incentivo que se pagará a la persona que devuelva un producto usado; sin embargo en el modelo ese valor de incentivo fue de cero, pues no existía una regulación que fijara ese valor, por lo tanto se hace necesario contar con un valor que motive al usuario final de devolver el producto usado.

En lo que refiere a transporte en la CSI el estudio de De Souza & D'Agosto (2013) analiza la cadena de valor mediante un método aplicado a la CSI de llantas de desecho. El estudio realizó una revisión de CSI en distintos países donde se encontró que las empresas de transporte, los comerciantes de llantas y de chatarra son los principales generadores de llantas de desecho; además en este estudio se menciona que en todos los casos (países estudiados) los principales usuarios de las llantas de desecho son las industrias cementeras y de caucho. En este estudio se identificaron las rutas de recolección de llantas de desecho mediante un software de enrutamiento de vehículos llamado *TransCAD 5.0*.

Costa-Salas et al. (2017) realizó un estudio que tuvo como finalidad encontrar el tamaño de la flota de camiones óptimo a emplear en la red de LI en Manizales. El modelo en esta ciudad colombiana cuenta con ocho generadores de llantas, los cuales las transportan a las instalaciones de almacenamiento mediante camiones con capacidad entre cinco y veinte llantas, y luego mediante otros camiones de mayor capacidad se envían a las instalaciones de recauchutado. El estudio afirma que así la compañía de saneamiento de la ciudad cuenta con recursos financieros para un tamaño de flota mayor, según la tasa de generación de llantas de desecho analizada en el estudio solo se requieren tres carros para la recolección y un camión de gran capacidad para entregar los residuos recolectados a los clientes.

Finalmente en lo que tiene que ver con transporte asociado con la parte ambiental, el estudio hecho por Bazan et al. (2015) consideraron los costos de las emisiones de gases del efecto invernadero del transporte mediante impuestos a las emisiones según el Sistema de comercio de emisiones de la UE (Unión Europea); se puede ver que una alternativa en la escogencia del tipo de transporte es mediante las consideraciones o restricciones ambientales, pues existirán en el mercado camiones más contaminantes que otros y con características diferentes. Por lo tanto se hace necesario evaluar en el diseño de una CSI las implicaciones ambientales presentadas.

En las decisiones de inventario Subulan et al. (2015) propusieron un modelo que contiene distintas restricciones que permiten calcular los niveles de inventario (NI) por cada tipo de llanta y material nuevo en cada planta, los NI de cada tipo de llanta nueva y recauchutada en cada centro de distribución y también conocer los NI de cada tipo de llanta de desecho en cada punto de retorno en cada periodo de tiempo.

En tanto el estudio llevado a cabo por Pereira et al. (2018) se identificaron distintos métodos de pronósticos aplicados a LI y CSCC para diversos sectores o productos. En el sector de los neumáticos, los métodos empleados fueron algoritmo genético y optimización de enjambre de partículas (G. Kannan, Noorul Haq, & Devika, 2009).

La información contenida en este capítulo evidencia distintos casos de CSI con sus respectivas estructuras, entre estos casos se encuentran algunos específicamente del sector de los neumáticos

usados. Se presenta un caso particular que presenta las múltiples opciones de recuperación en llantas y varios casos de CSI en los cuales se incluyen las decisiones de diseño mencionadas en el capítulo anterior; todo esto con el fin de brindar una serie de estudios relacionados al tema a tratar en este documento de asistencia de investigación que sirvan como guía en el diseño de cadenas de recuperación de neumáticos en la ciudad de Ibagué.

Otras características son los aspectos que se requieren en la modelación matemática desarrollada en casos de CSI, los cuales proporcionan información sobre las fuentes de incertidumbre tenidas en cuenta, el enfoque de sostenibilidad y en general aspectos inmersos en la modelación matemática.

#### **4. Aspectos relevantes en la modelación matemática que intervienen en el diseño de una cadena de recuperación de llantas usadas en el contexto urbano.**

Este capítulo consta de tres partes que intervienen en el diseño de una CSI las cuales son: las fuentes de incertidumbre, donde se exponen las principales que se tienen en cuenta en el desarrollo de modelos matemáticos; una segunda parte muestra los enfoques para la sostenibilidad ambiental encontrados en una de las tres dimensiones principales de sostenibilidad (económica, ambiental y social). Finalmente se encuentra una tabla sobre información de modelación matemática de CSI, en esta se recopila información del documento revisado, autor, tipo de modelo de programación empleado con el(los) objetivo(s) de la(s) función(es) objetivo formulada(s) y finalmente el sector abordado en cada estudio como por ejemplo sector del plástico, electrodomésticos, neumáticos, entre otros. En esta parte también se incluye una revisión más detallada, de aspectos de modelación matemática en tres estudios; para finalmente con base en esta información, mencionar los aspectos a considerar en el diseño de la cadena de recuperación de llantas usadas en Ibagué.

##### 4.1 Fuentes de incertidumbre en cadenas de suministro inversas

Las fuentes de incertidumbre en cadenas de abastecimiento inversa pueden variar dependiendo de muchos factores, entre estos se encuentran el sector en que se desarrollan, o el tipo de producto al cual se le realiza disposición final como el plástico, los electrodomésticos, materiales de madera reciclada de la industria de la construcción, renovación y demolición (Trochu, Chaabane, & Ouhimmou, 2018), entre otros.

En la investigación llevada a cabo por Govindan, Fattahi, & Keyvanshokoo (2017), se encontraron distintas fuentes de incertidumbre, a continuación solo se mencionarán las que hacen parte de las cadenas de abastecimiento inversa:

- Cantidades de devolución
- Tasa de eliminación de devoluciones
- Precio de compra de devoluciones

- Proporción de productos/componentes devueltos para diferentes actividades (por ejemplo, refabricación, reciclaje y reacondicionamiento)
- Beneficio de reciclar / remanufacturar productos devueltos
- Precio de venta de productos LI (productos / componentes / materias primas) a los clientes
- Demanda de productos LI (productos / componentes / materias primas)

La Tabla 5 recopila información desde el año 2007 al año 2017, de los parámetros inciertos considerados en diferentes modelos, muestra el caso de estudio propuestos por cada autor y las incertidumbres (parámetros inciertos).

Tabla 5

*Modelos de decisión recientes de LI y CSCC teniendo en cuenta las incertidumbres*

Autores	Formulación del modelo	Parámetros inciertos			Caso de estudio propuesto Industria
		UFS	VR	CM	
Salema et al. (2007)	MILP		x		-
Chouinard et al. (2008)	2 stage ST		x		Médica
Pishvae et al. (2009)	ST program		x	x	-
Lee et al. (2010)	2 stage ST		x		Electrónica
Kara and Onut (2010)	2 stage ST		x		Papelera
Gomes et al. (2011)	MILP		x		Electrónica
Gomes et al. (2011)	2 stage ST		x	x	-
Pishvae and Rabbani (2011)	Robusto		x		-
Lieckens and Vandaele (2012)	Minlp		x	x	-
Cardoso et al. (2013)	MILP		Else		-
Lieckens et al. (2013)	MINLP		Else		Manufacturera
Toso and Ahem (2014)	ST program		x		Residencial
Dai and Wang (2014)	ST program		x		-
Zeballos et al. (2014)	Multi-stage ST		Else		-
Subulan et al. (2015)	Fuzzy		Else		Automotriz
Jeihoonian et al. 2016a, 2016b)	Multi-stage ST		x	x	Electrónica
Sun and Shen (2017)	Robusto		x	x	Electrónica
Nakatani et al. (2017)	Robusto		Else		Plástica
Amin and Baki (2017)	Fuzzy		Else		Electrónica
Amin et al. (2017)	MILP		x		Automotriz
Trochu, J., Chaabane, A., Ouhimmou, M.	MILP	x	x	x	CRD

UFS: Ubicación de las fuentes de suministro; VR: volumen recopilado; CM: calidad del material;

Fuente: (Trochu et al., 2018)

Como se puede apreciar en la tabla anterior, de los veintiún autores citados solo el 4,76% (porcentaje correspondiente a solo 1 caso de 21) consideran la ubicación de las fuentes de suministro (UFS) como un parámetro incierto, por otro lado el factor que más se considera dentro de los modelos, es el volumen recopilado (VR) seguido por Calidad del material (CM).

En la revisión bibliográfica hecha por Ayvaz et al. (2015) se tiene en cuenta una serie de parámetros inciertos más amplia, que se compone de factores como cantidad de demanda, cantidad de devolución, volúmenes de recuperación, volúmenes de procesamiento, costos de transporte, calidad de devolución, costo variable, precio, costos de producción, costos de operación, costos de colección, costos de eliminación entre otros. El resultado de esta revisión evidencia que “los modelos determinísticos comúnmente ignoran la incertidumbre asociada con el proceso de Diseño de Redes de Logística Inversa (DRLI) (o RLND por sus siglas en inglés *Reverse Logistics network design*); los modelos estocásticos explican las incertidumbres en términos de cantidad, calidad y tiempo de los productos devueltos” (Ayvaz et al., 2015, p. 393).

En el diseño de la red de una CSCC para neumáticos que tiene en cuenta el impacto al medio ambiente propuesta por Subulan et al. (2015), se sugiere al final del estudio abordar “las incertidumbres relacionadas con la demanda de neumáticos nuevos y recauchutados, las cantidades de retorno de los neumáticos usados, las tasas de retorno y las capacidades (tanto para instalaciones como para vehículos) mediante aproximaciones de programación matemática difusa”(Subulan et al., 2015, p. 2691).

Tabla 6  
*Fuentes de incertidumbre por tipo de producto*

<b>Autor</b>	<b>Fuentes de incertidumbre</b>	<b>Tipo de producto</b>
Fleischmann et al. (1997)		Fotocopiadora, papel
Francas and Minner (2009)	Demanda, Retorno	
Kannan, Noorul Haq, and Devika (2009)		Neumático
Sasikumar et al. (2010)		Neumático
Shi, Zhang, Sha, and Amin (2010)	Demanda, Retorno	
Amin & Zhang (2012)		Computador
Amin & Zhang (2013)	Demanda, Retorno	Fotocopiadora
Demirel et al. (2014)	Costo	
Mirakhorli (2014)	Demanda, Retorno	Pan
Ramezani et al. (2014)		
Zeballos et al. (2014)	Demanda, Abastecimiento	
Subulan et al. (2015)		Neumático
Accorsi, Manzini, Pini, and Penazzi (2015)		
Subulan et al. (2015)	Demanda, Retorno, Eliminación	Batería
Al-Salem, Diabat, Dalalah, and Alrefaei		



2017)							
(Xu et al., 2017)	Residuos sólidos	x				x	x
(Feitó-Cespón, Sarache, Piedra-Jimenez, & Cespón-Castro, 2017)	Reciclaje				x		x
(Hatefi & Jolai, 2014)	-	x	x		x		
(MA, YAO, JIN, REN, & LV, 2016)	CSI				x		x
(Sasikumar et al., 2010)	Neumáticos	x	x			x	x

Fuente: Elaboración propia

Convenciones: Ta: Tamaño; Ti: Tipo; Cos: Costo; Can: Cantidad; Cal: Calidad; Td: Tasa de devolución; TR: Tasa de rendimiento; Tr: Tiempo de recepción; Va: Variedad; A: Almacenamiento; Fs: Fuentes de suministro; T: De Tratamiento; P: De los proveedores; D: Demanda; Vd: Voluntad de devolver; Fda: Factores de daño ambiental; Rp: Retrasos en producción; Rd: Recolección de desechos; Tcd: Tasa de cambio de divisas; Rsaepo: Riesgos Sociales, ambientales, económicos, políticos, organizacionales; Epo: Estimación de los parámetros de la operación; Cli: Costo de LI; Psp: Precio de los segundos productos; Gr: Generación de residuos.

En la Tabla 7 se consideraron en total 25 fuentes de incertidumbre agrupadas en seis categorías las cuales son: Transporte, Material recolectado o producto usado o devuelto, Ubicación, Capacidad, Cliente, y otras fuentes de incertidumbre. Se puede ver que la D del cliente es el factor que los autores en general más consideran como incierto, seguido de Can y Cal del material recolectado. Como se puede apreciar en la tabla, material recolectado, producto devuelto o producto usado denota el mismo concepto.

En el sector de los neumáticos se pueden ver que en cada uno de los estudios consultados se tienen en cuenta distintas fuentes de incertidumbre, estas son en total cinco: Cal (de las llantas usadas), su Td, TR, la D (del cliente), y por último los Fda. Teniendo en cuenta estas fuentes de incertidumbre se toman decisiones de procesamiento. La Cal es un factor que determina si el neumático pasa al proceso de recauchutado (si cumple con el nivel requerido de calidad), o por lo contrario se envía a reciclaje (Pedram et al., 2017); la Td se considera incierta debido a que se desconoce cuántas devoluciones habrán después de que el cliente obtenga el producto. Del mismo modo es incierto conocer la TR, la D (del cliente) y los Fda.

## 4.2 El enfoque de sostenibilidad en el diseño de cadenas de suministro

En la revisión de literatura proporcionada por Seuring (2013) se especifican tres dimensiones de sostenibilidad: dimensión ambiental, económica y social en la CS (Carter & Rogers, 2008), de las cuales esta última es la que más carece de investigación. Relacionado con la dimensión ambiental, se tiene en cuenta el impacto ambiental que se produce a partir de un producto y la forma de tratar con el mismo; por otro lado en la económica, se tienen en cuenta ingresos y costos totales.

La sostenibilidad ambiental tiene en cuenta conceptos como Ecología Industrial o IE (*Industrial Ecology*) y Simbiosis Industrial o IS (*Industrial Symbiosis*) (Leigh & Li, 2015). Leigh & Li (2015) mencionan distintos enfoques para la sostenibilidad ambiental de una CS los cuales se describen a continuación:

- **Gestión ambiental / sistema de gestión del medio ambiente:** Implementar un sistema de gestión ambiental es una acción que se acoge como parte de un esfuerzo continuo de los componentes de la CS para disminuir los efectos negativos al medio ambiente (Wiengarten, Pagell, & Fynes, 2013).
- **Diseño para el medio ambiente:** “Incluye el diseño del producto y el diseño del proceso de la cadena de suministro” (Leigh & Li, 2015, p. 633). El diseño de un producto debe ser amigable con el medio ambiente, con piezas duraderas, que se puedan utilizar varias veces y que se puedan recuperar ambientalmente (Kurk & Eagan, 2008); (Giannis T. Tsoulfas & Pappis, 2006).
- **Administración de productos:** Una buena administración de productos involucra la gestión del ciclo de vida y la comprensión de los mercados encargados de los artículos indeseados con el fin de generar valor a partir de estos (Rogers, Rogers, & Lembke, 2010). La administración del producto amplía el enfoque de la sostenibilidad ambiental hacia los servicios y hacia la cadena de valor de la oferta; esto requiere que todo el equipo de la cadena (diseñadores, proveedores, productores, entre otros) trabaje de forma conjunta, con responsabilidades específicas y definidas hacia los productos y servicios ofrecidos (Leigh & Li, 2015).
- **Compra verde:** La compra verde pretende emplear al máximo la reutilización de productos con el fin de devolverlo a su estado natural o de convertirlo en insumo para la elaboración de otro producto (Giannis T. Tsoulfas & Pappis, 2006).
- **LI:** Está relacionada con el manejo de las devoluciones de productos hechas por los clientes a la empresa productora (Leigh & Li, 2015).
- **Reciclar, reutilizar y remanufacturar:** Estos conceptos se encuentran inmersos en los enfoques mencionados anteriormente, por ejemplo la reutilización aparece en "gestión ambiental", "compra verde" y "LI", y la refabricación en el enfoque "gestión ambiental". Estos enfoques están muy relacionados, sin embargo guardan diferencias en el enfoque de reducción del impacto negativo al medio ambiente (Leigh & Li, 2015).

#### 4.3 Modelación matemática de cadenas de suministro inversas.

Tabla 8

*Modelación matemática (tipo y objetivo de cada modelo)*

N°	Autores	Tipo de modelo	Objetivo del modelo	Sector que aborda
1	(D. Kannan et al., 2012)	Modelo de programación lineal entero mixto o MILP ( <i>mixed integer linear programming</i> )	Minimizar los costos involucrados en el modelo de red de LI y considera la huella de carbono involucrada tanto en el transporte como en los costos de operaciones de LI (recolección). Minimizar el costo total, que consiste en el costo de transporte, el costo de operación, el costo fijo para nuevas instalaciones, el costo final de disposición y el costo del relleno sanitario, así como los ingresos por venta de materiales recuperados.	Sector del plástico
2	(Shih, 2001)	MILP	Minimización de los costos generales y la minimización de la tardanza total del tiempo de ciclo.	Electrodomésticos
3	(Du & Evans, 2008)	Modelo lineal entera mixta bi-objetivos o BMILP ( <i>Bi-objective mixed integer linear programming</i> )	Minimizar el costo total del proceso de reciclaje de madera recolectado de los sitios CRD y determinar la ubicación y las capacidades de las instalaciones de clasificación para garantizar el cumplimiento de la nueva regulación y evitar que la madera se fabrique masivamente.	Servicio de postventa (reparaciones)
4	(Trochu et al., 2018)	MILP	Maximizar el beneficio neto total, minimizar las piezas defectuosas (maximizar la calidad de las piezas compradas a los proveedores), minimizar las piezas entregadas tarde de los proveedores, minimiza los	Madera reciclada
5	(Moghaddam, 2015)	Modelo matemático multiobjetivo difuso o FMOM ( <i>fuzzy multi-objective model</i> )		-

6	(Pedram et al., 2017)	MILP (Multiproducto y multinivel)	factores de riesgo totales del entorno económico. maximizar los beneficios y proporcionar apoyo en la toma de decisiones de gestión de residuos con el fin de minimizar la contaminación	Neumáticos
7	(Subulan et al., 2015)	MILP	Maximizar el beneficio total de CSCC y minimizar el impacto ambiental total a lo largo del CSCC.	Neumáticos
8	(Govindan et al., 2015)	-	El objetivo de este documento es revisar artículos recientemente publicados en LI y CSCC en revistas científicas.	-
9	(Soleimani & Govindan, 2014)	Modelo de programación lineal entero mixta estocástica o SMILP ( <i>stochastic mixed integer linear programming</i> )	Diseñar y planificar una red de CSI.	-
10	(Srivastava, 2008)	Modelo conceptual	Desarrollar un modelo conceptual para la ubicación simultánea de las instalaciones para una red de LI rentable y eficiente	-
11	(Amin et al., 2017)	MILP	El objetivo del modelo de optimización es maximizar el beneficio total	Neumáticos
12	(Xu et al., 2017)	MILP robusta	El modelo robusto apunta a mitigar los riesgos de la cadena de suministro inversa global (CSIG)(GRSC <i>Global Reverse Supply Chain</i> ) optimizando el peor de los casos del sistema de reciclaje	Residuos sólidos
13	(Feitó-Cespón et al., 2017)	Modelo de programación no lineal de enteros mixtos estocástico multi-objetivo o MSMINLP ( <i>multi-objective stochastic Mix</i> )	Establecer el flujo de materiales a través de la red de suministro, la cantidad y ubicación de las instalaciones y la cantidad y el tipo de modos de transporte	Reciclaje

14	(Hatefi & Jolai, 2014)	<i>integer non linear programming</i> Modelo de programación lineal mixta entera con robustez p aumentada o MILP robusta p aumentada	Minimizar el costo nominal	-
15	(MA et al., 2016)	MILP	La primera función objetivo tiene como objetivo minimizar el costo económico y la segunda función objetivo es minimizar la influencia ambiental	CSI
16	(Sasikumar et al., 2010)	Modelo de programación no lineal de enteros mixtos o MINLP ( <i>Mix-Integer Non-Linear Programming</i> )	Maximizar el beneficio de una red de LI de varios niveles y también presentar un estudio de caso de la vida real de la remanufactura de neumáticos de camiones para el segmento de mercado secundario	Neumáticos
17	(Simic & Dabic-Ostojic, 2018)	Modelo de programación de intervalos de tiempo limitado para decisiones basadas en la incertidumbre	Maximizar el beneficio total del sistema para la gestión de neumáticos usados durante el horizonte de planificación.	Neumáticos

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la Tabla 8 la mayoría de los autores citados emplearon modelos de programación lineal de enteros mixtos (MILP), y sus funciones objetivos están principalmente enfocadas en minimizar los costos, maximizar los beneficios, minimizar tiempos, pero especialmente también tienen objetivos ambientales, como tener en cuenta la huella de carbono, minimizar la contaminación, el impacto ambiental, y la influencia ambiental. En tanto a los modelos propuestos relacionados con neumáticos, se puede ver que no todos tienen como objetivo principal la minimización de la contaminación, sino la maximización de los beneficios totales, y en otros casos incluyen a los dos objetivos.

En aras de profundizar en casos específicos de CSI, se amplía la información de **tres estudios** en distintas zonas del mundo, en este sentido, el **primer estudio** abordado es el llevado a cabo por Subulan et al. (2015) tiene como objetivo desarrollar un modelo de diseño de red de logística multiobjetivo, multietápico, multiproducto y multirramo considerando problemas ambientales.

Los dos principales objetivos del modelo MILP son La maximización de la ganancia total de la red global de la CSCC, y minimización del impacto ambiental total a lo largo de CSCC. El primer objetivo es maximizar la ganancia, la cual se obtiene de sustraer los costos incurridos de los ingresos totales. Los costos totales reúnen costos de apertura y operación de instalaciones, compras, transporte, inventario, eliminación, refabricación, reciclaje, recolección, entre otros.

“Los ingresos totales de la red CLSC se pueden obtener vendiendo neumáticos nuevos, neumáticos recauchutados, neumáticos usados para recuperación de energía y materiales reciclados para otras aplicaciones” (Subulan et al., 2015, p. 2670).

El segundo objetivo, se logra mediante la minimización del puntaje total del eco-indicador a través de la red CSCC. Para calcular el puntaje total del eco-indicador se debe definir previamente el ciclo de vida del neumático el cual se compone de distintas fases o etapas; luego de esto se multiplican los valores estándar del indicador por los montos de cada etapa para calcular los puntajes para cada fase.

El modelo contiene distintas restricciones; algunas de estas son asegurar que las cantidades (producción, refabricación y reciclaje) no superen las capacidades de las instalaciones; otras muestran que solo se debe escoger una tecnología de protección ambiental por instalación abierta en su determinado tiempo. Por otro lado existen otras que calculan los niveles de inventario, capacidades de almacenamiento en distintos puntos, entre otras características en cada periodo de tiempo. En relación a la demanda de los clientes, existen restricciones que aseguran que sean satisfechas en su totalidad. Otras se encargan de los flujos presentes entre instalaciones, de la cantidad de vehículos empleados, su capacidad entre otras características.

El caso de estudio empleado para desarrollar el modelo es en la región Egea de Turquía en una industria de neumáticos. Al ejecutar el modelo mediante el solucionador de programación ILOG OPL Studio versión 6.3 para las funciones objetivo por separado y se encontró que la segunda función objetivo brindó una configuración más amigable con el medio ambiente pero con menores ingresos. Finalmente algunas de sus principales contribuciones consisten en brindar características de modelado para el diseño de CSCC y de logística inversa más precisas y reales; también proporcionan el uso del método eco-indicador 99 en el caso de recuperación de neumáticos. Por otro lado proporcionan un enfoque de diseño experimental (Taguchi) para determinar los valores óptimos y examinar el comportamiento de las funciones objetivo bajo algunos parámetros.

El **segundo** de los estudios mencionados en esta sección es el realizado por Pedram et al. (2017) presenta un modelo lineal de enteros mixtos (MILP) multiproducto y multinivel para el diseño de una CSCC con el objetivo de maximizar los beneficios y brindar apoyo en la toma de decisiones que favorezcan al medio ambiente. Mediante el modelo se determina la cantidad de instalaciones y sus ubicaciones y los flujos de materiales entre estas, considerando incertidumbre en la demanda, la tasa de devolución y la calidad del producto devuelto. Sin embargo ellos superan este problema al considerar tres escenarios de optimismo, más probable y el pesimista con probabilidades de ocurrencia de 0.35, 0.50, 0.15 respectivamente.

En la formulación del modelo se tienen en cuenta numerosos conjuntos, parámetros y variables. Algunos de estos conjuntos son de fabricantes, de centros de distribución, de centros de recolección, de recauchutador, de reciclaje, entre otros.

Parámetros relacionados con costos, capacidades, de penalización, de venta, entre otros. Variables de decisión y binarias; las de decisión como las distintas cantidades, bien sea enviada desde un punto a otro, de demanda entre otras; y las binarias que hacen referencia a decisiones entre abrir o no abrir centros (distribución, recolección o recauchutado).

La función objetivo maximiza los beneficios. Este se calcula teniendo en cuenta el costo total que es la sumatoria de todos los costos (costos de apertura de la instalación fija, de transporte, de fabricación, de distribución, de recolección, de recauchutado, de penalización por no cubrir la demanda) sustraído del ingreso total. Las restricciones son de capacidad, de controlar de capacidad de producción, de satisfacción de la demanda, de equilibrio de flujos, de cantidades de producción, y de decisión de apertura de los distintos centros.

El caso de estudio del modelo presentado por Pedram et al. (2017) es una industria iraní de neumáticos. A esta industria se le llamará ABC, y está ubicada en Teherán, Irán. Esta produce neumáticos de distinta calidad y tamaño, específicamente llantas para carro y para camiones. Esta industria quiere diseñar una red de LI para llantas de camiones especialmente. Esta CS consta de tres niveles, plantas productoras, centros de distribución y puntos de recepción.

El ejemplo brindado en el estudio de ABC cuenta con 6 tipos de productos, 3 plantas productoras, 10 centros de distribución y 40 puntos de entrega (1 punto de entrega es la suma de toda la demanda de esa región específica). ABC cuenta con maquinaria y presupuesto limitado para abrir centros de recolección de neumáticos usados, y centros de recauchutado. El resultado del modelo sugiere que para contar con una red óptima se deben cerrar algunas instalaciones. Una de los resultados del análisis de sensibilidad realizado por ellos en su modelo, es que al aumentar la capacidad del CD (centro de distribución), el valor de la función objetivo aumenta y el número de instalaciones abiertas decrece. “Este estudio muestra que un modelo de red de cadena de suministro de bucle cerrado bien diseñado puede no solo beneficiar al medio ambiente, sino que también puede proporcionar beneficios económicos e incentivos a los fabricantes” (Pedram et al., 2017, p. 469).

El **tercer caso** es el presentado en el estudio de Feitó-Cespón et al.(2017) en su estudio es un problema no lineal de enteros mixtos multijugador estocástico o SMOMINLP (*Stochastic Multi-Objective Mixed Integer Non-Linear Problem*) con el fin de rediseñar la CS sostenible de reciclaje de algunos productos. El modelo persigue objetivos económicos, ambientales y sociales que soportan la toma de decisiones a nivel estratégico.

El caso de estudio es una CS de reciclaje de plástico ubicada en Cuba, pues últimamente se ha visto un incremento en la generación de este tipo de desechos y se hace necesario rediseñar la red

de LI. La solución del modelo propuesto en este estudio recomendó abrir dos plantas de reciclaje más con el fin de mejorar la situación actual.

La formulación matemática se compone de conjuntos, parámetros, y variables. Los conjuntos a grandes rasgos son de: proveedores de desechos reciclables, de alternativas de ubicación, de clientes, de alternativas de modos de transporte y de productos finales. Por otro lado los parámetros de entrada principalmente están en términos de cantidades, capacidades, impacto ecológico generado, consumo de energía, consumo de agua, distancias, costos, entre otros. Las variables de decisión por su parte describen cantidades (productos, viajes) y decisiones (variables binarias).

Las funciones objetivos del estudio son tres. La primera consiste en la totalidad de los costos la cual se pretende minimizar; la segunda evalúa el impacto ambiental mediante el Eco-Indicador 99, teniendo en cuenta tres componentes principales. El primero es el efecto de usar residuos en lugar de materias primas nuevas, el segundo presenta el impacto ambiental por el consumo de recursos y contaminación por el modo de transporte y el tercero es sobre el efecto positivo generado por la buena disposición de los residuos. Y finalmente la tercera función aborda los objetivos sociales con el fin de incrementar el servicio al cliente.

Respecto a las restricciones del modelo, este cuenta con catorce. Principalmente están relacionadas con el flujo de materiales a través de la red, los límites de capacidad, la cantidad de viajes por cada modo de transporte entre otras. Ellos presentan además una medición de desempeño que les permitirá elegir la mejor alternativa para rediseñar la CS.

Como se mencionó anteriormente el caso de estudio de este documento es una CS de reciclaje de plástico en Cuba, la cual cuenta con 18 proveedores de residuos, 1 planta de reciclaje, y 18 clientes, y transporte heterogéneo. La planta trata 3 productos, PET, PEL y PVC.

Según los resultados el ahorro en puntos anuales del Eco-indicador 99 fue de 360.772. Por otro lado, la nueva CS contiene 3 plantas de reciclaje, los mismos 18 proveedores y 18 clientes. Respecto a los modos de transporte se especificaron 3; baja media y gran capacidad. En términos de costos, este tuvo una reducción de 20,9%.

#### 4.4 Aspectos a considerar en el diseño de la cadena de recuperación de llantas usadas en Ibagué.

El estado del arte descrito en el trabajo puede conducir al establecimiento de pautas para una cadena de recuperación de llantas usadas en Ibagué, tales como:

*Función objetivo:* En el caso de Ibagué es necesario tener en cuenta las calles, los tipos de camiones que están disponibles o en su defecto los tipos que se emplearán, las direcciones de las

calles y en general los aspectos relacionados con las vías; con el fin de maximizar las ganancias o utilidades y al mismo tiempo disminuir el impacto ambiental.

*Restricciones:* Es necesario identificar algunos aspectos como la ubicación de las cervitecas, que instalaciones son factibles de ampliar su capacidad, qué tipo de tecnología de protección ambiental se empleará con el fin de reducir el impacto ambiental generado. Por otro lado se debe conocer la legislación pertinente al manejo de neumáticos, con el fin de operar la CSI bajo estas condiciones.

*Sub-problemas:* Dentro de los sub-problemas que pueden surgir en el diseño de una cadena de recuperación de llantas usadas en Ibagué son: conocer la ubicación de los centros de acopios, ¿cuál o cuáles opciones de recuperación se emplearán? (recauchutado, incineración, recuperación de energía, entre otras).

## **5. Conclusiones, contribuciones y limitaciones**

El marco teórico proporcionado en este estudio permite la comprensión del concepto de CSI mediante la recopilación de distintos aportes proporcionados en años diferentes, por autores distintos desde enfoques particulares. Del mismo modo proporciona un marco de elementos y actividades principales brindando así un panorama más amplio que permitirá en el caso de llantas de Ibagué escoger las actividades que según sus características se pueda acoger en el diseño de la CSI de neumáticos. A partir de la información contenida en esta primera sección se puede ver que existen CSI de neumáticos que se implementaron por la necesidad de mejorar la gestión de este tipo de residuos. Además de esto de manera general dependiendo del tipo de producto al cual se diseñará una CSI las etapas o actividades de la misma variarían. En esta sección se explican las distintas decisiones contenidas en el triángulo de la toma de decisiones logísticas con el fin de clasificar las decisiones que se llevan a cabo en el proceso de diseño de CSI y mostrar de forma general en qué consiste cada una de ellas.

Los distintos casos presentados contribuyen a proporcionar una imagen real de CSI de neumáticos lo que servirá de insumo a la hora de iniciar el diseño de la CSI en Ibagué. Como se puede evidenciar en los casos referenciados relacionados con el diseño de CSI son pocos y limitados los estudios de CSI sobre neumáticos, y de los pocos que existen en sur américa en esta revisión únicamente se encontraron casos en países como Brasil y Colombia. Teniendo en cuenta las decisiones de localización en el diseño de CSI se proporcionan ejemplos de modelos que determinan las cantidades y las ubicaciones de algunas instalaciones de la red (Pedram et al., 2017)teniendo en cuenta diferentes objetivos, restricciones y factores.

En el estudio proporcionado por Amin et al. (2017) se evidencia el uso eficiente de herramientas que están al alcance de la tecnología como lo es Google maps que brinda precisión en la medición de distancias. Por otro lado si se pretende diseñar una red que brinde un incentivo al

usuario para que participe en la devolución de llantas usadas es necesario que en la ciudad o región se tenga estipulado el valor del incentivo a pagar de manera previa. En lo que refiere a decisiones de transporte, se presentan formas de identificar rutas específicas mediante software; se proporciona una alternativa verde en el modelo de Bazan et al. (2015), al considerar los costos de las emisiones al medio ambiente lo que sugiere implícitamente escoger el mejor modo y medio de transporte con el fin de evitar sobre costos. Finalmente las decisiones de inventario presentadas proponen modelos que calculan los niveles de inventario Subulan et al. (2015).

Existen diversos parámetros o factores inciertos en las CSI sin embargo Ayvaz et al. (2015) menciona que los modelos determinísticos ignoran la incertidumbre en el proceso de DRLI (diseño de redes de logística inversa) mientras que los estocásticos la explican en términos de calidad, cantidad y tiempo de los productos devueltos por el cliente. En algunas CSI de neumáticos las principales fuentes de incertidumbre son la demanda y el retorno de llantas (Amin et al., 2017). Sin embargo en esta revisión presentada se mencionan cinco fuentes las cuales son calidad de las llantas usadas, su tasa de devolución, su tasa de rendimiento la demanda del cliente y los factores de daño ambiental. Teniendo en cuenta el enfoque de sostenibilidad, Seuring(2013)especifica 3 dimensiones: ambiental, económica y social.

En este documento de asistencia de investigación no se presentaron limitaciones que impidieran el desarrollo del mismo, por el contrario se contó con información pertinente y adecuada para el desarrollo de las distintas secciones que se presentaron.

## 6. Bibliografía

- Agrawal, S., Singh, R. K., & Murtaza, Q. (2016). Outsourcing decisions in reverse logistics: Sustainable balanced scorecard and graph theoretic approach. *Resources, Conservation and Recycling*, *108*, 41–53. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.01.004>
- Amin, S. H., Zhang, G., & Akhtar, P. (2017). Effects of uncertainty on a tire closed-loop supply chain network. *Expert Systems with Applications*, *73*, 82–91. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.12.024>
- Ayvaz, B., Bolat, B., & Aydın, N. (2015). Stochastic reverse logistics network design for waste of electrical and electronic equipment. *Resources, Conservation and Recycling*, *104*, 391–404. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.07.006>
- Bakker, M., Riezebos, J., & Teunter, R. H. (2012). Review of inventory systems with deterioration since 2001. *European Journal of Operational Research*, *221*(2), 275–284. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.03.004>
- Ballou, R. H. (2004). *Logística. Administración de la cadena de suministro*.
- Battaia, O., & Gupta, S. M. (2015). Reverse supply chains: A source of opportunities and challenges. *Journal of Manufacturing Systems*, *37*, 587–588. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.11.005>
- Bazan, E., Jaber, M. Y., & El Saadany, A. M. A. (2015). Carbon emissions and energy effects on manufacturing-remanufacturing inventory models. *Computers and Industrial Engineering*, *88*, 307–316. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.07.002>
- Beamon, B. M. (1998). Supply chain design and analysis: Models and methods. *International Journal of Production Economics*, *55*(3), 281–294. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(98\)00079-6](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(98)00079-6)
- Blackburn, J. D., Guide, V. D. R., Souza, G. C., & Wassenhove, L. N. Van. (2004). Reverse Supply Chains for Commercial Returns, *46*(2), 6–23.
- Carter, C. R., & Rogers, D. S. (2008). A framework of sustainable supply chain management: moving toward new theory. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, *38*(5), 360–387. <https://doi.org/10.1108/09600030810882816>
- Chopra, S., & Meindl, P. (2008). *Administración de la cadena de suministro*.
- Costa-Salas, Y., Sarache, W., & Überwimmer, M. (2017). Fleet size optimization in the discarded tire collection process. *Research in Transportation Business and Management*, *24*(August), 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2017.08.001>
- Creazza, A., Dallari, F., & Rossi, T. (2012). Applying an integrated logistics network design and optimisation model: the Pirelli Tyre case. *International Journal of Production Research*, *50*, 3021–3038.

- Cruz-Rivera, R., & Ertel, J. (2009). Reverse logistics network design for the collection of End-of-Life Vehicles in Mexico. *European Journal of Operational Research*, 196(3), 930–939. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.04.041>
- Das, S. K., Yedlarajiah, P., & Narendra, R. (2000). An approach for estimating the end-of-life product disassembly effort and cost. *International Journal of Production Research*, 38(3), 657–673. <https://doi.org/10.1080/002075400189356>
- de Brito, M. P., & Dekker, R. (2004). A Framework for Reverse Logistics. *Reverse Logistics*, 3–27. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-24803-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-540-24803-3_1)
- de Figueiredo, J. N., & Mayerle, S. F. (2008). Designing minimum-cost recycling collection networks with required throughput. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(5), 731–752. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2007.04.002>
- De Souza, C. D. R., & D'Agosto, M. D. A. (2013). Value chain analysis applied to the scrap tire reverse logistics chain: An applied study of co-processing in the cement industry. *Resources, Conservation and Recycling*, 78, 15–25. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.06.007>
- Dehghanian, F., & Mansour, S. (2009). Designing sustainable recovery network of end-of-life products using genetic algorithm. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(10), 559–570. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.04.007>
- Dekker, R., Bloemhof, J., & Mallidis, I. (2012). Operations Research for green logistics – An overview of aspects, issues, contributions and challenges. *European Journal of Operational Research*, 219(3), 671–679. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.11.010>
- Dissanayake, G., & Sinha, P. (2015). An examination of the product development process for fashion remanufacturing. *Resources, Conservation and Recycling*, 104, 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.09.008>
- Du, F., & Evans, G. W. (2008). A bi-objective reverse logistics network analysis for post-sale service. *Computers and Operations Research*, 35(8), 2617–2634. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2006.12.020>
- Duarte Castillo, A. E. (2015). *Metodología para la localización de instalaciones de producción de biocombustibles con enfoque de cadenas de suministro. Aplicaciones en el contexto colombiano*. Universidad Nacional de Colombia.
- Fathollahi-Fard, A. M., Hajiaghahi-Keshteli, M., & Mirjalili, S. (2018). Hybrid optimizers to solve a tri-level programming model for a tire closed-loop supply chain network design problem. *Applied Soft Computing Journal*, 70, 701–722. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.06.021>
- Feitó-Cespón, M., Sarache, W., Piedra-Jimenez, F., & Cespón-Castro, R. (2017). Redesign of a sustainable reverse supply chain under uncertainty A case study. *Journal of Cleaner Production*, 151, 206–217. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.057>
- Fleischmann, M., Beullens, P., Bloemhof-Ruwaard, J. M., & Wassenhove, L. N. Van. (2001).

The impact of product recovery on logistics network design. *Production and Operations Management*, 10, 156–173.

- Govindan, K., Fattahi, M., & Keyvanshokoh, E. (2017). Supply chain network design under uncertainty: A comprehensive review and future research directions. *European Journal of Operational Research*, 263(1), 108–141. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.04.009>
- Govindan, K., Popiuc, M. N., & Diabat, A. (2013). Overview of coordination contracts within forward and reverse supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 47, 319–334. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.02.001>
- Govindan, K., Soleimani, H., & Kannan, D. (2015). Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research*, 240(3), 603–626. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.012>
- Gu, Q., & Gao, T. (2017). IERs in reverse supply chain: Be worth lowering or not. *Computers and Industrial Engineering*, 111, 289–302. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.07.033>
- Guide, Jr, V. D. R., & Van Wassenhove, L. N. (2002). The Reverse Supply Chain. *Harvard Business Review*. Retrieved from <https://hbr.org/2002/02/the-reverse-supply-chain>
- Habibi, M. K. K., Battaia, O., Cung, V. D., & Dolgui, A. (2017). Collection-disassembly problem in reverse supply chain. *International Journal of Production Economics*, 183, 334–344. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.06.025>
- Hatefi, S. M., & Jolai, F. (2014). Robust and reliable forward-reverse logistics network design under demand uncertainty and facility disruptions. *Applied Mathematical Modelling*, 38(9–10), 2630–2647. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.11.002>
- Heydari, J., Govindan, K., & Jafari, A. (2017). Reverse and closed loop supply chain coordination by considering government role. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 52, 379–398. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.03.008>
- Kannan, D., Diabat, A., Alrefaei, M., Govindan, K., & Yong, G. (2012). A carbon footprint based reverse logistics network design model. *Resources, Conservation and Recycling*, 67, 75–79. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.03.005>
- Kannan, G., Noorul Haq, A., & Devika, M. (2009). Analysis of closed loop supply chain using genetic algorithm and particle swarm optimisation. *International Journal of Production Research*, 47(5), 1175–1200. <https://doi.org/10.1080/00207540701543585>
- Khor, K. S., & Udin, Z. M. (2012). Impact of Reverse Logistics Product Disposition towards Business Performance in Malaysian E&E Companies. *Journal of Supply Chain and Customer Relationship Management*, 2012, 1–19. <https://doi.org/10.5171/2012.699469>
- Krystofik, M., Wagner, J., & Gaustad, G. (2015). Leveraging intellectual property rights to encourage green product design and remanufacturing for sustainable waste management. *Resources, Conservation and Recycling*, 97, 44–54. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.02.005>

- Kurk, F., & Eagan, P. (2008). The value of adding design-for-the-environment to pollution prevention assistance options. *Journal of Cleaner Production*, 16(6), 722–726. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2007.02.022>
- Lambert, S., Riopel, D., & Abdul-Kader, W. (2011). A reverse logistics decisions conceptual framework. *Computers and Industrial Engineering*, 61(3), 561–581. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.04.012>
- Leigh, M., & Li, X. (2015). Industrial ecology, industrial symbiosis and supply chain environmental sustainability: A case study of a large UK distributor. *Journal of Cleaner Production*, 106, 632–643. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.022>
- Ma, H., & Li, X. (2017). Closed-loop supply chain network design for hazardous products with uncertain demands and returns. *Applied Soft Computing Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.10.027>
- MA, R., YAO, L., JIN, M., REN, P., & LV, Z. (2016). Robust environmental closed-loop supply chain design under uncertainty. *Chaos, Solitons and Fractals*, 89, 195–202. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2015.10.028>
- McGovern, S. M., & Gupta, S. M. (2011). *The Disassembly Line: Balancing and Modeling* (1st ed.). McGraw-Hill.
- Moghaddam, K. S. (2015). Fuzzy multi-objective model for supplier selection and order allocation in reverse logistics systems under supply and demand uncertainty. *Expert Systems with Applications*, 42(15–16), 6237–6254. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.02.010>
- Ortegon, K., Nies, L. F., & Sutherland, J. W. (2013). Preparing for end of service life of wind turbines. *Journal of Cleaner Production*, 39, 191–199. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.022>
- Pedram, A., Yusoff, N. Bin, Udoney, O. E., Mahat, A. B., Pedram, P., & Babalola, A. (2017). Integrated forward and reverse supply chain: A tire case study. *Waste Management*, 60, 460–470. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.029>
- Pereira, M. M., Machado, R. L., Ignacio Pires, S. R., Pereira Dantas, M. J., Zaluski, P. R., & Frazzon, E. M. (2018). Forecasting scrap tires returns in closed-loop supply chains in Brazil. *Journal of Cleaner Production*, 188, 741–750. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.026>
- Prahinski, C., & Kocabasoglu, C. (2006). Empirical research opportunities in reverse supply chains. *Omega*, 34(6), 519–532. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2005.01.003>
- Radhi, M. (2012). Impact of Quality Grading and Uncertainty on Recovery Behaviour in a Remanufacturing Environment, 1–93.
- Rahman, S., & Subramanian, N. (2012). Factors for implementing end-of-life computer recycling operations in reverse supply chains. *International Journal of Production Economics*, 140(1), 239–248. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.07.019>

- Roger, D., & Tibben-Lembke, R. (1998). Going Backwards : Reverse Logistics Trends and Practices Going Backwards : Reverse Logistics Trends and Practices. *Reverse Logistics Executive Council Press*, 2. <https://doi.org/10.1006/jema.2001.0488>
- Rogers, D. S., Rogers, Z. S., & Lembke, R. (2010). Creating value through product stewardship and take- back. *Sustainability Accounting, Management and Policy Journal*, 1(2), 133–160. <https://doi.org/10.1108/20408021011089211>
- Ruibal Handabaka, A. (1994). *Gestión logística de la distribución física internacional*. Barcelona.
- Sarache Castro, W. A., & Morales Chávez, M. M. (2016). *Localización, transporte e inventarios. Tres decisiones estructurales en el diseño de cadenas de abastecimiento*. Universidad Nacional de Colombia.
- Sasikumar, P., & Kannan, G. (2008). Issues in reverse supply chains, part I: End-of-life product recovery and inventory management - an overview. *International Journal of Sustainable Engineering*, 1(3), 154–172. <https://doi.org/10.1080/19397030802433860>
- Sasikumar, P., Kannan, G., & Haq, A. N. (2010). A multi-echelon reverse logistics network design for product recovery-a case of truck tire remanufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49(9–12), 1223–1234. <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2470-4>
- Sellitto, M. A. (2018). Reverse logistics activities in three companies of the process industry. *Journal of Cleaner Production*, 187, 923–931. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.262>
- Sellitto, M. A., Luchese, J., Bauer, J. M., Saueressig, G. G., & Viegas, C. V. (2017). Ecodesign Practices in a Furniture Industrial Cluster of Southern Brazil: From Incipient Practices to Improvement. *Journal of Environmental Assessment Policy and Management*, 19(1), 1750001. <https://doi.org/10.1142/S1464333217500016>
- Seuring, S. (2013). A review of modeling approaches for sustainable supply chain management. *Decision Support Systems*, 54(4), 1513–1520. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2012.05.053>
- Shaharudin, M. R., Govindan, K., Zailani, S., Tan, K. C., & Iranmanesh, M. (2017). Product return management: Linking product returns, closed-loop supply chain activities and the effectiveness of the reverse supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 149, 1144–1156. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.133>
- Shih, L. H. (2001). Reverse logistics system planning for recycling electrical appliances and computers in Taiwan. *Resources, Conservation and Recycling*, 32(1), 55–72. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(00\)00098-7](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(00)00098-7)
- Simic, V., & Dabic-Ostojic, S. (2018). Interval-parameter chance-constrained programming model for uncertainty-based decision making in tire retreading industry. *Journal of Cleaner Production*, 167, 1490–1498. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.122>
- Soleimani, H., & Govindan, K. (2014). Reverse logistics network design and planning utilizing conditional value at risk. *European Journal of Operational Research*, 237(2), 487–497.

<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.02.030>

- Srivastava, S. K. (2008). Network design for reverse logistics. *Omega*, 36(4), 535–548.  
<https://doi.org/10.1016/j.omega.2006.11.012>
- Subulan, K., Taşan, A. S., & Baykasoğlu, A. (2015). *Designing an environmentally conscious tire closed-loop supply chain network with multiple recovery options using interactive fuzzy goal programming*. *Applied Mathematical Modelling* (Vol. 39).  
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2014.11.004>
- Thierry, M., Salomon, M., Van Nunen, J., & Van Wassenhove, L. (1995). Strategic Issues in Product Recovery Management. *California Management Review*, 37(2), 114–136.  
<https://doi.org/10.2307/41165792>
- Trochu, J., Chaabane, A., & Ouhimmou, M. (2018). Reverse logistics network redesign under uncertainty for wood waste in the CRD industry. *Resources, Conservation and Recycling*, 128(July 2017), 32–47. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.011>
- Tsoufias, G. T., & Pappis, C. P. (2006). Environmental principles applicable to supply chains design and operation. *Journal of Cleaner Production*, 14(18), 1593–1602.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2005.05.021>
- Tsoufias, G. T., Pappis, C. P., & Minner, S. (2002). An environmental analysis of the reverse supply chain of SLI batteries. *Resources, Conservation and Recycling*, 36(2), 135–154.  
[https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(02\)00016-2](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(02)00016-2)
- Uruburu, Á., Ponce-Cueto, E., Cobo-Benita, J. R., & Ordieres-Meré, J. (2013). The new challenges of end-of-life tyres management systems: A Spanish case study. *Waste Management*, 33(3), 679–688. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.09.006>
- Viet, N. Q., Behdani, B., & Bloemhof, J. (2018). The value of information in supply chain decisions : A review of the literature and research agenda. *Computers & Industrial Engineering*, 120, 68–82. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.04.034>
- Vitasek, K. (2013). Supply chain management: Terms and Glossary. *Healthcare Informatics : The Business Magazine for Information and Communication Systems*, 17(2), 58–60.  
<https://doi.org/10.1201/9781420025705.ch2>
- Wiengarten, F., Pagell, M., & Fynes, B. (2013). ISO 14000 certification and investments in environmental supply chain management practices: Identifying differences in motivation and adoption levels between Western European and North American companies. *Journal of Cleaner Production*, 56, 18–28. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.01.021>
- Xu, Z., Elomri, A., Pokharel, S., Zhang, Q., Ming, X. G., & Liu, W. (2017). Global reverse supply chain design for solid waste recycling under uncertainties and carbon emission constraint. *Waste Management*, 64, 358–370. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.02.024>
- Zeballos, L. J., Méndez, C. A., Barbosa-Povoa, A. P., & Novais, A. Q. (2014). Multi-period design and planning of closed-loop supply chains with uncertain supply and demand. *Computers and Chemical Engineering*, 66, 151–164.

<https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2014.02.027>

Zhou, W., & Piramuthu, S. (2013). Remanufacturing with RFID item-level information: Optimization, waste reduction and quality improvement. *International Journal of Production Economics*, 145(2), 647–657. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.05.019>