

Simulación de la tasa de reciclaje de productos electrónicos

Un modelo de dinámica de sistemas para la red de logística inversa¹

Fecha de recepción: 12.06.2012

Fecha de aceptación: 18.09.2012

Pilar Arroyo López
Tecnológico de Monterrey,
campus Toluca
pilar.arroyo@itesm.mx

Mariana Villanueva Bringas
Tecnológico de Monterrey,
campus Toluca
mariana.villanueva@gmail.com

Juan Gaytán Iniestra
Tecnológico de Monterrey,
campus Toluca
jgaytan@itesm.mx

Marco García Vargas
Tecnológico de Monterrey,
campus Toluca
dasae.v.garcia@invitados.
itesm.mx

Resumen

Debido a las tendencias actuales en cuanto al desarrollo e innovación de las tecnologías de la información, el ciclo de vida de los equipos electrónicos se ha reducido considerablemente, lo que ha resultado en la generación de grandes volúmenes de residuos (*e-waste*) que pueden provocar serios problemas ambientales debido a la toxicidad de algunos de sus componentes. Esta problemática ha atraído la atención de gobiernos, empresas y consumidores que buscan diseñar estrategias para el control y disposición adecuada de estos residuos en un esfuerzo para proteger el medio ambiente. En este trabajo se hace uso de la metodología de la dinámica de sistemas para simular cómo la tasa de productos retornados por los individuos y la cantidad de computadoras recuperadas en una cadena de logística inversa de lazo abierto varía bajo distintos escenarios. Los escenarios simulados corresponden a las posibles combinaciones de cinco macrofactores: tasa de innovación y ciclo de vida de los productos; información disponible al consumidor sobre reciclaje; legislación sobre *e-waste*; esquemas; y publicidad para la recuperación del *e-waste*. Los resultados de la simulación resultan relevantes para identificar sobre cuáles de los macrofactores se podría intervenir para incrementar el volumen de computadoras recicladas, ya que esta cantidad es relevante para reducir el volumen de este tipo de *e-waste*, y para hacer del reciclaje una actividad rentable y, por tanto, atractiva para las empresas.

Palabras clave: dinámica de sistemas, logística reversa, reciclaje, residuos electrónicos.

Simulation of the recycling rate of electronic products. A system dynamics model for a reverse logistics network

Abstract

Current trends in the development and innovation of information technologies and shorter life cycles of electronic products have resulted in the generation of large amounts of waste (e-waste) which can potentially cause environmental problems due to the toxicity of some of their components. The e-waste problematic has attracted the attention of governments, companies and consumers that look to identify strategies for the management and proper disposal of e-waste with the goal to protect the environment. This work uses the methodology of system dynamics to simulate how the rate of products returned by individuals and the amount of computers recovered in an open-loop reverse supply chain, varies under different scenarios. The simulated scenarios correspond to the possible combinations of five macro factors: rate of innovation and product life cycle, information available to consumers about e-waste recycling, legislation, e-waste programs structure along with diffusion and publicity efforts. The results of the simulation are relevant to identify over which factors it is convenient to intervene to increase the amount of recycled computers because this amount represents a reduction in the volume of e-waste and an enterprise opportunity to generate earnings from recycling computers.

Keywords: System dynamics, reverse logistics, recycling, e-waste.

Introducción

La globalización ha incrementado la demanda de equipos electrónicos; ello provoca que las compañías del sector adopten estrategias cada vez más agresivas en cuanto a innovación de productos, en especial aquellos relacionados con las tecnologías de la información. Lo anterior ha resultado en ciclos de vida cada vez más cortos para los productos electrónicos y en consecuencia en un aumento notable en el volumen de desechos de estos productos. La basura electrónica o *e-waste* es una de las varias categorías de desechos de equipo electrónico y eléctrico (Waste Electrical and Electronic Equipment, WEEE, por sus siglas en inglés) que incluye varios productos que tienen componentes reciclables entre los que destacan metales ferrosos y no-ferrosos, vidrio y plásticos (Wath *et al.*, 2011).

¹ Los autores desean expresar su agradecimiento al ingeniero Álvaro Núñez Solís, director de Recicla Electrónicos México por su invaluable apoyo para la formulación y validación del modelo de dinámica de sistemas en que se fundamenta esta investigación.

Los países industrializados, en especial aquellos de la Unión Europea, han mostrado preocupación por la cantidad alarmante de *e-waste*, lo que ha dado lugar al surgimiento de regulaciones ambientales como la Directiva WEEE en Europa (EU, 2002) que incrementa la presión sobre las empresas manufactureras para que incluyan entre sus actividades la recuperación, re-manufactura y reciclaje de un porcentaje significativo de los componentes de los productos que fabrican y que han sido desechados por el consumidor. La recuperación de valor de estos productos incluye opciones que van desde la reparación o re-manufactura del producto, para recolocarlo en el mercado, hasta el reciclaje de sus componentes para usarlos en otros procesos productivos (Thierry *et al.*, 1995).

A pesar de la creciente atención internacional sobre el tema de residuos electrónicos, México aún no cuenta con un plan o una legislación específica para el manejo de estos residuos, pues dentro del plan integral de la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat, 2009) no resulta claro si deben considerarse residuos peligrosos o de manejo especial. En este sentido es importante remarcar que los desechos electrónicos contienen algunos componentes potencialmente peligrosos —por ejemplo, el cloruro de polivinilo y metales pesados como el plomo, cromo y cadmio— que pueden causar daños importantes al ambiente y a la salud cuando no se manipulan y reciclan adecuadamente (Terazono *et al.*, 2006). Aparte del tema tecnológico relacionado con el tratamiento y re-proceso de la basura electrónica, las necesidades de investigación en materia de administración de los flujos de desechos electrónicos y de la recuperación de valor a partir de ellos incluye los siguientes temas: cómo recobrar los productos del usuario final, cómo moverlos a los centros de clasificación y re-trabajo, cómo desensamblar de manera segura y eficiente los productos, cómo re-trabajar el producto (reparación, re-manufactura, reciclaje o eliminación) para generar el mayor valor posible y cómo recolocar los productos re-procesados en el mercado (Fernández, Kalcsics, Nickel y Ríos-Mercado, 2010; Srivastava, 2008b; Guide, Harrison y Wassenhove, 2003).

Descripción del problema

Entre los equipos electrónicos de mayor consumo en el mercado mexicano están los dispositivos móviles de comunicación, las computadoras personales y los televisores. De acuerdo con información de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT, 2009), el número de suscriptores a los servicios de telefonía móvil en el 2009 fue de 83.5 millones y se espera que para el 2013 el 98% de la población económicamente activa en México cuente con un dispositivo de comunicación

móvil (BMI, 2009). Por su parte, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2010) reporta que el 29.9% de los hogares mexicanos cuentan con una computadora y 94% con al menos un televisor que es potencialmente reemplazable por uno digital. Esta gran disponibilidad y accesibilidad de productos electrónicos novedosos ha resultado en un problema creciente en cuanto a la recolección y disposición de productos que reemplaza al consumidor.

La cantidad de residuos electrónicos —se incluyen básicamente televisores, computadoras, teléfonos móviles y aparatos de sonido— estimada para México está entre 150 000 a 250 000 toneladas por año según los reportes del Instituto Politécnico Nacional y la Semarnat (Román-Moguel, 2007; Semarnat, 2009), pronosticándose además un crecimiento casi exponencial para estos residuos en los próximos años. Ante esta situación, el interés por el conjunto de actividades que tienen lugar después de que un producto ha terminado su ciclo de vida útil va en incremento; dichas actividades se han consolidado en los conceptos de cadena de suministros inversa o reversa (el término en inglés es *Reverse Supply Chain* o RSC) y administración de la cadena de suministros “verde”, los cuales integran al concepto de administración de la cadena con el tema de cuidado del ambiente (Stock, 1992; Srivastava, 2006).

Las decisiones para la logística de una cadena de suministro reversa son diferentes a la logística en una cadena tradicional. En una red logística tradicional, el objetivo principal es hacer llegar los productos desde el fabricante hasta los consumidores a través de una red que incluye vías de transporte, centros de distribución, almacenes y puntos de venta cuya ubicación y capacidad se determina con base en la demanda esperada. En contraste, en una red de logística inversa se pretende recuperar los productos que terminaron su vida útil de manos de los consumidores finales, quienes los pueden desechar en cualquier momento y en distintas condiciones de funcionalidad.

Aun cuando hay actividades comunes entre la logística tradicional y la reversa, las actividades de esta última pueden variar en complejidad e importancia dependiendo del contexto; por ejemplo, cuantificar la demanda de productos re-manufacturados o fabricados con componentes reciclados puede ser más complicado en el caso de países como México en donde parte de las compras se realizan en mercados informales debido a que las actividades básicas de la cadena de suministro inversa —recuperación, logística reversa, clasificación, re-manufactura y re-comercialización— no están bien definidas o bien quedan fuera del control de la empresa de

manufactura, como es el caso del retorno de productos que queda en manos del consumidor. Por tanto, es necesario desarrollar modelos que permitan comprender cómo las empresas pueden realizar tales actividades de forma más eficiente para así generar valor económico a partir de los productos retornados. Varios autores han aportado modelos para el diseño de cadenas de suministro de lazo cerrado; esto es, cadenas en las cuales la misma empresa manufacturera se hace cargo tanto de la logística directa como inversa (Thierry *et al.*, 1995; Krikke, 2001; Schultmann *et al.*, 2003; Spengler y Schröter, 2003; Fleischmann *et al.* 2004). Por su parte, Dekker *et al.* (2004) describen varios de los modelos cuantitativos utilizados para mejorar en particular lo referente a la logística inversa, en tanto Guide y Wasenhove (2009) instan a la academia para elaborar modelos más integradores en los que se vinculen diferentes disciplinas y que ofrezcan soluciones prácticas para la administración de la cadena de suministros inversa.

Objetivos de investigación

La determinación de la tasa de retornos es un elemento crítico para el diseño de una cadena de logística inversa porque de ella dependen decisiones estratégicas, como la planeación de la capacidad para re-trabajar los retornos; decisiones tácticas, como el abasto de componentes reciclados que se puede cubrir; y decisiones operativas, como la planeación de las actividades de re-trabajo (Totkay *et al.*, 2003). Además de su importancia para la toma de decisiones en la cadena inversa, la estimación de la tasa de retornos es un tema de investigación interesante debido también a la complejidad de estimarla únicamente con datos estadísticos históricos y a que su magnitud es altamente dependiente del contexto (Fleischmann *et al.*, 2004). Con base en lo anterior, el presente trabajo propuso los siguientes objetivos:

1. Construir un modelo de dinámica de sistemas a partir del cual se estime, para el caso de México, el volumen de computadoras que se recuperan para reciclarse adecuadamente. Se eligió este tipo de producto por ser uno de alta demanda (y desecho subsecuente), con un ciclo de vida muy corto —de acuerdo con Guide *et al.* (2006) las computadoras pierden un 1% de su valor por semana—, que contiene varios componentes potencialmente peligrosos cuando no se manejan adecuadamente, pero también componentes valiosos de los cuales se recupera menos de la mitad (Guide *et al.*, 2006).
2. Comprender la influencia que cinco macrofactores (información sobre la problemática ambiental, actitud de los individuos hacia el reciclaje

de *e-waste*, publicidad para los programas de recuperación de *e-waste*, legislación que obligue a la recuperación de computadoras al final de su ciclo de vida y facilitadores del reciclaje) sobre tres variables críticas asociadas al desempeño de una red de logística inversa de lazo abierto; esto con el propósito de identificar factores críticos sobre los que se pueda incidir para incrementar la tasa de retornos.

Las variables de desempeño consideradas en esta investigación fueron el porcentaje de participación ciudadana —medido como el porcentaje de individuos que retornan computadoras que ya completaron su vida útil—, el volumen total de computadoras que se recupera para ingresar a un proceso de reciclaje autorizado y las utilidades que generan empresas recicladoras formales. Esta última variable resulta crítica, puesto que ninguna empresa, ya sea de manufactura o dedicada al reciclaje, recuperará y re-procesará productos motivada únicamente por atender la problemática ambiental. Si la legislación obliga al fabricante a involucrarse en actividades de logística reversa, la empresa buscará minimizar el costo asociado o bien transferirlo al consumidor, mientras que las empresas dedicadas al reciclaje buscarán derivar utilidades del proceso mediante la recuperación de valor económico de los productos recuperados. Así, para garantizar la operación de una red de logística inversa es necesario visualizarla como un negocio sostenible tanto desde la perspectiva ecológica como de rentabilidad.

El tema de recuperación del valor (*Value Recovery* o VR, por sus siglas en inglés) de productos retornados está apenas ganando interés entre las empresas porque les permite reducir costos de producción mediante la sustitución de materiales nuevos por componentes recobrados, incrementar su rentabilidad, atender a sus políticas de responsabilidad ambiental, cumplir con la legislación —sobre todo en el caso de Europa— y fortalecer la imagen empresarial para así reducir la presión competitiva (Kapetanopoulou y Tagaras, 2011). El VR se define como una actividad administrativa organizada para recobrar el mayor valor económico posible de productos al final de su ciclo vida (Srivastava, 2008b). Pero a menos que el volumen de productos retornados con calidad y a un precio razonable sea lo suficientemente grande y los procesos de re-trabajo y re-comercialización de los bienes recuperados sean eficientes las empresas no obtendrán valor económico de la administración de retornos, por lo que únicamente cumplirán con la legislación ambiental, dejando en manos de un sector no-organizado de recolectores la responsabilidad principal en cuanto a recuperación y reciclaje del *e-waste* (Srivastava, 2008b). Evitar el reciclaje informal es crítico en el diseño de estrategias para la reducción de este tipo

de desechos dado que la recuperación de materiales que hacen los recolectores informales no cumple con las normas ambientales, lo que representa tanto un riesgo para la salud de las personas encargadas del reciclaje como un riesgo ambiental.

El resto del artículo está organizado de la siguiente manera: a continuación se presenta una revisión de los métodos que se han propuesto para estimar la tasa de retorno con particular énfasis en el uso de la metodología de dinámica de sistemas; posteriormente, se describe el modelo de dinámica de sistemas formulado para este proyecto, así como la información utilizada para construirlo; después, se muestran los resultados de una simulación realizada para validar el modelo desarrollado e identificar aquellos factores que inciden más sobre la tasa de recuperación de computadoras; por último, se presentan las conclusiones y recomendaciones derivadas de esta investigación.

Revisión de la literatura

Los retornos de productos se asocian a diferentes razones: retornos al distribuidor por fallas en el producto durante su tiempo de garantía; retornos de productos funcionales, pero obsoletos que son reemplazados por nuevas tecnologías; y retornos de productos al final de su ciclo de vida, los cuales ya no son funcionales debido a descomposturas o porque su valor tecnológico para el usuario se ha agotado. Para este último tipo de productos la recuperación de sus partes y el reciclaje resultan ser las alternativas viables para recobrar algo de su valor, mientras que la disposición es la última opción. La experiencia indica que más que el desensamble y recuperación eficiente de componentes de aquellos productos que terminaron su ciclo vida, los obstáculos principales para un reciclaje efectivo son el acceso a una cantidad suficiente de productos usados y la falta de un mercado que absorba los componentes recuperados (Guide y Van Wassenhove, 2009). La disponibilidad de una buena cantidad de retornos es importante para apoyar decisiones estratégicas tales como la planeación de la capacidad requerida para el re-trabajo de materiales y la cantidad de materiales reciclados que es posible surtir; asimismo, garantizar el acceso a una buena cantidad de productos retornados es también relevante para lograr economías de escala y balancear la producción. Debido a todas estas razones y a la alta incertidumbre de cuándo retornarán los consumidores los productos ya no útiles, la estimación de la tasa de recuperación de productos resulta un problema de interés dentro del contexto de la cadena de suministro inversa (Fleischmann *et al.*, 2004).

Existen en la literatura diversas propuestas para estimar los volúmenes de los retornos de productos electrónicos. Uno de los enfoques básicos consiste en calcular los volúmenes de retorno o desechos a partir de los datos disponibles sobre niveles de producción, ventas de equipos electrónicos y las tasas de retorno de los productos bajo distintos escenarios (Lohse *et al.*, 1998). Linton *et al.* (2004) consideran que estos pronósticos son muy simplistas y subestiman considerablemente la verdadera cantidad de desechos para bienes durables como los electrónicos y electrodomésticos, además de que su aplicación está supeditada a la disponibilidad de datos históricos confiables. En el caso de México y de otros países en vías de desarrollo, esta información puede contener grandes errores debido a las siguientes razones: 1) muchos de los productos son reconstruidos y se adquieren en el mercado informal, 2) la tasa de re-uso de los productos electrónicos es muy alta, por lo que se alarga el ciclo de vida de los productos y 3) un alto porcentaje de los equipos electrónicos inservibles son recuperados y desmantelados por pequeños recolectores. Cabe aclarar que un problema con estos recolectores es que no cuentan con las capacidades para extraer y reciclar apropiadamente un alto porcentaje de los componentes de los productos electrónicos (Román-Moguel, 2007), por lo cual un gran volumen de residuos se desecha sin control dificultando cuantificar el volumen de WEEE que se recupera.

Varios estudios han abordado el problema de cómo mejorar los pronósticos para el volumen de productos electrónicos de alto consumo (Toktay, van der Laan y de Brito, 2003). Streicher *et al.* (2007) utilizan un modelo dinámico de flujo de materiales (*Material Flow* o modelo MF, por sus siglas en inglés) para estimar el volumen de computadoras personales (PC) que se reciclan en India con el propósito de recuperar metales valiosos. Este análisis es una opción para describir y comprender el flujo de materiales en el proceso de consumo, reemplazo, eliminación y reciclaje de PC cuando no se cuenta con datos precisos sobre las ventas, ciclos de vida y volúmenes de recuperación para estos productos. El modelo asume que los recicladores empiezan a procesar los productos una vez que se rebasa cierto límite de valor o se logra cierta ganancia, la cual depende de si el reciclador opera de manera formal o informal.

Linton, Yeomans y Yoogalingam (2004) modelan los flujos de retorno para tubos de rayos catódicos (*Cathode Ray Tube* o CRT, por sus siglas en inglés) de televisores como una función de la tasa de productos que fallan, de la probabilidad de que un producto se vuelva obsoleto, de la probabilidad de que un producto tenga que ser reparado, de la probabilidad de que un producto obsoleto sea re-utilizado y

de la probabilidad de que un producto obsoleto se almacene a partir del tiempo t . Las variables tiempo de vida de un televisor, tiempo que se almacena después de que se descompone, la proporción de televisores que se retornan para su reciclaje y las ventas futuras de televisores que utilizan CRT, se trataron como variables aleatorias, utilizándose simulación Montecarlo para generar estimados de los flujos de desecho. Por su parte, Canning (2006) analiza la influencia que distintos actores —gobierno, organizaciones ambientalistas no-gubernamentales, autoridades legislativas y asociaciones empresariales— tienen sobre la tasa de retorno de celulares en el Reino Unido (UK). Si bien se concluye que la legislación sobre WEEE que hace responsables a los fabricantes de la recuperación y re-uso/reciclaje de sus productos influye sobre la recuperación de celulares, también se establece que la resistencia de las empresas manufactureras puede frenar la efectividad de la legislación. Sin embargo, un mercado de consumidores sensible al cuidado del ambiente puede obligar a los fabricantes a revisar su estrategia de mercado para que mediante descuentos o incentivos económicos motiven al consumidor a retornar los productos ya no útiles. Este caso de recuperación de teléfonos móviles revela también la necesidad de agregar nuevos miembros a la cadena de suministros, los cuales son terceras partes que se puedan hacer cargo de las actividades de logística inversa, sobre todo en el caso de productos como los celulares que tienen un bajo valor como para que resulte atractivo que cada fabricante recupere y re-use/recicle sus propios productos.

Entre las metodologías que han demostrado su utilidad para el diseño de redes de logística inversa de lazo cerrado está la dinámica de sistemas. Esta metodología, cuya principal función es la de analizar la evolución de sistemas complejos y de gran escala a través del tiempo, resulta útil para analizar temas difíciles de entender dentro la administración de operaciones al emplear métodos más tradicionales y diseñar las operaciones de la empresa para hacerla más competitiva (Gröbler, Thun y Milling, 2008). La dinámica de sistemas (DS) se conceptualiza como una teoría estructural en el sentido de que proporciona un modelo de referencia para la estructura de las interdependencias que ocurren dentro de un sistema social. Los modelos de dinámica de sistemas resultan ser representaciones válidas para problemas reales que permiten observar y comprender un fenómeno complejo, por lo cual resultan ser en sí teorías sobre el contenido del sistema. Utilizar la dinámica de sistemas para abordar problemas de administración de operaciones, y en particular de administración de la cadena de suministro, se justifica porque la cadena de suministro —el sistema bajo análisis— es bastante complejo (múltiples variables, interrelaciones imprecisas y procesos de retroalimentación) y los modelos DS pro-

veen explicaciones razonables para las relaciones involucradas y los resultados de posibles intervenciones.

La construcción de un modelo de dinámica de sistemas consta de dos etapas principales: 1) una etapa cualitativa en la que se identifican las principales variables involucradas en el sistema bajo análisis, así como sus relaciones, que se representan en un diagrama causal donde se indica si son positivas (de reforzamiento) o negativas (búsqueda de metas); y 2) una segunda etapa cuantitativa en la que las relaciones causales identificadas se describen matemáticamente mediante ecuaciones explícitas o funciones tabulares sustentadas por datos empíricos. En general, no se originan soluciones analíticas para el sistema modelado, sino que se recurre a la simulación como forma de experimentación para observar su comportamiento; tanto el modelo de dinámica de sistemas como sus resultados se validan con datos del sistema real que se representa y/o el conocimiento de expertos en el área. En resumen, la principal ventaja de la dinámica de sistemas es que permite obtener un estimado más realista del comportamiento del sistema al incorporar en la modelación factores cualitativos como el juicio de los expertos, lo que implica usar una mayor cantidad de la información disponible.

Entre los trabajos de logística inversa que aplican la dinámica de sistemas está el de Spengler y Schröter (2003) quienes utilizan la metodología para evaluar la conveniencia de implementar una cadena de suministros cerrada para productos eléctricos que están al final de su ciclo de vida. Los componentes de los productos desechados se recuperan para re-utilizarse como refacciones, lo que evita que el fabricante tenga que producir y almacenar componentes para productos que pronto saldrán del mercado. El número de productos primarios vendidos es la entrada exógena básica para el sistema, el cual modela el ciclo de vida del producto para determinar la demanda de refacciones y de productos primarios que se retornan. También se modela el proceso de recolección y reciclado de las refacciones para realizar un análisis económico y así determinar los costos del abasto a través de la recuperación de componentes, los cuales favorecen la implementación de esta estrategia sobre la de producción.

Georgiadis y Vlachos (2003, 2004, 2006) utilizan la dinámica de sistemas para analizar el impacto de la interacción de diversos factores involucrados en una cadena logística de lazo cerrado. Los factores del ambiente considerados por estos autores son las políticas gubernamentales y el interés de empresas fabricantes por crear una imagen “verde”. Se asume que los materiales son suministrados por pro-

veedores externos y que parte de éstos son materiales nuevos y otra parte viene de productos recuperados. Al final de su ciclo de vida, los productos son desechados sin control o bien recolectados para su re-uso o eliminación controlada según su condición. Las políticas de protección al ambiente influyen sobre la tasa de recolección e indirectamente sobre la cantidad de productos desechados sin control, ya que esto se penaliza. Por otra parte, la imagen “verde” del fabricante incrementa la demanda a través de la opinión del mercado de consumidores con respecto a la empresa. Se concluye que el efecto que tiene el mercado en la recuperación de productos depende del tipo de producto y también de la conciencia ecológica de los consumidores. En otro trabajo, Georgiadis y Besiou (2010) analizan el mismo sistema de una cadena logística de lazo cerrado, pero desde un enfoque orientado a la sustentabilidad tanto ambiental como económica de las actividades de recuperación de bienes; concluyen que es necesaria una legislación en la que las responsabilidades del productor estén debidamente identificadas y que el uso de incentivos facilita la recuperación de productos ya no útiles.

Por su parte Srivastava y Srivastava (2006) utilizan la metodología de la dinámica de sistemas para incorporar diversos factores que afectan a la tasa de retorno y que debido a su naturaleza cualitativa o “blanda” no pueden estudiarse aplicando métodos cuantitativos o “duros”. En su modelo, los autores analizan el diseño de una red de logística inversa en la India para la recuperación de diversos productos eléctricos y electrónicos. En casos de este tipo, la dinámica de sistemas explicó razonablemente el comportamiento de los volúmenes esperados de retornos considerando diversos factores como la cercanía de los centros de recolección a las poblaciones, las tasas y costos de recolección, así como el reproceso de bienes.

Metodología

La primera fase de la metodología consistió en una revisión de la literatura con base en la cual se definieron los actores que integran el sistema de recuperación de computadoras al final de su ciclo de vida. La segunda parte de la metodología consistió en desarrollar la etapa cualitativa del modelo de dinámica de sistemas; en esta etapa se especificaron las variables, parámetros y relaciones existentes entre ellos, las cuales se expresaron mediante diagramas causales. Posteriormente, se trabajó la etapa cuantitativa del modelado de dinámica de sistemas; esta etapa requirió de la búsqueda de datos secundarios y de la obtención de datos primarios a través de una encuesta. El resultado de esta etapa cuantitativa fue un modelo de

flujos y niveles en el que las relaciones identificadas se expresaron mediante ecuaciones matemáticas sustentadas en los datos disponibles.

Construido el modelo, se procedió a validarlo fijando condiciones para un conjunto de cinco macrofactores que de acuerdo con la literatura influyen sobre la recuperación del *e-waste*. Los valores especificados para los macrofactores corresponden al contexto de reciclaje de basura electrónica en tres países: México, Grecia y Alemania; dada la situación en cada país, los contextos se pueden catalogar como pesimista, promedio y optimista en términos de volumen de *e-waste* recuperado y de los niveles de conciencia o sensibilidad ecológica de empresas y consumidores (OCDE, 2008; Kapetanopoulou y Tagaras, 2011). Una vez que se verificó que el modelo reproducía razonablemente las tasas de recuperación de *e-waste* en cada país, se procedió a la construcción de varios escenarios que correspondieron a distintas combinaciones de los macrofactores que determinan la tasa de recuperación.

La última fase de la metodología consistió en analizar estadísticamente los resultados generados por el modelo de dinámica de sistemas mediante un análisis de varianza (Anova). Siguiendo las recomendaciones estadísticas respecto al análisis de experimentos factoriales con cuatro o más factores (Montgomery, 2007) se estimaron tanto efectos principales como interacciones de primer orden o dos letras para así poder identificar cuáles de los macrofactores tienen una influencia significativa sobre la tasa de recuperación de computadoras al final de su ciclo de vida.

El modelo de dinámica de sistemas desarrollado en esta investigación describe una cadena logística reversa de lazo abierto de computadoras personales tanto de escritorio como portátiles de diversas marcas y modelos. Las actividades de recuperación y reciclaje de los equipos al final de su ciclo de vida son llevadas a cabo por una tercera parte y no por los fabricantes de los equipos. La subcontratación de actividades de logística reversa es una situación frecuente y la inspiración para este caso estuvo en las actividades que realiza la empresa Recicla Electrónicos México (REMSA) que cuenta con los permisos federales-estatales de Semarnat y el personal capacitado para recuperar, clasificar y reciclar residuos electrónicos. Esta tercera parte ha promovido más de 25 eventos de recuperación de *e-waste* (reciclones) en varios estados de la República Mexicana con el apoyo de organismos gubernamentales y no gubernamentales. Los artículos recuperados se trasladan a las instalaciones de la empresa en donde son desensamblados para reciclar más del 90% de sus componentes (REMSA, s.f.). La experiencia de los ejecutivos de REMSA resultó esencial para el desarrollo y validación del modelo de dinámica de sistemas.

Construcción del modelo de dinámica de sistemas

El concepto de desarrollo sustentable se refiere a mantener un crecimiento económico y un consumo que no comprometa la disponibilidad de recursos para atender las necesidades de generaciones futuras. Las acciones de tres actores son determinantes para lograr un desarrollo sustentable: los individuos, el gobierno y las empresas (Thøgersen, 2005). El modelo de dinámica de sistemas propuesto en este trabajo considera cómo las acciones de estos tres actores determinan la tasa de computadoras retornadas. Si bien los individuos son los consumidores de la mayor cantidad de recursos y de la producción de la mayoría de los residuos sólidos, la contribución aislada de un individuo no es suficiente para evitar el daño al ambiente ni tampoco es factible imponerle a las personas un cambio en su estilo de vida si no se le dan las condiciones para hacerlo. Autores como Thøgersen (2005) y Smallbone (2005) proponen lo siguiente: 1) informar mejor al consumidor sobre los beneficios de conductas ecológicas como el reciclaje para así mejorar sus actitudes y percepción sobre la autoeficacia de sus acciones y 2) crear las condiciones apropiadas para facilitar el despliegue de conductas pro-ambiente.

En cuanto a los otros dos actores, gobiernos y empresas, éstos tienen el poder para modificar las condiciones externas que limitan el retorno del *e-waste*. A través de acciones como la disponibilidad de centros de acopio, el uso de incentivos cuando el consumidor retorna productos obsoletos y una legislación que obligue a retornar los productos ya no útiles, es posible incrementar la cantidad de computadoras recuperadas. La existencia de un esquema de recolección para el *e-waste* que facilite al individuo el retorno de productos decrece el esfuerzo percibido de realizar la conducta, mientras que el uso de incentivos es un motivador de corto plazo para desplegar la conducta (Arroyo-López, 2012; Dahab, Gentry y Su, 1995). En cuanto a la legislación, ésta contribuye a que las empresas se preocupen por organizar sistemas de recuperación eficientes que les permitan cumplir con los requerimientos legales sin afectar sus utilidades, o bien a identificar terceras partes responsables que puedan realizar la recuperación y re-trabajo a un precio razonable (Guide *et al.*, 2003).

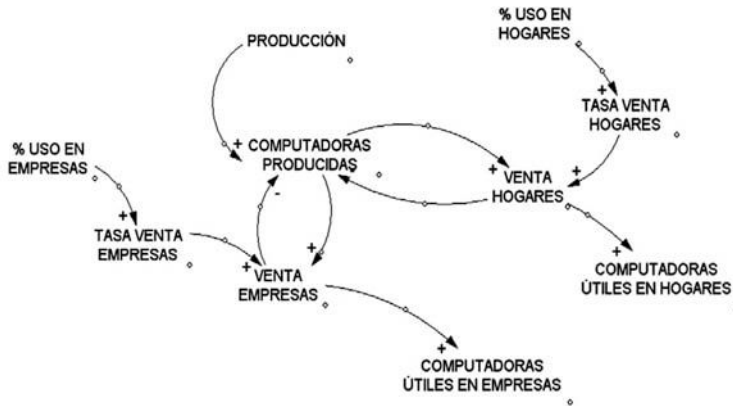
Descripción de los componentes del modelo de dinámica de sistemas

El modelo de dinámica de sistemas propuesto consta de cinco subsistemas principales que detallan el comportamiento de la cadena logística: en el primer subsistema se analiza el comportamiento de la cadena de distribución de computadoras de

escritorio y portátiles; en el segundo y tercer subsistema se describe la eliminación y remplazo de computadoras en hogares y empresas, incorporándose elementos como los periodos de vida útil de los equipos, sus tasas de obsolescencia y falla para así determinar el nivel de inventario de computadoras obsoletas y, por tanto, susceptibles de ser recuperadas, ya sea para obtener valor de sus materiales o disponer adecuadamente de ellas; el cuarto subsistema describe los factores que influyen en el comportamiento de los ciudadanos y los llevan a participar en programas y campañas de reciclaje de equipos electrónicos; finalmente, el quinto y último subsistema analiza las ganancias que derivan las empresas que hacen reciclaje atendiendo a las normas internacionales (recolectores formales). En este subsistema se asume que la actividad de los recolectores informales reduce la cantidad de equipos recuperados, lo que impacta negativamente a las ganancias de los recolectores formales, las cuales están en función de la cantidad de equipos que logran recuperar, el porcentaje de materiales recuperados y el valor de mercado de éstos. A continuación se describen cada uno de los subsistemas que conforman el modelo de dinámica de sistemas desarrollado.

El diagrama causal de la figura 1 muestra las variables y relaciones entre ellas que modelan el comportamiento hacia delante de la cadena de suministro de computadoras personales. La base teórica para este subsistema está en los modelos de difusión dinámica (Mahajan y Peterson, 1985) que se utilizan en mercadotecnia para describir la tasa de adopción de nuevos productos tomando en consideración que el número de compradores potenciales no es fijo, sino que se incrementa continuamente debido a la influencia de factores internos y externos. En el subsistema propuesto, el porcentaje de uso de computadoras tanto en hogares como en empresas en un periodo específico influye positivamente sobre la cantidad acumulada de consumidores que compran equipos de cómputo debido a los beneficios percibidos al adquirir más y/o mejores computadoras, las condiciones económicas de los consumidores, el apoyo gubernamental para difundir el uso de las computadoras en los hogares mexicanos y la publicidad que hacen los fabricantes. Esto a su vez ocasiona que las empresas aumenten sus volúmenes de producción para satisfacer la demanda del mercado. Esta parte del modelo es de gran importancia porque describe cómo los equipos nuevos se incorporan al sistema generando un incremento en la tasa de reemplazo de productos, lo que a su vez implica un mayor flujo de equipos electrónicos desechados.

Figura 1
Diagrama causal del subsistema de producción y venta de computadoras



Fuente: Villanueva-Bringas (2010)

El diagrama causal en la figura 2 muestra que las tasas de obsolescencia y falla de los equipos determina la cantidad de computadoras que se reemplazan y que potencialmente pueden recuperarse para reciclarse. En este subsistema, el pronóstico del flujo de computadoras potencialmente reciclables corresponde al volumen acumulado de computadoras vendidas en periodos anteriores que son descartadas por el consumidor en cierto momento porque ha terminado su vida útil, ya sea por falla u obsolescencia. Este método de pronóstico para los retornos, basado en las ventas históricas (tasa de ventas en el modelo de la figura 2) y en el estimado del tiempo que transcurre entre la compra y el retorno del producto por parte del consumidor, es una propuesta que se ha utilizado recurrentemente en el contexto de logística inversa; Toktay *et al.* (2003) proporcionan una revisión para esta estrategia de pronóstico. Como puede verse en el diagrama, la cantidad de computadoras recuperables de los hogares queda determinada por la tasa de falla y también por la tasa de obsolescencia, que se considera como mayor en el caso de México, donde una computadora es utilizada o almacenada aun tiempo después de volverse obsoleta, mientras que en países económicamente más desarrollados una computadora obsoleta se reemplaza más rápidamente (Román-Moguel, 2007). Esta declaración fue confirmada a partir de los datos de una encuesta realizada en la zona urbana de Toluca y cuyos detalles se describen más adelante.

Figura 2
Diagrama causal sobre el inventario potencial de
residuos electrónicos en hogares



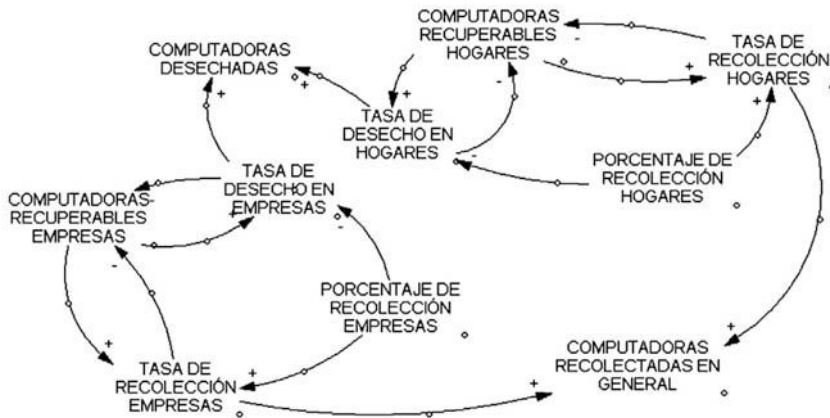
Fuente: Villanueva-Bringas (2010)

En el modelo de dinámica de sistemas se desarrolló un diagrama similar al de la figura 2 para determinar el comportamiento del inventario de computadoras potencialmente reciclables que mantienen las empresas, las cuales retornan este tipo de *e-waste*, ya sea para cumplir con sus políticas de responsabilidad social hacia el ambiente o bien porque hay una legislación vigente que las obliga a recuperar la basura electrónica derivada de los productos que fabricaron. La legislación sobre la responsabilidad empresarial para la recuperación y tratamiento de los desechos electrónicos tiene una influencia significativa sobre la cantidad de *e-waste* recuperada como lo demuestra la investigación realizada en el contexto europeo (Hopp, Barba-Gutiérrez y Adenso-Díaz, 2008), por lo cual se consideró relevante incluir este componente dentro del subsistema que determina la cantidad de computadoras potencialmente reciclables que son desechadas por las empresas.

Una vez determinado el flujo de computadoras potencialmente reciclables, fue necesario describir las dos opciones que tiene un equipo: 1) ser un equipo recolectado para su reciclaje, ya sea a través de la intervención de recolectores formales o informales, o 2) ser un equipo que se desecha en la basura doméstica y que podría ya ser reciclado informalmente o acumularse con otros residuos sólidos. El diagrama que describe estos mecanismos se muestra en la figura 3. Es importante notar que

una buena parte del volumen de equipos desechados en México es recuperada por recolectores informales cuyas actividades quedaron fuera del alcance del modelo desarrollado.

Figura 3
Diagrama causal para el cálculo de la tasa de desecho y el volumen de desperdicios electrónicos recolectados en empresas y hogares



Fuente: Villanueva-Bringas (2010)

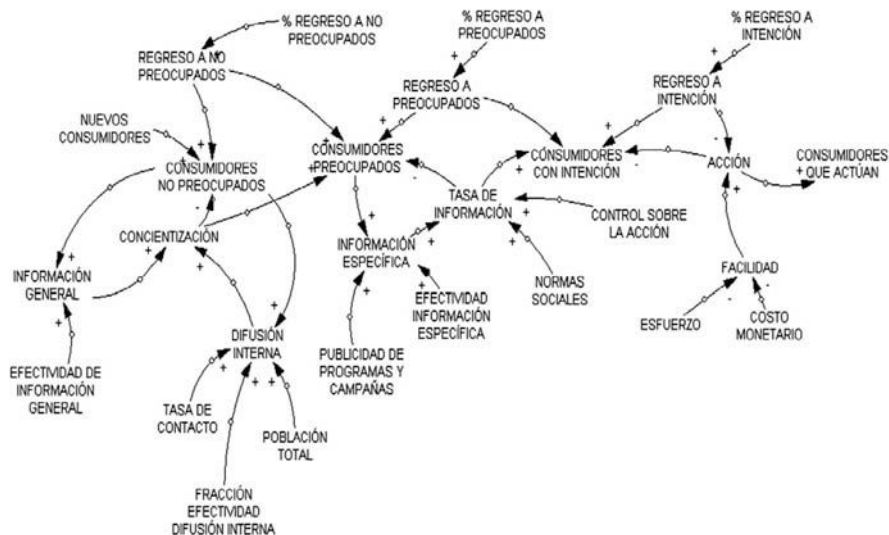
El diagrama que modela la conducta de los ciudadanos se muestra en la figura 4. En este diagrama se considera que la población no es homogénea: hay unos que no están siquiera preocupados por los problemas ambientales; otros preocupados por la problemática ambiental, pero que no actúan al respecto; algunos más con intención de participar en las campañas de recuperación de *e-waste*; y unos últimos que realmente participan en dichas campañas (Smallbone, 2005).

De acuerdo con teorías de psicología ambiental, la información general que tiene el individuo sobre la problemática ambiental lo lleva a desarrollar una conciencia ecológica que influye positivamente sobre sus conductas pro-ambiente; sin embargo, esta conciencia ecológica no resulta ser tan buen predictor de la conducta como una actitud favorable hacia acciones pro-ambiente específicas como el reciclaje (Do Valle *et al.*, 2005). La teoría de la conducta planeada (TCP) propuesta por Ajzen (1991) propone que las conductas intencional y manifiesta están determinadas por tres factores: 1) la actitud de los individuos que representa aquellos sentimientos y connotaciones afectivas a favor del reciclaje como resultado de saber en

qué consiste y qué beneficios representa (identificado en el modelo como información específica); 2) la norma social, que refiere a la influencia que tiene el grupo social (amigos, familia) sobre el individuo para que éste manifieste la conducta; y 3) el control percibido sobre la propia conducta. Aparte de estos elementos, cuya definición operacional en el contexto de México se puede consultar en el trabajo de Arroyo-López (2012), existen factores externos como la disponibilidad de sitios permanentes de acopio de *e-waste* y el costo de trasladarse a ellos que facilitan la conducta al decrecer el costo percibido por realizarla (Do Valle *et al.*, 2005).

El subsistema de la figura 4 describe como todos estos elementos se conjuntan para que los individuos conscientes de la problemática ambiental y deseosos de hacer algo al respecto, pero que no saben cómo, cuando son provistos con cierto nivel de información específica relevante, desarrollan una intención auténtica por reciclar. Si las condiciones del contexto son favorables, estos consumidores con intención finalmente concretan sus conductas de apoyo al reciclaje de *e-waste* participando en campañas de recuperación de estos residuos (Arroyo-López, 2012; Tobias *et al.*, 2009).

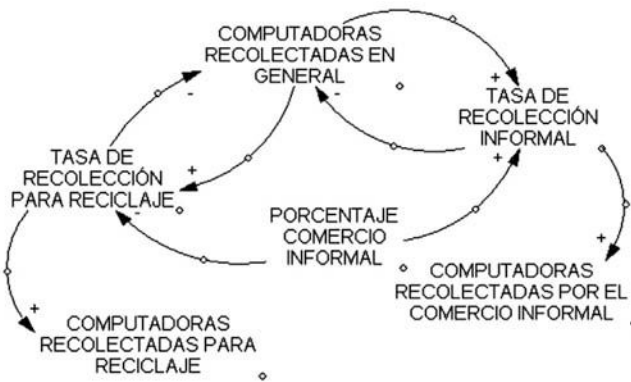
Figura 4
Diagrama causal de los factores que influyen en el comportamiento de los consumidores con respecto al reciclaje de productos electrónicos



Fuente: Villanueva-Bringas (2010)

Finalmente, el subsistema en la figura 5 considera que únicamente parte de los equipos desechados por consumidores y empresas son reciclados apropiadamente. Como se indicó previamente, la actividad de los recolectores informales reduce la cantidad de equipos recuperados e impacta negativamente a las ganancias de los recolectores formales. El modelo en la figura 5 describe las ganancias generadas por estos recolectores formales como una función de la cantidad de equipos que logran recuperar, el porcentaje de materiales recuperados y el valor de mercado de sus componentes (Kapetanopoulou y Tagaras, 2011). A partir de estos elementos, los cuales fueron aportados y revisados por la gerencia de REMSA, se calculan las ganancias potenciales derivadas del reciclaje para los recolectores formales.

Figura 5
Diagrama causal sobre el efecto de la recolección informal
en el desempeño del sistema de recolección



Fuente: Villanueva-Bringas (2010)

Definición de variables en el sistema y sus interrelaciones

Una vez construidos los diagramas causales, se procedió a la elaboración de un diagrama de flujos y niveles en el que las relaciones previamente identificadas se caracterizaron a través de ecuaciones que describen el componente dinámico del sistema. Por cuestiones de espacio, únicamente se describen algunas de las variables más importantes y ecuaciones que las relacionan en el modelo completo de dinámica de sistemas.

La ecuación (1) corresponde a la tasa de obsolescencia de las computadoras, la cual depende de la cantidad de computadoras útiles en el sistema y del promedio de su vida útil. Para definir estos valores se utilizaron datos secundarios sobre producción y demanda tanto actual como pronosticada (Business Monitor, 2009) así como datos primarios obtenidos de dos encuestas. La primera encuesta fue vía telefónica e incluyó a cien propietarios de computadoras, elegidos al azar de entre los residentes de la zona urbana de la ciudad de Toluca, Estado de México. La segunda encuesta fue personal, los participantes fueron 163 jefes de familia cuyos domicilios se eligieron mediante un muestreo por conglomerados en dos etapas en los municipios de Metepec y Toluca en el Estado de México. A partir de la información de estas encuestas se estimó que el tiempo de vida útil de un equipo de cómputo es de aproximadamente seis años y el tiempo que una computadora obsoleta o descompuesta se utiliza como respaldo o se almacena es de 2.5 años. La tasa de falla para las computadoras personales se calculó de manera similar a la de obsolescencia; empleando ambas tasas se determina la cantidad de equipos potencialmente reemplazables.

$$\text{Tasa de obsolescencia} = \frac{\text{Computadoras útiles}}{\text{Vida útil promedio}} \quad (1)$$

Únicamente una fracción del volumen total de equipos que potencialmente pueden ser recuperados ingresa realmente al sistema. Esto se debe a que cuando un equipo falla éste puede ser reparado, reemplazado por otro y recuperado para su reciclaje, o bien almacenado durante un cierto tiempo que varía de acuerdo con la idiosincrasia del consumidor. De igual manera, un equipo obsoleto no necesariamente es reemplazado, sino que puede ser usado en el hogar como respaldo del equipo nuevo. Debido a estos motivos, en el modelo se consideró que únicamente un pequeño porcentaje de los equipos que fallan o se vuelven obsoletos son realmente reemplazados según se describe en la ecuación (2). La fracción de equipos reemplazados por el consumidor se estableció en 6%; este porcentaje se propuso con base en la experiencia de los ejecutivos de REMSA y en la información de las encuestas realizadas en la zona urbana de Toluca, Estado de México.

$$\text{Reemplazo} = \text{Tasa de fallas} \times 6\% \times \frac{\text{Tasa de obsolescencia}}{6\%} \quad (2)$$

La ecuación (3) define la cantidad de consumidores con intención de participar en los programas de recolección y reciclaje de equipos electrónicos. Esta canti-

dad depende de la información específica a la que tiene acceso el consumidor con respecto al reciclaje de *e-waste* y también de la efectividad percibida respecto a su participación. Este último elemento implica que únicamente aquellos consumidores que perciben que su participación en programas o eventos de recuperación de *e-waste* contribuye de manera significativa a resolver el problema de contaminación por residuos electrónicos tienen la intención de apoyar el reciclaje (Arroyo-López, 2012). Por otra parte, la información con que cuenta el individuo también se propone que está influida por la norma social; esto es, las expectativas y presión del grupo social al que pertenece un individuo incrementan la información que tiene sobre cómo y qué beneficios resultan del reciclaje de *e-waste*, lo que contribuye a modificar su actitud y a desarrollar una intención para actuar (Do Valle *et al.*, 2005). Ecuaciones similares a la (3) se establecieron para determinar el número de consumidores preocupados por la problemática ambiental, pero que no actúan, y el número de consumidores que realmente participan retornando sus computadoras durante las campañas de recolección de *e-waste*.

$$\text{Consumidores con intención} \frac{t}{t_0} \text{ Tasa de información específica} \text{ acción} \text{ Regreso a intención} \text{ Regreso a no intención} \frac{ds}{ds} \text{ Consumidores con intención } t_0 \quad (3)$$

Con respecto a la participación de las empresas en programas de recolección de equipos electrónicos, la ecuación (4) considera tres factores que determinan esta participación: 1) la existencia de una ley para el control de desechos electrónicos que obligue a las empresas a implementar programas internos para la recolección de computadoras que posteriormente serán recicladas o desechadas por una tercera parte; 2) la importancia de proyectar una “imagen verde” hacia el mercado que fortalezca la posición competitiva de la empresa; y 3) la política de la empresa en cuanto a su responsabilidad con el medio ambiente (Pacheco-Ornelas y Meza-Juárez, 2012; Kapetanopoulou y Tagaras, 2011). La combinación de estos tres factores más una campaña de publicidad efectiva sobre los eventos en los que puede participar una empresa para retornar su *e-waste* determinan el porcentaje de computadoras desechadas por las empresas que realmente se recuperan. La influencia que tiene cada uno de los factores sobre la tasa de computadoras recuperadas en las empresas se definió nuevamente en términos de la experiencia de la gerencia de la empresa REMSA y la información secundaria disponible.

$$\text{Porcentaje de recolección en empresas} \text{ Legislación } 30\% \text{ Conveniencia } 40\% \text{ Responsabilidad social } 30\% \text{ Publicidad} \quad (4)$$

La lógica del modelo de dinámica de sistemas se verificó a partir de la propuesta de escenarios que describen situaciones extremas tales como fijar la tasa de producción de nuevos equipos en cero para verificar que después de un cierto tiempo la cantidad de equipos recuperados es de cero, ya que el inventario potencial no se renueva.

Definición de medidas de desempeño y factores relevantes del sistema

Con el propósito de utilizar el modelo desarrollado para formular estrategias que conlleven a una mejora en el manejo de residuos electrónicos, es necesario identificar factores que puedan ser controlados y que, por tanto, permitan influir directamente sobre respuestas o medidas de desempeño relevantes. Las respuestas elegidas para evaluar posibles estrategias de acción para reducir el *e-waste* fueron las siguientes: cantidad (en kg) de computadoras recuperadas; porcentaje de computadoras desechadas (ya sea por falla u obsolescencia) que se reciclan apropiadamente, esto es, por recolectores formales; porcentaje de participación de los consumidores y utilidades para las empresas certificadas como recicladores de *e-waste*.

Se propuso analizar el efecto de cinco macrofactores que son un agregado de componentes específicos que se pueden asociar con estrategias para la reducción del *e-waste*. Por ejemplo, el factor B considera un conjunto de acciones que de acuerdo con la TCP determinan la intención y conducta manifiesta de un individuo por participar en programas de recuperación de *e-waste*. Los componentes de estos macrofactores se describen en el cuadro 1.

Cuadro 1
Factores analizados y sus componentes

Factor	Componente
A Información general sobre problemática ambiental	Efectividad de la información general
	Fracción de difusión interna
B Actitud hacia el reciclaje	Efectividad de la información específica
	Facilidad del control sobre la acción
	Normas sociales
C Publicidad	Publicidad de programas
D Legislación	Legislación
	Conveniencia
E Facilitadores del reciclaje	Esfuerzo
	Costo monetario

Validación del modelo

Antes de realizar la simulación de los escenarios combinando los factores descritos en el cuadro 1, se validó el modelo considerando tres contextos para la recuperación de *e-waste*: optimista, medio y pesimista. Estos escenarios corresponden a la situación vigente en tres países (Alemania, Grecia y México) en lo que se refiere a las acciones implementadas para la recuperación y manejo del *e-waste*, de acuerdo con la información secundaria recolectada y la experiencia de los ejecutivos de REMSA y de la Semarnat del Estado de México. En el cuadro 2 se reportan los niveles elegidos para cada uno de los cinco factores propuestos como críticos en la recuperación de *e-waste*; como se indicó previamente, los niveles para los factores se definieron según la situación prevalente en cada uno de los países elegidos como escenario de referencia.

Cuadro 2
Valores empleados para los factores en los escenarios de validación

Factor	Componente	México	Grecia	Alemania
A	Efectividad de la información general	1.00%	5.00%	10.00%
	Fracción de difusión interna	4.00%	20.00%	50.00%
B	Efectividad de la información específica	4.00%	20.00%	40.00%
	Facilidad del control sobre la acción	1.00%	20.00%	40.00%
	Normas sociales	2.00%	10.00%	1.00%
C	Publicidad de programas	1.00%	10.00%	20.00%
D	Legislación	0.00%	10.00%	20.00%
	Conveniencia	10.00%	20.00%	40.00%
E	Esfuerzo	9	6	4
	Costo monetario	9	6	3

Los datos recopilados por la OCDE en torno a la problemática del *e-waste* en los tres países se utilizaron para validar que los resultados proporcionados por el modelo de simulación fueran consistentes con la realidad. En el cuadro 3 se reporta el volumen total de residuos sólidos generados en cada país, el total de estos residuos que son considerados como *e-waste*, el porcentaje que estos residuos representan del total de residuos sólidos, así como el porcentaje de *e-waste* que se recupera y recicla. La figura 6 describe gráficamente los resultados de la simulación para

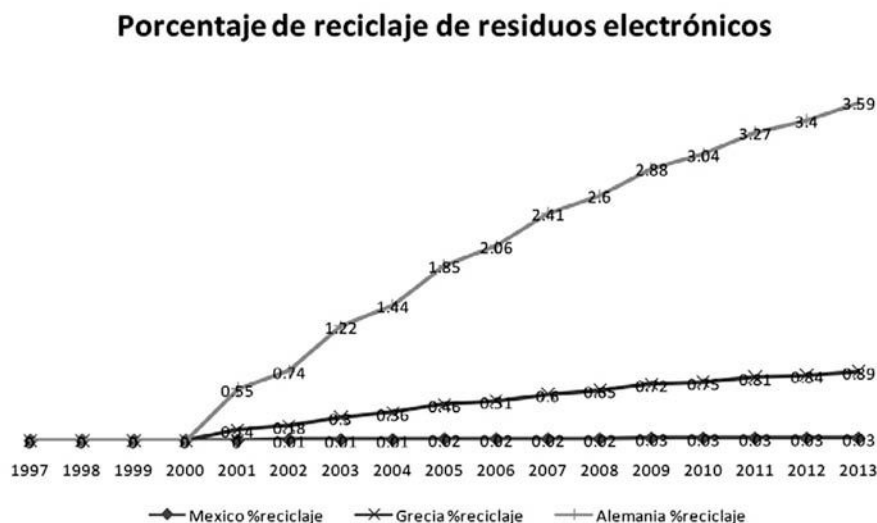
cada uno de estos tres casos de validación. Los datos extraídos del compendio de la OCDE sobre residuos electrónicos recuperados para reciclaje en los tres países empatan bien con los resultados de la simulación, lo que apoya la calidad del modelo de dinámica de sistemas formulado antes de utilizarlo para evaluar el efecto que tienen los macrofactores sobre la participación ciudadana, el volumen de computadoras recuperadas y la rentabilidad de las empresas recicladoras formales.

Cuadro 3
Generación y reciclaje de residuos sólidos y electrónicos en los países seleccionados para los escenarios de validación

	Total de residuos sólidos (ton)	Residuos electrónicos (ton)	Porcentaje de residuos sólidos que se recicla	Porcentaje de residuos electrónicos que se recicla
México (2006)	36,088	200	3.26%	0.02%
Alemania (2004)	48,343	2,099	33.14%	1.44%
Grecia (2003)	4,853	170	8.11%	0.28%

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la OCDE (OCDE, 2008)

Figura 6
Porcentaje de residuos electrónicos que se recicla en tres países: escenarios de validación al modelo de dinámica de sistemas



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Villanueva-Bringas (2010)

Análisis de resultados

Para determinar la influencia que los factores descritos en la sección *Definición de medidas de desempeño y factores relevantes del sistema* tienen sobre las variables de respuesta se simularon distintos escenarios que corresponden a las posibles combinaciones de los factores, las cuales resultan en un experimento factorial 2^5 . Los niveles elegidos a juicio para cada uno los factores en estudio se muestran en el cuadro 4.

Cuadro 4
Valores de los factores empleados para el análisis factorial

Factor	Componente del factor	Valor en su nivel bajo	Valor en su nivel alto
A	Información general	1%	2%
	Fracción de difusión interna	4%	8%
B	Efectividad de la información específica	4%	8%
	Facilidad del control sobre la acción	1%	2%
	Normas sociales	2%	4%
C	Publicidad específica sobre programas de recolección	1%	2%
D	Legislación	0%	5%
	Conveniencia	10%	20%
E	Esfuerzo	4.5	9
	Costo monetario	4.5	9

Los resultados del Anova aplicado se muestran en el cuadro 5; cabe aclarar que si bien el modelo de dinámica de sistemas proporcionó valores para las medidas de desempeño en diferentes periodos, únicamente se analizó el efecto de los macrofactores para el año 2011, ya que según el modelo es en este año cuando la empresa recicladora tiene ya utilidades estables que al compararse con la información disponible por parte de REMSA permite validar los resultados.

Cuadro 5
Factores e interacciones significativos para cada medida de desempeño

Medida de desempeño (2011)	Factores significantes	Interacciones significantes	R ² Ajustada
Porcentaje de equipos reciclados	C (p-valor=0.000) D (p-valor=0.000)	CxD (p-valor=0.003)	89.46%
Porcentaje de participación ciudadana	B (p-valor=0.000) C (p-valor=0.000) E (p-valor=0.000)	BxC (p-valor=0.000) BxE (p-valor=0.001) CxE (p-valor=0.043)	89.02%
Cantidad (en kg) de computadoras recuperadas	C (p-valor=0.000) D (p-valor=0.000)	CxD (p-valor=0.003)	89.58%
Utilidades acumuladas por los recolectores formales	C (p-valor=0.000) D (p-valor=0.000)	CxD (p-valor=0.003)	89.59%

La mayoría de las medidas de desempeño dependen de que se tenga una legislación (**D**) para el control y manejo del *e-waste* y de que se realice una adecuada difusión —mediante publicidad con información específica (**C**)— sobre los programas disponibles para la recolección de equipos de cómputo. Para la variable “porcentaje de participación ciudadana”, además de publicitar los programas de recolección y sus beneficios, otros factores que influyen significativamente son el factor **B** que incluye a los componentes de la teoría de conducta planeada (actitud favorable derivada del conocimiento e información disponible al individuo, la norma social y el control sobre la conducta) y el factor **E** que considera facilitadores del contexto que reducen el costo percibido (esfuerzo tanto personal como económico) de la participación en programas de recuperación de *e-waste*.

Conclusiones

Se desarrolló el modelo de dinámica de sistemas para estimar la tasa de recuperación de computadoras en México, el cual se alimentó con información obtenida de fuentes secundarias: dos encuestas realizadas en la zona urbana de la ciudad de Toluca e información proporcionada por empresas “expertas” en reciclaje de *e-waste*. A partir del modelo se estimó el volumen de computadoras que se recuperan para reciclarlas siguiendo las normas ambientales. En el cuadro 6 se reporta los resultados de la simulación para el volumen de computadoras recuperadas en el periodo 2009-2013. Los volúmenes para los años 2009 y 2010 generados por el modelo concuerdan con la cantidad real de computadoras que la empresa REMSA reportó haber recolectado durante los eventos de recuperación masiva de *e-waste*, lo que confirma la calidad del modelo.

Cuadro 6
Volumen de computadoras potencialmente recuperables
con base en el modelo de dinámica de sistemas

Año	2009	2010	2011	2012	2013
Cantidad de computadoras recuperadas (kg)	13,892	17,265	21,122	25,524	30,541

El modelo explica razonablemente bien la influencia de cinco macrofactores sobre variables críticas del sistema, puesto que los escenarios construidos a partir de la combinación de los macrofactores (información sobre la problemática ambiental; actitud de los individuos hacia el reciclaje de *e-waste*; publicidad para los programas de recuperación de *e-waste*; legislación que obligue a la recuperación de computadoras no-útiles u obsoletas; y facilitadores del reciclaje) muestran que su manipulación influye significativamente sobre la cantidad de computadoras que se recuperan y reciclan tal y como lo sugiere la literatura. Los factores legislación y publicidad para los programas de recuperación de *e-waste* tuvieron una influencia conjunta sobre las siguientes variables: cantidad de computadoras recuperadas, porcentaje de equipos obsoletos/inservibles que se reciclan y utilidades para la empresa recicladora. En tanto que el porcentaje de participación ciudadana resultó estar influido por la publicidad, una actitud favorable derivada del conocimiento e información disponible al individuo sobre qué es el reciclaje, más la existencia de esquemas de recuperación que faciliten realizarlo al reducir el costo percibido de retornar el *e-waste* para su reciclaje formal.

El modelo de dinámica de sistemas desarrollado consideró la influencia del gobierno y las empresas, además de incorporar aspectos relacionados con la actitud de los individuos con respecto al reciclaje que no se había considerado de manera explícita en otros trabajos sustentados en modelos de dinámica de sistemas. Sin embargo, el modelo únicamente consideró la influencia de la legislación sobre el interés de las empresas por participar en una cadena de suministro inversa; otros elementos como el interés empresarial por proyectar una imagen “verde” que consolide la posición competitiva de la empresa en su mercado no fueron contemplados (Srivastava, 2008a; Kapetanopoulou y Tagaras, 2011). El tema de la recuperación de valor se abordó desde la perspectiva de demostrar que el acceso a una cantidad conveniente de retornos asegura la rentabilidad para una tercera parte responsable de la recuperación y el reciclaje del *e-waste*. Esta perspectiva se justifica dado que

para las empresas resulta más conveniente subcontratar la administración de los retornos porque así evitan el hacer una inversión adicional, desarrollar capacidades de logística inversa y destinar recursos a una actividad que no consideran crítica o medular (Kapetanopoulou y Tagaras, 2011). Analizar la recuperación de valor y generación de ganancias en cadenas de lazo cerrado es un tema de interés para investigación futura.

Los resultados que el modelo proporciona son dependientes de la calidad de la información de entrada, que si bien no tiene que ser tan precisa como la requerida por un método de pronóstico cuantitativo, sí debe ser consistente con la situación del contexto en estudio. Dada la escasa información disponible para México y el incipiente interés por promover el reciclaje de *e-waste*, la información empleada en este trabajo se obtuvo principalmente de fuentes expertas. Es relevante actualizar esta información una vez que se cuente con datos confiables sobre el número de computadoras en hogares y empresas, la duración de sus ciclos de vida, la cantidad de equipos recuperados en diferentes ciudades bajo distintos esquemas de recuperación, y la influencia que tiene la información sobre la formación de actitudes y el despliegue de conductas de reciclaje.

Finalmente, la metodología de dinámica de sistemas es una herramienta conveniente para describir las interrelaciones complejas entre variables en una cadena de suministro inversa, así como para analizar el efecto que factores cualitativos y cuantitativos tienen sobre la tasa de retorno de productos electrónicos. La metodología resulta particularmente valiosa cuando no se cuenta con información histórica precisa sobre la cantidad de productos potencialmente recuperables y cuando se desean construir escenarios que describen distintos esquemas para la recuperación de productos y para motivar/obligar a empresas e individuos a que retornen aquellos equipos que completaron su vida útil.

Referencias

- Ajzen, I. (1991). The theory of planned behavior. *Organizational Behavior & Human Decision Proces*, (50): 179-211.
- Arroyo-López, P. E. (2012). Diseño de programas de reciclaje de *e-waste* considerando las motivaciones del participante: un estudio exploratorio en el Estado de México. *Psyecology* 3 (1): 3-14.

- Business Monitor International [BMI] (2009). *Mexico consumer electronics report Q4 2009*. Business Monitor International.
- Canning, L. (2006). Rethinking market connections: mobile phone recovery, reuse and recycling in the UK. *Journal of Business & Industrial Marketing* 21 (5): 320-329.
- Dekker, R., M. Fleischmann, K. Inderfurth y L. N. Van Wassenhove (eds.). *Reverse Logistics: Quantitative Models for Closed-loop Supply Chains*. Berlin: Springer-Verlag.
- Dahab, D. J., J. W. Gentry y W. Su (1995). New ways to reach non-recyclers: an extension of the model of reasoned action to recycling behaviors. En F. R. Kardes y M. Sujan, eds. *Advances in Consumer Research*. Association for Consumer Research, Provo, UT: 251-256.
- Do Valle, P. O., E. Rebelo, E. Reis y J. Menezes (2005). Combining behavioral theories to predict recycling involvement. *Environment and Behavior* (37): 364-396.
- European Union [EU] (2002). Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on waste electrical and electronic equipment (WEEE). EU Commission.
- Fernández, E., J. Kalcsics, S. Nickel y R. Z. Ríos-Mercado (2010). A novel territory design model arising in the implementation of the WEEE-directive. *Journal of the Operation Research Society* 61 (3): 503-514.
- Fleischmann, M., J. M. Bloemhof-Ruwaard, P. Beullens y R. Dekker (2004). Reverse logistics network design. En R. Dekker, M. Fleischmann, M., K. Inderfurth y L. N. Van Wassenhove, eds. *Reverse Logistics: Quantitative Models for Closed-loop Supply Chains*. Berlin: Springer-Verlag, capítulo 4.
- Georgiadis, P. y D. Vlachos (2003). The effect of environmental parameters on product recovery. *European Journal of Operational Research* (157): 449-464.

- y D. Vlachos (2004). Decision making in reverse logistics using system dynamics. *Yugoslav Journal of Operations Research* 14 (2): 259-272.
- , D. Vlachos y G. Tagaras (2006). The impact of product lifecycle on capacity planning of closed-loop supply chains with remanufacturing. *Production and Operations Management* 15 (4): 514-527.
- y M. Besiou (2010). Environmental and economical sustainability of WEEE closed-loop supply chains with recycling: a system dynamics analysis. *International Journal of Advanced Manufacturing Technologies* (47): 475-493.
- Gröbler, A., J. H. Thun y P. M. Milling (2008). System dynamics as a structural theory in operations management. *Production and Operations Management Society* 17 (3): 373-384.
- Guide, V. D. R. Jr., T. P. Harrison y L. N. Van Wassenhove (2003). The challenge of closed-loop supply chains. *Interfaces* 33 (6): 3-6.
- y L. N. Van Wassenhove (2006). Closed-Loop Supply Chains: An Introduction to the Feature Issue (Part 1 & 2). *Production and Operations Management* 15 (3: 345-350/4: 471-472).
- y L. N. Van Wassenhove (2009). The evolution of closed-loop supply chain research. *Operations Research* 57 (1): 10-18.
- Hopp, M., Y. Barba-Gutiérrez y B. Adenso-Díaz (2008). An analysis of some environmental consequences of European electrical and electronic waste regulation. *Resources, Conservation & Recycling* 52 (3): 481-495.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI] (2010). Estadísticas sobre disponibilidad y uso de tecnología de información y comunicaciones en los hogares, 2010. Aguascalientes, Ags.: INEGI.
- Kapetanopoulou, P. y G. Tagaras (2011). Drivers and obstacles of product recovery activities in the Greek industry. *International Journal of Operations & Production Management* 31 (2): 148-166.

- Krikke, H. R., J. Bloemhof-Ruwaard y L. Van Wassenhove (2001). Design of closed loop supply chains: a production and return network for refrigerators. *Erim report series research in management*, Ers-2001-45-Lis.
- Linton, J. D., J. S. Yeomans y R. Yoogalingam, R. (2004). Enabling industrial ecology through the forecasting of durable goods disposal: televisions as an exemplar case study. *Canadian Journal of Administrative Sciences* 21 (2): 190-207.
- Lohse, J., S. Winteler y J. Wulf-Schnabel (1998). Collection targets for waste from electrical and electronic equipment (WEEE) compiled for the directorate general environment. Ökopol: Nuclear safety and civil protection of the Commission of the European Communities.
- Mahajan, V. y R. A. Peterson (1985). *Models for Innovation Diffusion*. Newbury Park, CA.: Sage Publications Inc.
- Montgomery, D. C. (2007). *Diseño y análisis de experimentos*, 2a. ed. México: Limusa-Wiley.
- Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económica [OCDE] (2008) Environmental Data Compendium 2006-2008. Disponible en <http://www.oecd.org/dataoecd/22/58/41878186.pdf>.
- Pacheco-Ornelas, M. C. y F. J. Meza-Juárez (2012). Factores y componentes estratégicos para fortalecer la imagen empresarial y la identificación consumidor-empresa: enfoques de imagen de responsabilidad social e imagen de marca. *Memorias del XVI Congreso Internacional ACACIA*. Lagos de Guadalupe, México, 22-25 de mayo.
- REMSA, (s.f.). Conócenos. Disponible en <http://reciclaelectronicos.com/conocenos>.
- Román-Moguel, G. J. (2007). Diagnóstico sobre la generación de residuos electrónicos en México. Disponible en http://www.ine.gob.mx/descargas/sqre/res_electronicos_borrador_final.pdf
- Schulmann, F., B. Engels y O. Rentz (2003). Closed-loop supply chains for spent batteries. *Interfaces* (33): 57-71

- Secretaría de Comunicaciones y Transporte [SCT] (2009). Anuario Estadístico 2009. Disponible en <http://www.sct.gob.mx/uploads/media/ANUARIO2009-final.pdf>.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [Semarnat] (2009). *Programa nacional para la prevención y gestión integral de los residuos 2009-2012*. México: Semarnat.
- Smallbone, T. (2005). How can domestic household become part of the solution of England's recycling problems? *Business Strategy and the Environment* (14): 110-122.
- Spengler, T. y M. Schröter, (2003). Strategic management of spare parts in closed-loop supply chains, a system dynamics approach. *Interfaces* 33 (6): 7-17.
- Srivastava, S. K. (2008a). Network design for reverse logistics. *Omega* (36): 535-548.
- (2008b). Value recovery network design for product returns. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 38 (4): 311-331.
- y R. K. Srivastava (2006). Managing product returns for reverse logistics. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management* 36 (7): 524-46.
- Stock, J. (1992). *Reverse logistics*. Council of Logistics Management, Oak Brook, IL: White Paper.
- Streicher-Porte, M., H. Bader, R. Scheidegger y S. Kytzia (2007). Material flow and economic analysis as a suitable tool for system analysis under the constraints of poor data availability and quality in emerging economies. *Clean Technology Environmental Policy* (9): 325-345.
- Terazono, A., S. Murakami, N. Abe, B. Inanc y Y. Moriguchi (2006). Current status and research on e-waste issues in Asia. *Journal of Material Cycles Waste Management* (8): 1-12.

- Thierry, M., M. Salomon, J. Van de Numen y L. Van Wassenhove (1995). Strategic issues in product recovery management. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 26 (2): 23-42.
- Thøgersen, J. (2005). How many consumer policy empower consumers for sustainable lifestyles? *Journal of Consumer Policy* 28 (2): 143-178.
- Tobias, R., A. Brügger, y H. J. Mosler (2009). Developing strategies for waste reduction by means of tailored interventions in Santiago de Cuba. *Environment and Behavior* 4 (6): 836-865.
- Toktay, B., E. A. van der Laan y M. P. de Brito (2003). Managing product returns: the role of forecasting. Working Paper, Erasmus University Rotterdam: 1-25.
- Villanueva-Bringas, M. (2010). *Modelo dinámico de un sistema de recolección de residuos electrónicos para su reciclaje*. Tesis de maestría no publicada. Tecnológico de Monterrey, campus Toluca.
- Wath, S. B., P. S. Dutt y T. Chakrabarti (2011). E-waste scenario in India, its management and implications. *Environmental Monitor Assessment* (172): 249-262. 