EL AUGE DE LOS PLANES COLECTIVOS DE RESPONSABILIDAD EXTENDIDA DEL PRODUCTOR EN COLOMBIA. ¿HAY ESPACIO PARA TODOS?

Jorge Castrillón Ocampo, Sebastián Jaén Posada, Gloria Ramírez Córdoba, Pablo Maya-Duque
ALIADO - Analytics and research for decision making Alianza Circular
Facultad de ingeniería Universidad de Antioquia
Medellín, Colombia
alianzacircular@gmail.com

PALABRAS CLAVE

Economía Circular
Dinámica de sistemas
Responsabilidad Extendida del productor

RESUMEN

La responsabilidad extendida del productor (REP) se ha convertido en uno de los principales instrumentos de política medioambiental utilizados por países y regiones para hacer frente a la creciente generación de residuos. Traslada la responsabilidad de la gestión de los productos al final de su vida útil a los productores y promueve la adopción de prácticas de ecodiseño y economía circular. En Colombia, la política REP para envases se introdujo en 2021. Ha afectado al mercado existente de los materiales que gestiona y ha provocado un aumento significativo del número de actores que gestionan y transforman materiales. Este artículo utiliza un modelo de dinámica de sistemas para analizar cómo está estructurado el sistema de REP para envases y empaques en Colombia y cómo podría evolucionar en cuanto al número de actores. Los resultados muestran que el objetivo de recogida y transformación fijado por la normativa tiene un marcado efecto sobre el número de actores, los precios de procesos como la recogida y la transformación, así como el costo y la demanda de certificación. Además, se ha constatado que el elevado número de organizaciones de productores creadas en Colombia en el marco de la política de REP de envases se debe a tres factores fundamentales interrelacionados: el objetivo fijado por el reglamento, la ausencia de fuertes barreras de entrada para la creación de nuevas organizaciones y la alta rentabilidad a corto plazo del mercado.

1. INTRODUCCIÓN

La generación de residuos ha sido identificada como un problema de alcance global y se espera que ésta aumente de manera más rápida que la población para el año 2050. En respuesta a esta problemática, los gobiernos han venido tomando decisiones sobre la gestión de residuos para mitigar la contaminación de los océanos, la transmisión de enfermedades, los daños a los ecosistemas y demás efectos negativos (Kaza et al., 2018). Algunas de las iniciativas han sido encaminadas en el marco de la economía circular con el objetivo de aumentar la eficiencia en el uso de los recursos, y así, lograr disminuir los residuos urbanos e industriales y mejorar el equilibrio entre la economía, el medio ambiente y la sociedad (Castro et al., 2022; Ghisellini et al., 2016). Dicha disminución de los residuos aspira a regenerar la naturaleza y hacer circular los productos y materiales manteniendo su máximo valor, esto implica mantener los materiales en uso como producto y cuando no sea posible, como componente o materia prima, conservando el valor intrínseco de los bienes y los materiales (Ellen MacArthur Foundation, 2020).

En el caso particular de los residuos de envases y empaques, algunos esfuerzos se han centrado inicialmente en atacar los envases de un solo uso, los cuales a pesar de ser prácticos por su capacidad de protección y bajo precio,

generan toneladas de residuos (Dey et al., 2021). Un ejemplo claro es el de los envases de plástico, los cuales, aunque son elementos con características que deberían facilitar el reciclaje, siguen llegando a los vertederos y presentan bajas tasas de reciclaje. A pesar de esto, la situación se encuentra en proceso de transición gracias a programas que incluyen el concepto de REP (Lombardi et al., 2021), iniciativa que traslada a los fabricantes la responsabilidad de gestionar los productos al final de su vida útil, incluyendo los envases y empaques de un solo uso (OCDE, 2016).

1.1. Responsabilidad Extendida del Productor (REP)

La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) define REP como un enfoque de política medioambiental en el cual la responsabilidad de un productor sobre el producto se extiende hasta la etapa post consumo, lo que implica que el productor se hace responsable de recolectar los bienes al final de su vida útil (OCDE, 2016). De este modo, los productores tienen el compromiso de proporcionar los recursos financieros necesarios para la recolección o la obligación de asumir la operación de recogida, liberando a las municipalidades de este deber. Este tipo de políticas también pretende reducir la proporción de residuos destinados a la disposición final aumentando las tasas de reciclaje e incentivar a los productores a rediseñar productos, envases y empaques para favorecer materiales cuya gestión y aprovechamiento sea más fácil y evitar aquellos desechos que suponen una carga para el medio ambiente o un riesgo para la salud humana (OCDE, 2016).

Algunos de los elementos básicos de una política de responsabilidad extendida son la definición del concepto de productor que estará obligado a cumplirla (e.g., embotelladores, distribuidores), la definición del conjunto de productos y/o materiales que abarca el sistema (e.g., empaques y envases), la definición de metas respecto a la correcta gestión de dichos productos (e.g., porcentajes de recuperación anuales) y el proceso de certificación del cumplimiento (e.g. reporte anual de certificaciones de aprovechamiento). De manera particular, los productores pueden cumplir con lo estipulado en la REP de forma individual o colectiva. En el primero de estos casos, el productor se responsabiliza a título propio por el cumplimiento de las metas definidas, estableciendo para ello los procesos requeridos respecto a la recolección, gestión y aprovechamiento de los materiales (OCDE, 2016). En el caso del cumplimiento colectivo, un nuevo actor constituido como una organización de productores - ORP, denominado en Colombia como plan colectivo, tiene el rol de integrador encargándose, en nombre de un grupo de productores, de recaudar y distribuir fondos, encadenar múltiples actores (gestores y transformadores), y supervisar y velar por el cumplimiento de las metas que les permitan recolectar y valorizar residuos de empaques y envases en las cantidades establecidas a partir de la línea base que es calculada con base en la cantidad total de empaque puesta en el mercado por el conjunto de productores. En este caso, los productores se responsabilizan de soportar financiera y/o operativamente a la ORP (Kunz et al., 2019). La centralización de las actividades y responsabilidades así como la garantía de condiciones uniformes son elementos que también ayudan a disminuir los costos al utilizar ORPs (Favot, 2022). Estas son especialmente útiles para brindar servicios de logística inversa a sus miembros, en especial, cuando las empresas son pequeñas (Tian et al., 2019).

A la fecha, hay aproximadamente 400 esquemas REP operativos en todo el mundo, la mayoría de los cuales se encuentran en los estados miembros de la Unión Europea (UE), donde la regulación de residuos ofrece normas generales para su uso (Ramasubramanian, B., et. al., 2023).

1.2. Descripción del objeto de estudio

Todos los sistemas de REP poseen distintos roles para el gobierno, los productores y los proveedores de servicios de recolección y procesamiento, pero difieren en la cantidad de organizaciones de productores involucradas. Los sistemas de REP usualmente se enmarcan en una de las siguientes opciones: una sola organización de productores, múltiples organizaciones en competencia, créditos negociables y administrados por el gobierno (OCDE, 2016). En Colombia, el sistema está estructurado como un sistema de múltiples ORPs en competencia y, a partir de su creación en el año 2021, el sistema ha experimentado un auge de organizaciones de productores y de planes de productores individuales. Si bien la literatura reconoce el impacto positivo de la existencia de competencia en el marco de la REP (Favot, 2022), el número de organizaciones de productores en el caso colombiano es muy superior al observado en otros países con sistemas similares.

Existen elementos determinantes de este auge de organizaciones de productores y planes individuales, así como factores que se espera tengan relevancia en el comportamiento futuro del sistema, tales como la existencia de un mercado actual que recoge un porcentaje de materiales para su valorización, la relación de esta tasa actual de recolección con las metas de aprovechamiento establecidas en la política, y los lineamientos respecto al incremento gradual de la cobertura y las metas. En ese contexto, este artículo analiza, desde una visión sistémica, la forma como se estructura el sistema de REP de empaques y envases en Colombia, con el fin de estudiar diferentes escenarios para determinar cómo se podría comportar en el

Alianza Circular © Copyright 2023

futuro, especialmente en términos del número de actores en el sistema; los precios de gestionar, recolectar, transformar; y la capacidad de recolección de materiales.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

Desde la adopción de las primeras políticas de REP en el mundo y los lineamientos que para ello delimitó la OCDE, ha existido la discusión respecto a la posibilidad de monopolios anticompetitivos y la conveniencia de la existencia de múltiples organizaciones de productores respecto a un sistema regido por unas pocas de estas organizaciones (OCDE, 2011). En este sentido, se discutió el desarrollo de diferentes esquemas de EPR, traduciéndose en la existencia de múltiples ORPs en cada mercado (OCDE, 2016; Salhofer et al., 2016). Existe poca literatura que aborde el comportamiento relacionado con el surgimiento y operación de organizaciones de productores en el marco de políticas de REP. Así mismo, son pocos los trabajos que abordan una visión sistémica a través de herramientas como la dinámica de sistemas para dar tratamiento a asuntos de REP.

Xu (2010) plantea un modelo de dinámica de sistemas que busca predecir la cantidad de material generado como residuos posconsumo del mercado de electrónicos, indicando que los modelos de regresión tradicionales no son suficientes para representar la dinámica de las afectaciones sociales y económicas. El modelo propuesto considera un proveedor externo encargado de administrar la logística de recogida de los productos al final de su vida útil, eliminando cualquier riesgo financiero del productor en el desarrollo de esta tarea. Los resultados obtenidos por el autor permiten concluir que existe un problema sistémico en el cual deben interactuar productores, organizaciones encargadas de la logística de retorno y transformadores. Por su parte, Destyanto et al., (2019) propone un modelo de dinámica de sistemas integrando los esquemas de la estrategia REP para el caso del manejo de los residuos de material de envase y empaque en Indonesia, con la intención de aplicarse considerando perspectivas macroeconómicas. El modelo tiene en cuenta como partes interesadas los ministerios de ambiente, industria y hacienda, además las municipalidades, industrias de reciclado, productores y minoristas. En la misma línea, el trabajo de Peng et al., (2019) utiliza teoría de juegos para dilucidar las principales causas de fracaso de las regulaciones medioambientales. Dicho trabajo considera como interesados a los entes reguladores y a las empresas productoras, de las cuales estudia su comportamiento durante la aplicación de sistemas REP teniendo en cuenta el posible incumplimiento. Posteriormente, utilizan dinámica de sistemas para evaluar el juego propuesto, encontrando que se debe mejorar la legislación, supervisión e inspección de mecanismos que incentiven o restrinjan a los productores en contextos de REP.

Recientemente se han publicado algunos trabajos que abordan la interacción entre los participantes de los sistemas REP, por ejemplo, Tu at al., (2020) proponen un juego entre la entidad gubernamental de protección ambiental, los productores y los consumidores, para luego utilizar un modelo de dinámica de sistemas para analizar cómo las multas, compensaciones, regulaciones y políticas acentúan o alivian conflictos entre las diferentes partes del sistema. Por su parte He and Sun B (2022) estudian factores claves para el éxito de REP y muestran que un sistema de recompensas y castigo dinámico funciona mejor que uno estático. Zheng et al., (2022) crean un modelo de decisión mixto utilizando teoría de juegos cooperativos y optimización, a partir del cual se pretende reducir el costo total de recuperación. Los autores encuentran que para los ORPs la identificación de reciclabilidad del material es un factor crítico, por lo que esta se debe integrar a la normatividad, creando mecanismos de recompensa y penalización.

En la revisión bibliográfica realizada se encontraron otros trabajos que, aunque no abordan directamente la problemática de las organizaciones de productores, si usan dinámica de sistemas para analizar temáticas relacionadas. Por ejemplo, el trabajo de Kuo et al., (2021) busca optimizar el sistema de fondos de reciclaje basados en cadenas de abastecimiento inversas en Indonesia, encontrando resultados significativos que ayudan a la toma de decisiones basado en REP para la optimización de las tarifas. El tipo de desecho considerado en el estudio son envases y empaques, y los autores prestan especial consideración a los flujos de material y dinero. El modelo presenta diferenciación directa entre los recolectores y las entidades denominadas socios de recolección, además evalúan la integración de una agencia de reciclaje. De forma similar, Chu et al., (2023) evalúan el tratamiento de residuos eléctricos y electrónicos, de modo que su gestión permita minimizar la llegada de sustancias peligrosas al medio ambiente. En este estudio se evalúa el impacto de los precios en la competencia y la posibilidad de formalización de las cadenas de abastecimiento informales, pero aunque el modelo contempla la existencia de recolectores y procesadores formales e informales, no se mencionan directamente ORP.

No se encuentra en la literatura ningún caso donde se estudie directamente el comportamiento del mercado de los ORPs en términos de aparición y desaparición de nuevas organizaciones según las condiciones del mercado, a pesar de que en varias ocasiones se estudió la relación entre el precio y la interacción entre las partes interesadas en un mercado competitivo como factor determinante para el éxito de los esquemas de REP.

Alianza Circular © Copyright 2023

3. METODOS

En esta sección se describe el contexto del caso colombiano en el que se desarrolla el estudio, así como el modelo y las herramientas analíticas empleadas.

3.1. REP de empaques y envases en Colombia

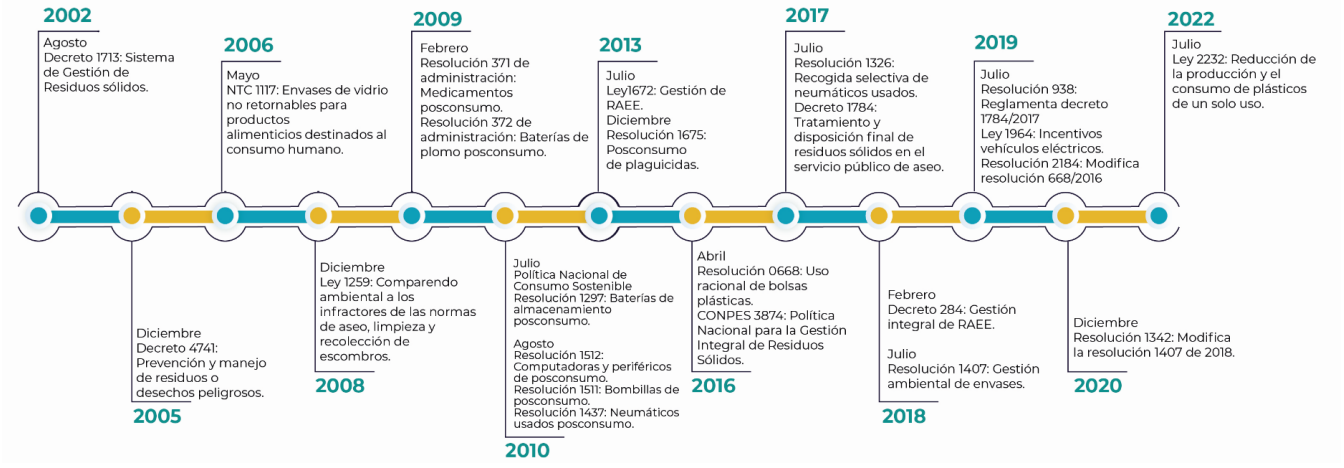
En Colombia, la introducción de las políticas asociadas a la REP comienza en 2002 con la regulación de la gestión de residuos sólidos y su evolución en el tiempo se presenta en la Figura 1. Las políticas de REP iniciaron con las regulaciones para los residuos peligrosos, envases de vidrio no retornables para alimentos y residuos de medicamentos. Posteriormente, se introducen planes para la gestión de baterías de plomo y medicamentos, dando paso posteriormente a sistemas de recolección selectiva para baterías, computadores, bombillos, neumáticos y plaguicidas. La política más reciente que regula la gestión de empaques y envases a través de un sistema de REP, fue promulgada en 2018 y corregida y actualizada en 2020 (Alianza Circular, 2023).

Respecto a la política REP para empaques y envases en Colombia, la norma hace claridad sobre las distinciones entre los planes individuales y colectivos respecto a los criterios para el cumplimiento de la obligación, estructura administrativa y técnica, línea base de material puesto en el mercado y características técnicas y logísticas para operar (ANLA, 2020). En particular, el funcionamiento logístico y operativo del plan debe permitir la recolección de los residuos, considerando aspectos económicos, ambientales y sociales; debe cumplir con criterios de cobertura geográfica, así como reportar a la autoridad ambiental cuestiones como las rutas de recolección, sistemas de logística inversa, alianza entre actores y demás que le puedan interesar.

La Figura 2 describe la forma en la que se encadenan los actores en el marco de la regulación REP de empaques y envases en Colombia. En esta estructura, se destacan los actores y operadores asociados a la recolección dado que podría diferenciarse de los sistemas en otros países en los que se han implementado este tipo de políticas. En primer lugar, se destaca la existencia del rol de *reciclador*, definido como aquellas personas dedicadas a recolectar material en las calles o directamente desde la fuente de forma manual y cuya subsistencia depende del ingreso generado por la venta del material recuperado. En cuanto al flujo del material después de su uso, coexisten dos sistemas de recolección. El primer sistema está inmerso en el sistema público de aseo, en el que las empresas prestadoras del servicio de aseo recogen los residuos sólidos y de ellos clasifican los materiales aprovechables que son transportados a los centros de acopio. Adicionalmente, las organizaciones de recicladores formalizados aportan en la recolección de material que se entrega a los centros de acopio y por el que no solo reciben una remuneración por el material recolectado sino una compensación asociada al hecho de asumir tareas propias del sistema público de aseo. El segundo sistema opera de forma independiente al sistema público de aseo y está compuesto por empresas gestoras independientes, constituidas con el fin de recolectar y gestionar los materiales aprovechables, y los recicladores de oficio que no están formalizados como parte del sistema público de aseo. Estos actores reciben ingresos en función del valor del material que recolectan. Por último, los transformadores juegan un papel importante en el diseño del sistema puesto que son quienes finalmente certifican el aprovechamiento de los materiales recuperados que son contabilizados para el cumplimiento de la meta.

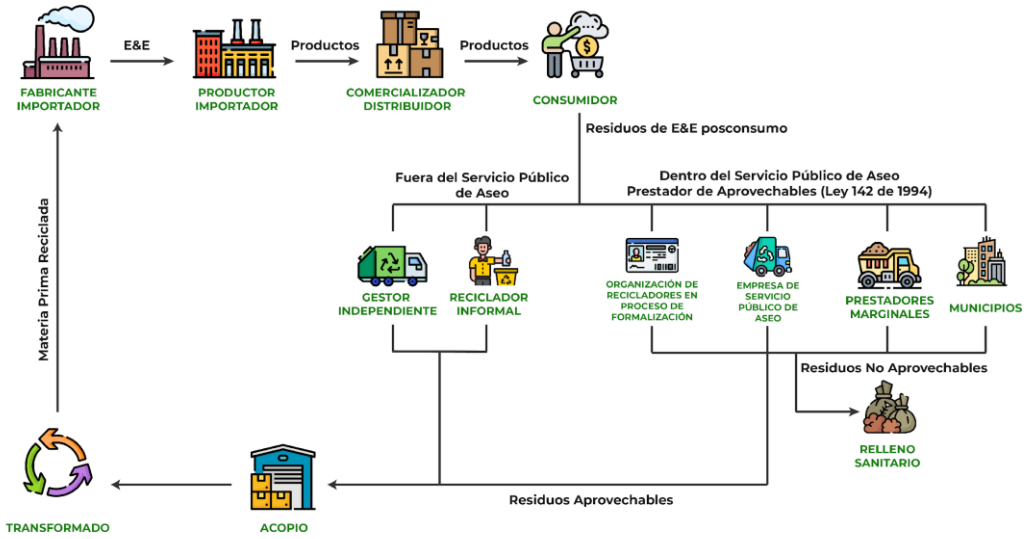
Figura 1

Evolución del marco normativo de REP en Colombia



Alianza Circular © Copyright 2023

Figura 2
Actores del sistema REP en Colombia



Tomado de Cempre, 2018

En esta estructura, las organizaciones de productores permiten encadenar múltiples actores (gestores y transformadores) para lograr el cumplimiento de las metas, de modo que les permitan recolectar y valorizar residuos de empaques y envases en las cantidades establecidas a partir de la línea base o cantidad total de empaque puesta en el mercado por el conjunto de productores.

En Colombia, cerca del 30% de los residuos sólidos generados corresponden a papel, cartón, vidrio, plástico y metal, de los cuales más de la mitad provienen de empaques y envases. A modo de ejemplo, para el plástico, que es el material predominante, se introducen en el mercado nacional cerca de 700.000 toneladas cada año, de las cuales el 31,9% son aprovechadas. Sin embargo, solo el 3% de dicho aprovechamiento corresponde a material reincorporado efectivamente en nuevos envases y empaques plásticos (Rojas, 2023). Para el año 2021, momento de inicio de aplicación de la regulación, la meta se estableció en 10% respecto a la cantidad de material de empaque introducida al mercado por el productor. Dicha meta tendrá incrementos graduales de 2% o 3% hasta alcanzar un 30% en el año 2030. Así mismo, el requerimiento de cobertura incrementará desde las capitales principales a ciudades secundarias y terciarias durante el mismo plazo de ejecución de la regulación.

La puesta en marcha del sistema REP de empaques y envases en Colombia ha impactado el mercado existente en torno a los materiales que este gestiona y ha traído un aumento significativo en el número de actores que gestionan y transforman materiales. De acuerdo con Acoplasticos, entidad gremial colombiana que reúne a las empresas de las cadenas productivas químicas, la capacidad instalada de la industria del reciclaje se incrementó en un 40% entre 2019 y 2021. Así mismo, de acuerdo con la autoridad ambiental ANLA, el número de transformadores certificados en Colombia entre el año 2021 y 2023 es de 200, donde cerca del 40% de ellos realizaron su registro en el último año. Adicionalmente, contrario a lo que se observa en otros países con normatividades similares, la REP en Colombia ha traído consigo la creación de múltiples ORPs y planes individuales. Para finales de 2023, el número de ORPs acreditadas por la autoridad ambiental es de 56, mientras que se identifican 148 planes individuales. Vale la pena aclarar que el alto número de estos últimos podría fundamentarse en el hecho de que aquellos productores que omitieron la obligación en los primeros dos años de la política se inclinan por afiliarse a ORPs para el cumplimiento a futuro, pero se ven obligados a crear planes individuales para dar respuesta al requerimiento de años pasados. Es por ello que, considerando el análisis de la dinámica a futuro del sistema de REP en Colombia, el interés de este estudio se centra en los planes colectivos u ORPs.

3.2. Modelo de dinámica de sistemas

La dinámica de sistemas es una metodología apropiada para simular y examinar sistemas complejos y dinámicos (Sterman, 2010). Se ocupa principalmente de representar sistemas complejos bajo altos niveles de agregación en sus componentes, y considerando el impacto de políticas,

Alianza Circular © Copyright 2023

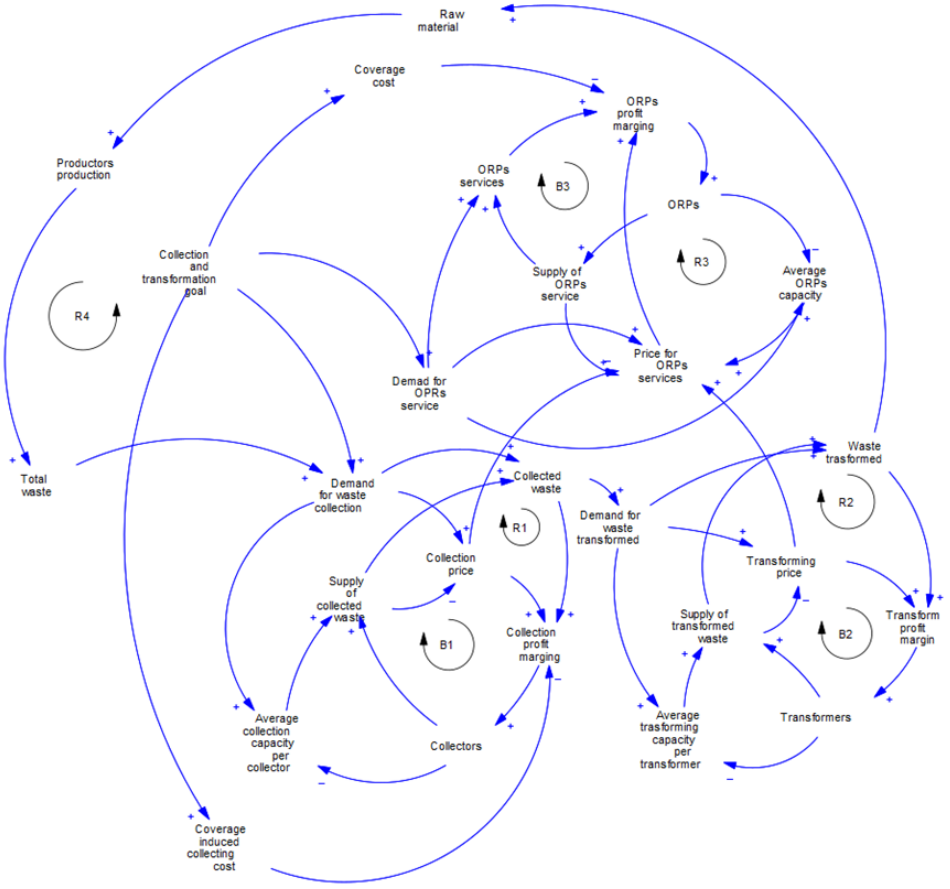
riesgos e incertidumbre en el desempeño futuro del sistema (Sterman, 2010). La dinámica usa diagramas causales para representar la estructuras de realimentación y retardos presentes en el sistema. La simulación permite la identificación del comportamiento de las variables en el futuro y su nivel de influencia (Rebs et al., 2019; Sterman, 2001). La dinámica de sistemas ha sido una herramienta útil para el modelamiento de mercados que se inspiran en la economía circular para la recolección de residuos (Ghosh et al., 2023). El uso de la metodología de dinámica de sistemas es ideal en el contexto del problema descrito anteriormente, ya que ésta destaca los principales componentes del sistema, describe las relaciones dinámicas entre las variables y permite la creación de escenarios que representan el impacto de la política en la estructura y el comportamiento del sistema.

3.2.1. Hipótesis dinámica

Una representación simplificada de la interacción dinámica de las variables se presenta a través del diagrama causal de la Figura 3. Este representa el mercado generado en torno a la valorización de residuos de empaques y envases. En él, interactúan los productores que ponen productos empacados y envasados en el mercado, los gestores que recogen los empaques y envases que son dispuestos como residuos una vez el producto es usado o consumido y los transformadores que reciben el material recolectado con el fin de valorizarlo a través de su transformación, bien sea como nuevos empaques y envases, otros productos o por recuperación energética. Adicionalmente, los cambios normativos asociados a la política de REP, generan la formación de organizaciones de productores (ORPs) que tiene el rol de integrador encargándose, en nombre de un grupo de productores, de cumplir la responsabilidad que cada productor adquiere respecto al volumen de empaques y envases puestos en el mercado. Ante el requerimiento de la política de que los productores certifiquen el cumplimiento de su obligación, las ORPs integran procesos que se llevaban a cabo previo a la imposición de la regulación. Este proceso de integración e intermediación financiado por los productores incentiva la creación de ORPs que identifican una oportunidad de negocio. Condiciones exógenas como la tasa actual de recolección, las metas de recolección y requerimientos de cobertura establecidos en la regulación, determinan los precios de los procesos así como las utilidades de los distintos actores, inciden en la creación o desaparición de

Figura 3

Diagrama causal de sistema REP de empaques y envases en Colombia



Alianza Circular © Copyright 2023

actores en el sistema y el logro de las metas de recolección. La simulación busca explicar el comportamiento de los precios que los productores pagan por pertenecer a las ORPs, además de los precios de transformadores y gestores. Se presta particular atención a la cantidad de ORPs y su comportamiento en el tiempo en la medida en que las condiciones normativas hacen más exigente el mercado, presionando los costos que asumen los gestores para mejorar su capacidad operativa en la cadena de abastecimiento, lo que afectaría el margen de utilidad de los organizaciones, transformadores y gestores.

En la Figura 3 se identifican los principales ciclos de realimentación de este sistema. La existencia del sistema depende esencialmente de la variable exógena *meta de recolección y transformación*, la cual representa el efecto de la normatividad que establece una meta de desechos a recolectar y transformar que aumenta cada año, iniciando en un 10% en 2021, hasta llegar a un máximo del 30% en 2030. La dinámica de auge y competencia de cada tipo de actor está representada por dos ciclos. Un ciclo de refuerzo que representa como la actividad económica de estos actores atrae a nuevos actores, y un ciclo de balance, que representa como el aumento competidores aumenta la oferta, disminuye el precio y disminuye el número de competidores. R1, R2 y R3, representan el incremento de los gestores, transformadores y ORPs, respectivamente. Los ciclos B1, B2 y B2, respectivamente, representan el efecto de la competencia en la disminución de estas firmas y en el control del precio y la oferta. La interdependencia de los tres actores está dada por el precio que los ORPs le deben pagar a los gestores y a los transformadores por sus respectivos servicios. Estos precios son afectados por la demanda establecida a partir de la meta de recolección, considerando que a mayores tasas de recolección requeridas, los costos para lograrlos crecen de forma no necesariamente lineal. Adicionalmente, el incremento en el requerimiento de cobertura a medida que avanza la implementación de la política genera costos adicionales para las ORPs. Así mismo, los transformadores dependen de la cantidad que recogen los gestores para hacer su transformación. Finalmente, el ciclo R4, muestra la meta de recolección, en donde el material recolectado, se transforma, para que parte de este retorne a los productores para ser usado nuevamente.

3.2.2.Formulación del modelo

Las ecuaciones del modelo en dinámica de sistemas tienen como objetivo ilustrar las relaciones cuantitativas entre variables dentro del sistema (Sterman, 2010). Estas proporcionan una representación agregada del mismo, permitiendo determinar sus posibles trayectorias de comportamiento dentro del horizonte temporal seleccionado. El modelado de la dinámica de sistemas implica tres tipos de variables: en primer lugar, los niveles que denotan existencias y acumulaciones, constituyendo las variables de estado del sistema. En segundo lugar, variables auxiliares que facilitan los cálculos entre los tres tipos de variables. Por último, constantes o parámetros, que permanecen invariables a lo largo del horizonte temporal elegido (Sterman, 2010). La tabla 1 enumera los niveles, variables y parámetros empleados en el modelo.

Tabla 1

Listado de los niveles, variables auxiliares y constantes en el modelo.

	Nivel
C	Gestores
T	Transformadores
PRO	Organizaciones de responsabilidad del productor
ACC	Capacidad promedio por Gestor
TC	Capacidad promedio de transformación
CC	Capacidad de certificación por PRO
PMG	Material de empaque generado
	Variables
OP	Oferta de capacidad de recolección
PMC	Margen de utilidad gestores
CS	Salida de gestores
OT	Oferta Capacidad de transformación
PMT	Margen de utilidad transformadores
OC	Oferta de certificación
CD	Demanda de certificados a PRO
PMO	Margen de utilidad PRO
CO	PRO que desaparecen
	Parámetros
tcPRO	Tiempo de cambio de PRO barrera de entrada
tcCC	Tiempo de cambio capacidad de certificación
tcT	Tiempo de cambio transformadores barrera de entrada
tcTC	Tiempo cambio capacidad de transformación innovación tecnológica
tcC	Tiempo cambio gestores barrera de entrada
tcACC	Tiempo cambio capacidad recolección innovación tecnológica
gew	Efecto crecimiento anual desechos
r	Aleatorio
eh	Efecto de la cobertura en la salida PROs
PROCc	PROs que son gestores
ppc	Porcentaje de pago a gestor
gdr	Tasa de disminución de generación
GR	Tasa de crecimiento generación de desechos
	Funciones Graph
G	Meta de recolección definida por la ley
EG	Efecto de la meta en el costo
PG	Porcentajes planes colectivos con cobertura

Alianza Circular © Copyright 2023

Las ecuaciones del modelo están representando un mercado de ERP que será simulado en un horizonte temporal de 17 años (período 2023-2040). Este horizonte contiene la situación actual, las metas de recolección que se estarán implementando hasta el año 2030, y se incluyen 10 años que permitan observar el impacto de las políticas. El paso de simulación elegido corresponde a una semana que es el período de recolección y consolidación de material más usado.

La formulación del modelo comienza con la definición de las ecuaciones de los tres actores principales del mercado y sus respectivas capacidades de producción. La ecuación (1) modela el número de PROs en el mercado. Este número es afectado positivamente por la cantidad de PRO atraídos por el margen de utilidad de esta actividad, y negativamente por la cantidad de PRO que salen del mercado por no poder cumplir las metas de cobertura de recolección. La atracción de nuevos PROs se modela como la cantidad actual de PROs multiplicando el margen de utilidad. Esta representación es semejante a la utilizada por Sterman (2010). Tanto la cantidad de PRO entrantes como salientes están divididos por el tiempo de entrada o salida del mercado *tccPRO*, el cual representa las barreras de entrada y salida del mercado.

$$PRO_{(t)} = \int_{t_0}^{t} \left(\frac{PRO * PMO - CO}{tcPRO}\right) dt + PRO_{(0)} \quad Companies \quad (1)$$

La ecuación (2) modela la capacidad de producción promedio del servicio de certificación por parte de los PROs, denominada CC. El cambio en esta variable se presenta por la diferencia promedio entre la demanda y la oferta de servicios de certificación dividida por un tiempo de ajuste de esta capacidad.

$$CC_{(t)} = \int_{t_o}^{t} \left(\frac{CD - OC}{PRO * tcCC}\right) dt + CC_{(0)} \quad \frac{Tons}{Week \times Companies} \quad (2)$$

El número de transformadores están modelados por el nivel T a través de la ecuación 3. El incremento de los transformadores se presenta considerando el margen de utilidad de esta actividad dividido por un tiempo de ajuste, que también modela las barreras de entrada y salida del mercado.

$$T_{(t)} = \int_{t_o}^{t} \left(\frac{T * PMT}{tcT}\right) dt + T_{(0)} \quad Companies \quad (3)$$

La capacidad promedio de transformación TC está dada por la ecuación (4). Al igual que la ecuación (2), TC está dada por la diferencia promedio entre la demanda y oferta de los servicios de transformación dividida por un tiempo de ajuste.

$$TC_{(t)} = \int_{t_o}^{t} \left(\frac{CD - OT}{T * tcTC}\right) dt + TC_{(0)} \quad \frac{Tons}{Week \times Companies} \quad (4)$$

La cantidad de gestores en el modelo está dada por el nivel G que se modela a través de la ecuación (5). La estructura de la ecuación es semejante a la de la ecuación (1).

$$G_{(t)} = \int_{t_o}^{t} \left(\frac{G * (PMC - CS)}{tcG}\right) dt + G_{(0)} \quad Companies \quad (5)$$

La capacidad promedio de recolección de los gestores ACC, se modela mediante la ecuación (6), y su estructura es igual a la de las ecuaciones (2) y (4).

$$ACC_{(t)} = \int_{t_o}^{t} \left(\frac{CD - OP}{G * tcACC}\right) dt + ACC_{(0)} \quad \frac{Tons}{Week \times Companies} \quad (6)$$

La ecuación (7) modela la cantidad de desechos generados PM. Esta depende de la cantidad actual de desechos multiplicado una tasa de generación de desechos.

$$PMG_{(t)} = \int_{t_o}^{t} (PMG * GR)\, dt + PMG_{(0)} \quad \frac{Tons}{Week} \quad (7)$$

El modelamiento de los precios de certificación, recolección, transformación y márgenes de utilidad son semejantes para los tres actores. La ecuación (8) muestra que el modelamiento de los precios se presenta como una relación entre la demanda y la oferta, multiplicado por el precio base. La ecuación del margen de utilidad está dada por la expresión (9).

$$Price = Baseprice * \left(\frac{Demand}{Supply}\right) \quad \frac{USD}{Ton} \quad (8)$$

Alianza Circular © Copyright 2023

$$ProfitMargin = \left(\frac{Revenue - Expense}{Revenue}\right) \quad Adimentional \quad (9)$$

La meta de recolección G descrita en la ecuación 10, representa la meta que según la normatividad Colombiana va a cambiar año a año como lo muestra el vector desde el 14% en el año actual hasta el 30%. Esta meta es un porcentaje con unidades adimensionales.

$$G = GRAPH\left(Time; \Delta t;\ t0; \begin{Bmatrix} 0{,}14; 0{,}16; 0{,}18; 0{,}20; \\ 0{,}22; 0{,}24; 0{,}27; 0{,}3; 0{,}30 \end{Bmatrix}\right) \quad (10)$$

El impacto esperado que las exigencias de cobertura tendrán en los PROs EG se describe mediante la ecuación (11). La función graph estaría modelando el % de PROs que se estima saldrían a medida que se están exigiendo mayores niveles de cobertura.

$$EG = GRAPH(G; 0{,}14; 0{,}01; \{Y(G)\}) \quad Adimentional \quad (11)$$

El porcentaje de planes colectivos que sí cumplen con las condiciones de cobertura estan representados por la variable PG calculada mediante la ecuación 12.

$$PG = (1 - EG) \quad Adimentional \quad (12)$$

3.2.3. Definición de escenarios

La información usada para correr el modelo proviene de diversas fuentes. El número actual de PROs y transformadores así como sus características fue suministrado por la autoridad nacional de licencias ambientales (ANLA). Por su parte, el número inicial de gestores es calculado de forma aproximada luego de revisar los censos de recicladores de ciudades como Pasto, Bogotá, Bucaramanga, Villavicencio e Ibagué, donde este valor, aunque busca acercarse a la realidad, está afectado por el nivel de informalidad que se presenta en el sector y además, que muchos de los censos revisados son de años anteriores.

El nivel de generación de residuos se obtiene de World Wide Fund For Nature (WWF), organización independiente dedicada a la conservación del medio ambiente y que en febrero de 2023 reporta 700.500 toneladas de envases y empaques plásticos generados en Colombia anualmente. (World Wildlife Fund, 2023). A partir de este valor, se calculan las capacidades promedio de gestores, transformadores y PROs según la información previamente mencionada

Los experimentos consideran tres escenarios diferentes. El primer escenario, **E1: *escenario base*** se construye con la información y valores de los parámetros actuales obtenidos para construir la instancia. El segundo escenario denominado **E2: *Cost function increase,*** corresponde al caso en el cual el costo de recolección del material incrementa a medida que se implementa la política debido a los requerimientos adicionales de cobertura que esta impone gradualmente, así como a la presión que supone la necesidad de mayores tasas de recolección. El tercer escenario, **E3: Generation decrease**, modela la reducción esperada en la generación de material de empaque a partir de la introducción de la política REP. Esta reducción se espera como consecuencia de la adopción por parte de los productores de estrategias de eco-diseño o prácticas de economía circular como la retornabilidad y el reuso. Para configurar este escenario se plantea una reducción de un 20% de los desechos en un lapso de 17 años.

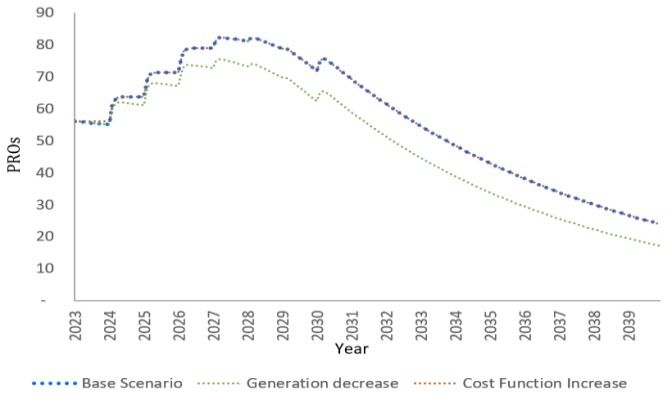
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las simulaciones presentadas a continuación corresponden a la posible evolución del mercado de REP colombiano considerando los incrementos en las metas de recolección y trasformación de residuos para los tres escenarios definidos

La evolución del número de organizaciones de productores se presenta en la Figura 4. El escenario base muestra que, dadas las condiciones actuales, se acentúa la característica del sistema de tener un número alto de PROs. Estas organizaciones pasarían de 56 a un número de cercano a las 80. El incremento se da de manera escalonada de acuerdo a la forma en que se incrementa la demanda hasta el año 2030. Cuando la demanda de recolección es fija, y los efectos regulatorios que demandan un incremento en costos y en coberturas, el número de PROs comienza a decaer de forma sostenida. Para el escenario de disminución de la generación, E2, se evidencia que, al decrecer la cantidad de residuos generados, disminuye el número de PROs soportado en el hecho de que el único factor que hace crecer el número de estas organizaciones son las metas crecientes de demanda hasta el año 2030. En cuanto al escenario en el cual se incrementan los costos, E3, este factor no tiene un efecto adicional en el número de PROs, lo cual puede deberse al hecho de que dicho incremento se transfiere hacia los productores desde las PROs por lo que no desincentiva la creación de estas.

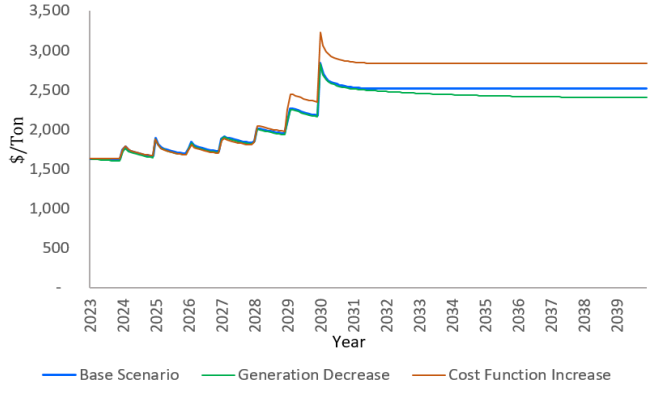
Alianza Circular © Copyright 2023

Figura 4
Número de PROs



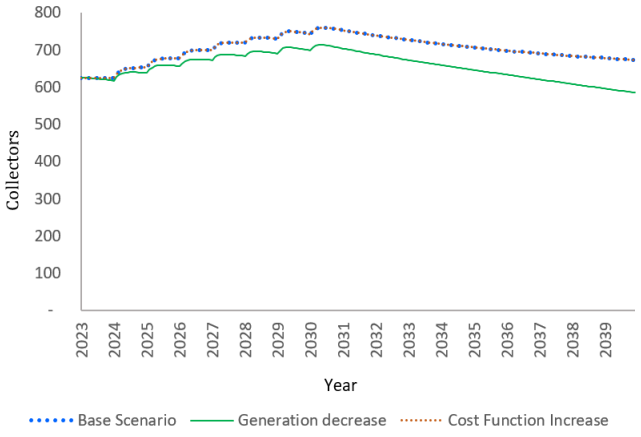
En la Figura 5 se presenta la evolución del costo de certificación que considera el precio de recolección y transformación bajo los tres escenarios mencionados anteriormente. En el escenario base se aprecia como el precio tiene una tendencia creciente y escalonada a partir de los aumentos en las demandas de recolección. Sin embargo, después del incremento se hace un ajuste por la naturaleza competitiva del mercado. El comportamiento del precio en un escenario de desechos decrecientes, E3, es similar al del escenario base, no obstante, la disminución del material a recolectar disminuye los precios. En el escenario de incremento de costos, E2, se presenta el precio más alto en virtud de que los costos de producción son los más altos y estos son transferidos al productor.

Figura 5
Costos de certificación



Bajo los tres escenarios también se evalúan el comportamiento del número de gestores según se ilustra en la Figura 6. La simulación muestra que en los tres escenarios hay una caída en el número de gestores después de cumplida la meta máxima de recolección en el año 2030. Sin embargo, en el escenario de la disminución de desechos la caída se observa de una manera más pronunciada. Este decrecimiento observado en los tres escenarios se debe a la naturaleza competitiva del mercado, además del hecho de muchos de los PROs salientes también son a su vez gestores. En un escenario de decrecimiento de desechos, el decrecimiento de gestores se presenta de una manera más pronunciada, pues son ellos los que reciben el impacto de no contar con más material a recolectar.

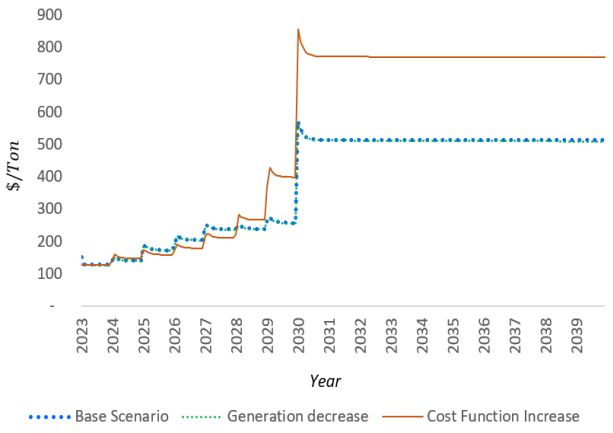
Figura 6
Número de gestores



El precio de recolección en la Figura 7, presenta que el escenario E1 y E3 presentan el mismo comportamiento, mientras que en el escenario E2, incremento de la función de costo, los niveles máximos alcanzados son mayores, como se esperaba, mostrando saltos más abruptos en el costo cerca de 2030. Si se compara el número de gestores y el precio de recolección se observa que, en el escenario de caída de producción de material de empaque, E2, a pesar de una mayor salida de gestores luego de 2030, el precio permanece constante dado que la oferta de material recolectado es suficiente para mantener el precio.

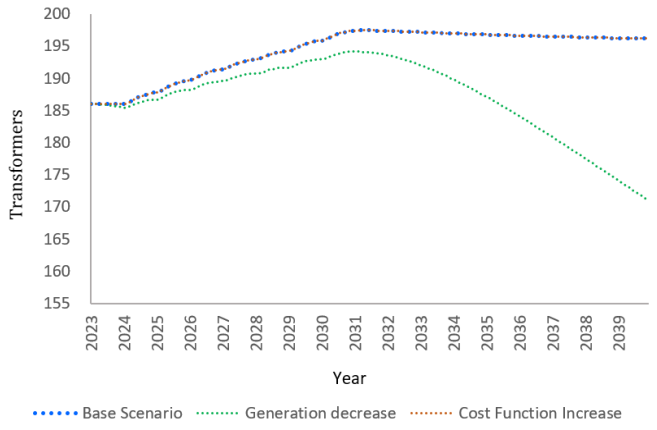
Alianza Circular © Copyright 2023

Figura 7
precio de recolección



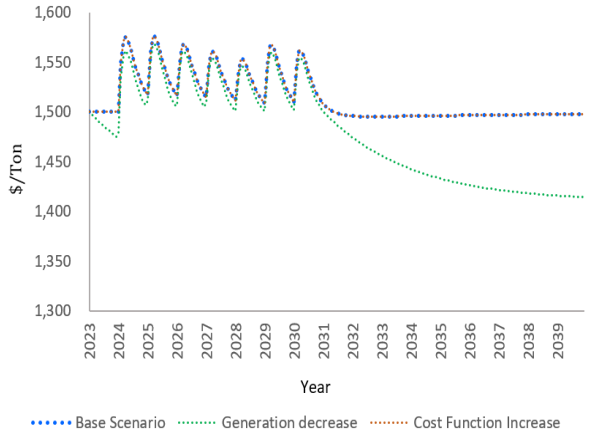
Finalmente, bajo los tres escenarios se evalúa el número de transformadores, presentado en la Figura 8. Sólo en el escenario en el que hay una caída en el material a ser recolectado y transformado, E3, se presenta una disminución del número de transformadores.

Figura 8
Número de transformadores



Con respecto al precio de transformación, en la Figura 9 se observa como los incrementos en la demanda inciden en el aumento del precio sin el efecto de escalonamiento que tiene el precio de la certificación y la recolección. Esta situación es ocasionada por el hecho de que el transformador tiene unas barreras de entrada en tiempo y dinero más altas que los gestores y PROs. El precio de transformación sólo se ve afectado por la dinámica entre la demanda y la oferta, pues los costos por cobertura que deben asumir gestores y PROs no inciden en él.

Figura 9
Precio de transformación



4.1. Statistical Screening y análisis de sensibilidad

El statistical screening es una técnica empleada en dinámica de sistemas para determinar los parámetros o constantes que más influyen en un modelo de dinámica de sistemas. Este método se basa en el análisis del coeficiente de correlación entre los parámetros de entrada y la variable de salida de interés en el horizonte temporal de la simulación (Ford & Flynn, 2005). De cada parámetro o constante se quiere analizar su impacto en la variable respuesta. Para esto se determinan los rangos de incertidumbre que constituyen los posibles valores que podría tener estos parámetros, los cuales se presentan en la Tabla 2. La variable respuesta elegida corresponde al número de PROs y la finalidad última del análisis es encontrar los parámetros que más inciden en esta cantidad.

Tabla 2
Variables de entrada de interés y rangos de incertidumbre

Caso base	unidad	Rangos de incertidumbre
tcPRO = 4	Week	Uniform (4; 26)
tcCC = 108	Week	Uniform (86; 129)
tcT = 156	Week	Uniform (126; 186)
tcTC = 24	Week	Uniform (12; 48)
tcC = 24	Week	Uniform (12; 48)
tcACC = 12	Week	Uniform (6; 24)
eh = 0,3	adimensional	Uniform (0,2; 0,6)
ppc = 1	adimensional	Uniform (0,8; 1,2)
gdr = 1	adimensional	Uniform (0,8; 1,2)
PROCc = 0,7	adimensional	Uniform (0,3; 0,7)

Alianza Circular © Copyright 2023

En la Figura 10 presenta el resultado del statistical screening que se compone de las gráficas de la variación de los coeficientes de correlación con la variable respuesta. En ella se omitieron aquellos parámetros para los cuales su coeficiente de variación es constante entre el rango -0.5 y 0.5. Valores de parámetros cuyo coeficiente de correlación estén por encima de 0.5 y se aproximen a uno tienen un impacto positivo en el número de PROs. Lo opuesto sucede con valores por debajo de - 0.5, que se aproximen a -1. A continuación se explican los efectos de los parámetros que tienen más incidencia en el número de PROs.

Efecto de la cobertura en la salida PROs (eh): Este parámetro presenta una correlación negativa durante el primer año de simulación, desestimulando la entrada de nuevos PROs antes de que ocurra el primer aumento en las metas de recolección establecidas por la norma. Cuando comienzan a subir las metas de recaudo se convierte positivo, pero continúa teniendo un impacto modesto. Cuando los costos se suben drásticamente debido a las presiones de cobertura de recolección este parámetro es determinante en la salida de planes colectivos.

Tiempo de cambio (acceso y salida) de PRO barrera de entrada (tcPRO): Este parámetro representa la barrera para la entrada y salida de un PRO. Es un parámetro crítico puesto que representa la facilidad para entrar y salir del mercado, y que según el análisis tiene un impacto significativo en el número de PROs.

Tiempo de cambio capacidad de certificación (tcCC): Este parámetro representa el tiempo que tardan las PROs existentes en aumentar su capacidad de certificación, dada la oferta de material certificable en el mercado. Tiene correlación positiva fuerte a partir del segundo año de simulación, situación que puede ser explicada debido a que una demora en el ajuste de capacidad de cada PRO se traduce en que los demás tienen menos competencia en el mercado, lo que incentiva la aparición de nuevos PRO.

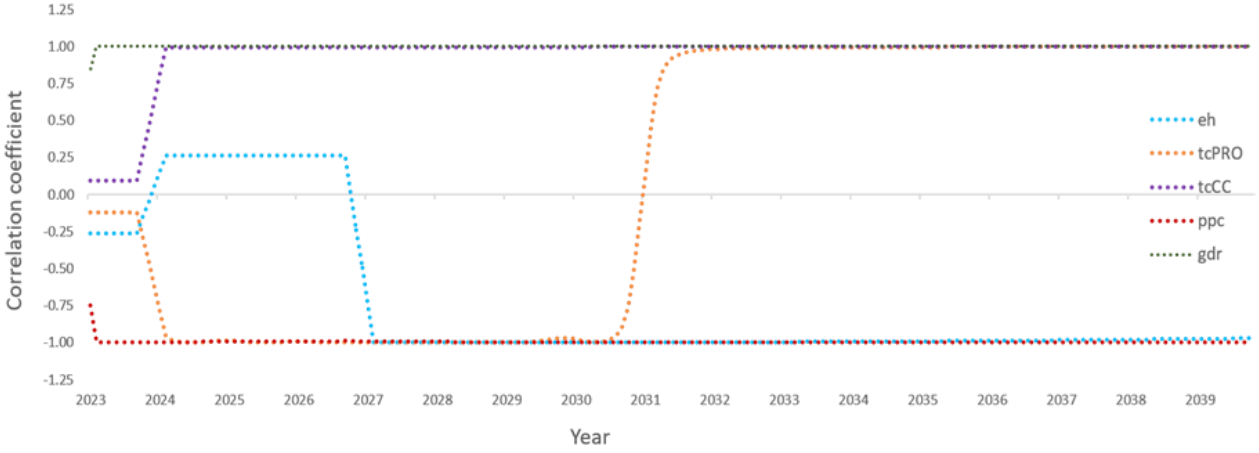
Porcentaje de pago a gestor (ppc): Este parámetro representa el nivel de integración vertical o colusión que existe entre los PROs y los gestores. Un valor de 1 en este parámetro indica 0% colusión. Un valor de 0 en este parámetro indica 100%. Si ambos están integrados de forma que se comparten los costos esto incide en el aumento del margen de utilidad y por ende en el aumento de más PROs. Un nivel menor de este parámetro incide en el número de PROs.

Tasa de generación(gdr): Este resultado implica que a más demanda de material a reciclar más PROs.

Para los dos parámetros que más afectan la salida de PROs del mercado (i.e., Efecto de la cobertura y Porcentaje de pago a gestor) se realiza el análisis de sensibilidad. La Figura 11 de la parte izquierda muestra el impacto que tiene el parámetro porcentaje de pago al gestor (ppc). El análisis indica que en la medida en que el PRO y el gestor sean una misma entidad las utilidades del negocio generan la atracción de nuevos PROs, y de esta manera se espera que a medida que las metas de recolección de desechos sigan lo establecido por la ley, muchos PROs entrarían al mercado. De hecho, el análisis de sensibilidad muestra que podría existir un caso en el cual el número de PROs no disminuyera, sino que se mantuviera constante al alcanzar la meta máxima de recolección y transformación. En la Figura 11 de la parte derecha se muestra el impacto que la exigencia de cobertura (eh) tendría en la salida de PROs. Los resultados muestran que el número de PROs disminuiría en todos los escenarios de aumento de costos por cobertura. Sin embargo, el número de PROs salientes dependería de la magnitud del costo de cobertura.

Figura 10

Resultados de Statistical Screening



Alianza Circular © Copyright 2023

Figura 11
Sensitivity analysis of ppc parameter on the number of PROs

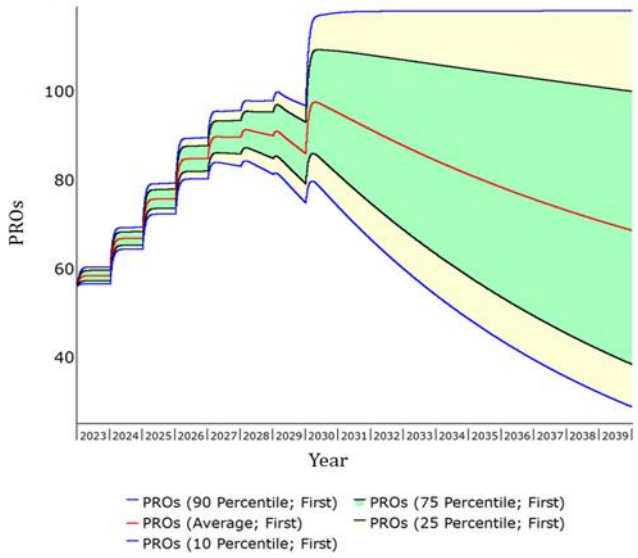
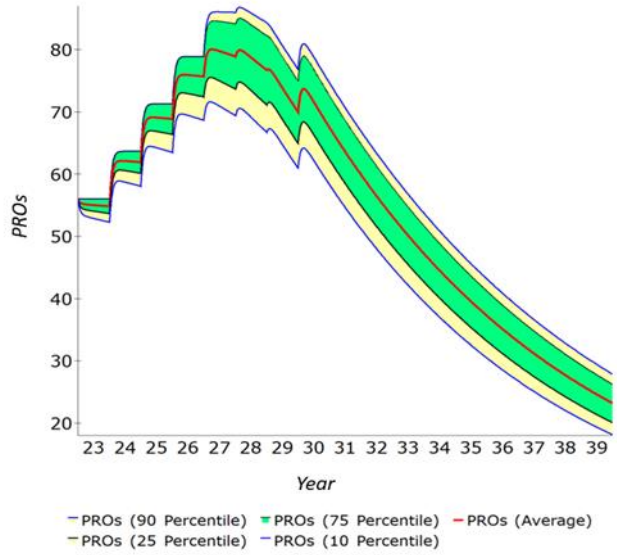


Figura 12
Sensitivity analysis of eh parameter on the number of PROs



4.2 Discusión

Tal como se expuso en la hipótesis dinámica, la variable endógena *meta de recolección y transformación* tiene un efecto marcado en el número de PROs, gestores, precios de recolección y transformación además de en los costos y demanda de certificación. En todos los casos existen cambios marcados en la tendencia que se pueden explicar por los incrementos en la meta según la demanda impuesta por la normatividad. Este resultado es similar a lo encontrado por Kuo *et al.* (2021), quien halló que al fijar las tasas de recolección y reciclaje, se modifican los picos de reciclaje alcanzados en los sistemas REP. Además, se coincide con Kuo *et al.* (2021), pues encuentran que la disminución del costo se asocia con un decrecimiento del número de fondos de REP que aumentan su capacidad de producción. En el presente trabajo se relaciona el aumento en la capacidad de recolección de los gestores para llegar a zonas de difícil acceso con incremento en el costo, pero al ser un mercado competitivo, este es un factor que elimina a los oferentes (PROs) incapaces de competir por costo, lo que indirectamente estaría indicando una situación similar a la expuesta por Kuo et al (2021).

Un elemento que evalúa Peng *et al.* (2019), y se obvia en este documento, es la cantidad de productores que se acogen plenamente a la normatividad. Peng *et al.* (2019) encuentra que mayor supervisión por parte de los estados al cumplimento normativo de los productores, se genera mejor desempeño en los esquemas de REP, conclusión similar a la que llega Tu *et al.* (2020), quien indica que los productores evitaran dar cumplimento a los esquemas REP si no se tienen sanciones administrativas. Este trabajo obvia este elemento y asume en la variable *meta de recolección y transformación* toda la responsabilidad en la generación de la demanda, como si todos los productores estuvieran dispuestos a cumplir inmediatamente con la normatividad cada vez que se incrementa el valor de la variable, por lo que para trabajos futuros se debería incluir este tipo de vigilancia y sanciones.

Según los análisis realizados a partir del modelo bajo dinámica de sistemas, la anomalía del gran número de PROs que tiene Colombia obedece a dos factores fundamentales: la rentabilidad y las barreras de entrada. Un porcentaje de los PROs son también gestores. La normatividad colombiana actualmente no tiene ninguna regulación sobre el porcentaje de integración de PROs y gestores permitido. Esta integración vertical permite que los costos del PROs sean fundamentalmente asumidos por el gestor y, en este sentido, la actividad del PRO se torna más rentable, al recibir del productor el pago adicional por un servicio que el PRO puede transferir al gestor. El resultado es un nivel de margen de utilidad que ha atraído a más gestores, los cuales no se encuentran con unas barreras de entrada difíciles de superar. El pago del productor se ha convertido hasta cierto punto en un subsidio que permite la constitución de un mercado competitivo.

Lo que presenta la simulación es que a medida que las metas de cobertura de recolección y transformación de desechos aumenten, la rentabilidad irá disminuyendo así como la entrada de nuevos PROs. De hecho, lo que se muestra es que el escenario más probable es la disminución de planes colectivos en el mediano plazo. Sin embargo, y

Alianza Circular © Copyright 2023

esta es una consecuencia inesperada, la gran cantidad de planes que entraron, hace que después de la salida de muchos de éstos, el mercado continúe siendo competitivo y que los precios de los servicios de certificación, recolección y transformación no aumenten ante la salida de los PROs, los gestores y los transformadores.

La situación más inquietante y que requiere más análisis se presenta cuando la adopción de los principios de economía circular disminuye la cantidad de desechos a recolectar. En las simulaciones se aprecia como tal disminución acelera la salida de PROs, gestores y transformadores, esencialmente por que la oferta estará por encima de la demanda disminuyendo el margen de utilidad y la subutilización de la capacidad instalada. Este escenario muestra que el éxito de la política de REP también implica el colapso de esta industria.

5. CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS

El diseño y la aplicación de políticas como la responsabilidad ampliada del productor es un proceso complejo en el que intervienen muchas variables y actores. Las condiciones de cada país o región tienen un impacto importante en el desempeño de la política. En el caso de la política de REP de envases en Colombia, se evidenció cómo los parámetros de la política y las condiciones básicas del mercado generan la creación de múltiples organizaciones de productores, algo que no es tan frecuente en los sistemas implementados en otros países. En particular, el objetivo establecido por la política de REP así como su relación con los actores y el mercado existente para cierto tipo de materiales parecen ser los determinantes del comportamiento particular en Colombia.

Herramientas analíticas como la dinámica de sistemas son útiles para generar información que apoye la toma de decisiones y el diseño de políticas. Estas herramientas permiten modelar las condiciones particulares del contexto, así como simular escenarios del comportamiento futuro del mismo para delimitar mejor los elementos clave de la política tales como metas de desempeño, definición de roles de los actores, así como las interacciones entre ellos.

Aunque este trabajo ofrece una visión sistémica del caso colombiano, es importante señalar dos aspectos importantes en los que se puede ampliar el análisis mediante el uso de herramientas de apoyo a la toma de decisiones. En primer lugar, es importante entender mejor el impacto que tienen las REP con respecto al propósito de incentivar a los productores a adoptar prácticas de ecodiseño y economía circular y, por lo tanto, cómo estas prácticas impactan a los actores aguas abajo de la cadena como los gestores y procesadores. En segundo lugar, es interesante evaluar cómo influye el nivel de adopción de las REP por parte de los productores en el rendimiento del sistema. Tanto (Peng et al. 2019) como (Tu et al. 2020), encuentran que una mayor supervisión por parte de los estados del cumplimiento de la normativa por parte de los productores. Este sería un elemento interesante por considerar en un modelo que aborde no sólo la visión estratégica sino que incorpore un mayor nivel de resolución en cuanto a los productores.

6. RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen el apoyo del Sistema General de Regalías de Colombia en el marco del proyecto BPIN 2020000100497 "Alianza Circular, Mejoramiento de la gestión de empaques y envases a través de estrategias de economía circular en la industria de Antioquia".

7. BIBLIOGRAFÍA

Alianza Circular (2023). Empácalo Para Que Vuelva. Retrieved December 12, 2023, from https://www.alianzacircular.com/productos/publicaciones

ANLA. (2020). Plan Gestión Ambiental Residuos Envases y Empaques. https://www.anla.gov.co/01_anla/allcategories-es-es/261-tramites-y-servicios/tramites/permisos-y-autorizaciones/plan-gestion-ambiental-residuos-envaces-y-empaques

Castro, C. G., Trevisan, A. H., Pigosso, D. C. A., & Mascarenhas, J. (2022). The rebound effect of circular economy: Definitions, mechanisms and a research agenda. *Journal of Cleaner Production*, *345*, 131136. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.13113

Cempre. (2018). El ABC de la resolución 1407 de 2018. https://repository.cempre.org.co/bitstreams/74f73707-5215-46fe-aa91-bb3fdddf5f97/download

Chu, T., Zhong, Y., & Jia, W. (2023). Incorporating self-employed maintainers into WEEE formal recycling system: A system dynamic approach. *Journal of Environmental Management*, *345*. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118777

Destyanto, A. R., Kirana, P. S., & Ardi, R. (2019). Model conceptualization of system dynamics for evaluating extended producer responsibility strategy in plastic waste management policy in Indonesia. ACM International Conference Proceeding Series, 106–109. https://doi.org/10.1145/3364335.3364344

Dey, A., Dhumal, C. V., Sengupta, P., Kumar, A., Pramanik, N. K., & Alam, T. (2021). Challenges and possible solutions to mitigate the problems of single-use plastics

Alianza Circular © Copyright 2023

used for packaging food items: a review. *Journal of Food Science and Technology*, *58*(9), 3251–3269. https://doi.org/10.1007/s13197-020-04885-6

Ellen MacArthur Foundation. (2020). *What is a circular economy? | Ellen MacArthur Foundation. Retrieved December 12, 2023, from https://www.ellenmacarthurfoundation.org/es/temas/presentacion-economia-circular/vision-general*

Favot, M., Grassetti, L., Massarutto, A., & Veit, R. (2022). Regulation and competition in the extended producer responsibility models: Results in the WEEE sector in Europe. *Waste Management*, *145*, 60-71.

Ford, A., & Flynn, H. (2005). Statistical screening of system dynamics models. *System Dynamics Review*, *21*(4), 273–303. https://doi.org/10.1002/SDR.322

Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, *114*, 11–32. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007

Ghosh, T., Avery, G., Bhatt, A., Uekert, T., Walzberg, J., & Carpenter, A. (2023). Towards a circular economy for PET bottle resin using a system dynamics inspired material flow model. *Journal of Cleaner Production*, *383*, 135208.

He, L., & Sun, B. (2022). Exploring the EPR system for power battery recycling from a supply-side perspective: An evolutionary game analysis. *Waste Management*, *140*, 204–212. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.11.026

Kaza, S., Yao, L. C., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0

Kunz, N., Mayers, K., & Van Wassenhove, L. N. (2018). Stakeholder views on extended producer responsibility and the circular economy. *California Management Review*, *60*(3), 45-70.

Kuo, T.-C., Hsu, N.-Y., Wattimena, R., Hong, I.-H., Chao, C.-J., & Herlianto, J. (2021). Toward a circular economy: A system dynamic model of recycling framework for aseptic paper packaging waste in Indonesia. *Journal of Cleaner Production*, *301*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126901

Lombardi, M., Rana, R., & Fellner, J. (2021). Material flow analysis and sustainability of the Italian plastic packaging management. *Journal of Cleaner Production*, *287*, 125573.

OECD. (2001). *Extended Producer Responsibility: A Guidance Manual for Governments*. OECD. https://doi.org/10.1787/9789264189867-en

OECD. (2016). *Extended Producer Responsibility: Updated Guidance for Efficient Waste Management*. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/9789264256385-en

Peng, B., Wang, Y., Elahi, E., & Wei, G. (2019). Behavioral game and simulation analysis of extended producer responsibility system's implementation under environmental regulations. *Environmental Science and Pollution Research*, *26*(17), 17644–17654. https://doi.org/10.1007/s11356-019-05215-w

Ramasubramanian, B., Tan, J., Chellappan, V., & Ramakrishna, S. (2023). Recent Advances in Extended Producer Responsibility Initiatives for Plastic Waste Management in Germany and UK. Materials Circular Economy, 5(1), 6.

Rebs, T., Brandenburg, M., & Seuring, S. (2019). System dynamics modeling for sustainable supply chain management: A literature review and systems thinking approach. *Journal of Cleaner Production*, *208*, 1265–1280. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.100

Rojas, T. (2023). Pacto por los Plásticos en Colombia: acelerando la economía circular del plástico. https://www.plastico.com/es/noticias/pacto-por-los-plasticos-en-colombia-acelerando-la-economia-circular-del-plastico

Salhofer, S., Steuer, B., Ramusch, R., & Beigl, P. (2016). WEEE management in Europe and China–A comparison. *Waste Management*, *57*, 27-35.

Sterman, J. (2010). *Business dynamics*. Irwin/McGraw-Hill c2000.

Sterman, J. D. (2001). System Dynamics Modeling: Tools for Learning in a Complex World. *California Management Review*, *43*(4), 8–25. https://doi.org/10.2307/41166098

Tian, G., Liu, X., Zhang, M., Yang, Y., Zhang, H., Lin, Y., Ma, F., Wang, X., Qu, T., & Li, Z. (2019). Selection of take-back pattern of vehicle reverse logistics in China via Grey-DEMATEL and Fuzzy-VIKOR combined method. *Journal of Cleaner Production*, *220*, 1088–

Alianza Circular © Copyright 2023

1100. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.086

Tu, Y., Peng, B., Wei, G., & Wu, W. (2020). EPR system participants' behavior: Evolutionary game and strategy simulation. *Journal of Cleaner Production*, *271*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122659

World Wildlife Fund. (2023). *WWF se une al Pacto por los Plásticos en Colombia | WWF*. Retrieved December 13, 2023, from https://www.wwf.org.co/en/?381452/WWF-se-une-al-Pacto-por-los-Plasticos-en-Colombia

Xu, Z. (2010). System dynamics model of the third party take-back system for e-waste. *2010 7th International Conference on Service Systems and Service Management, Proceedings of ICSSSM' 10*, 332–337. https://doi.org/10.1109/ICSSSM.2010.5530220

Zheng, X.-X., Chang, C.-T., Li, D.-F., Liu, Z., & Lev, B. (2022). Designing an incentive scheme for producer responsibility organization of waste tires: A MCGP cooperative game approach. *Computers and Industrial Engineering*, *167*. https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108009

Alianza Circular © Copyright 2023