

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente

Reconocimiento de validez oficial de estudios de nivel superior según acuerdo secretarial
15018, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 29 de noviembre de 1976.

Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE PRODUCTOS Y PROCESOS



DESARROLLO DE METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE REDISTRIBUCIÓN DE RESIDUOS EN UN ECOSISTEMA DE ECONOMÍA CIRCULAR REGIONAL

Trabajo para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERÍA DE PRODUCTOS Y PROCESOS

Presentan: Ing. Aída Sofía Vargas Franco

Tutor: Dr. Carlos González Figueredo

San Pedro Tlaquepaque, Jalisco. diciembre de 2022.

Tabla de contenidos

DESARROLLO DE METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE REDISTRIBUCIÓN DE RESIDUOS EN UN ECOSISTEMA DE ECONOMÍA CIRCULAR REGIONAL	1
Resumen	4
Abstract	5
1. Fundamentación del trabajo.....	6
1.1. Identificación y caracterización del problema a atender	6
1.2. Contexto de la propuesta de intervención	7
1.2.1. Contexto de la región de intervención	7
1.2.2. Contexto de la industria Cañera en la Región.....	11
1.2.3. Análisis causa-efecto.....	12
1.3. Objetivos de la intervención	14
1.4. Delimitaciones y área funcional por intervenir	14
1.5. Justificación y pertinencia del trabajo	15
2. Marco conceptual o de referencia	17
2.1. Estado de la cuestión	17
2.2. Conceptos y enfoques teóricos relacionados	18
2.3. Herramientas tecnológicas o de innovación consideradas en el trabajo.....	20
3. Estrategia metodológica o de intervención	21
3.1. Justificación de la estrategia metodológica o de intervención	21
3.2. Muestra o sujeto de investigación.....	23
3.3. Etapas del proceso	28
3.3.1. Cronograma de trabajo.....	28
3.3.2. Problemáticas para llevar a cabo el proceso de aplicación	29
3.4. Metas de información.....	29
4. Exposición de hallazgos	30
4.1. Organización de la información obtenida.....	30
4.2. Impacto de la estrategia en la solución del problema.....	35

4.2.1. Alineación con la estrategia general del contexto de aplicación dentro del PAP EECRV	36
5. Discusión final	37
5.1. Recomendación de Intervenciones subsecuentes.....	37
5.2. Relevancia y trascendencia disciplinaria del caso.....	38
Referencias bibliográficas.....	39
Índice de materias.....	42
Índice de figuras.....	43
Índice de tablas	43
Índice de siglas	43

Resumen

Se desarrolló una metodología para el análisis de redistribución de residuos, tomando como caso de estudio el sistema de la Industria Cañera de la Región Valles, Jalisco, con el objetivo de evaluar los posibles escenarios de redistribución dentro de un ecosistema de economía circular regional. Para ello se modeló de forma dinámica el sistema Cañero y se elaboró una herramienta de análisis que permitió realizar una optimización multiobjetivo con algoritmos evolutivos buscando minimizar el indicador de linealidad de flujo de redistribución propuesto, así como los costos de redistribución.

Se evaluaron 4 escenarios, uno inicial en donde todo el bagazo se destinó a la generación de vapor, un segundo escenario hipotético de redistribución a dos unidades de proceso adicionales y un tercer y cuarto escenario en el que se modificaron las eficiencias de los procesos en los que sería utilizado el residuo. Con esta evaluación se encontró como el indicador de linealidad disminuye si se redistribuyen los residuos a unidades cuyos procesos sean más sostenibles y eficientes.

Con la implementación de la metodología y el análisis de los resultados del caso de estudio se reitera la pertinencia y relevancia del desarrollo de estrategias con base cuantitativa para instaurar ecosistemas de economía circular regional; teniendo como oportunidades de mejora y seguimiento de este desarrollo afinar la programación de las herramientas y complementando la interfaz del usuario estableciendo una base de datos gráfica que permita visualizar el modelo dinámico del sistema, así como las interacciones en la redistribución y formación del ecosistema circular.

Palabras clave: Economía Circular, Indicador de linealidad de flujo, optimización multiobjetivo, algoritmos evolutivos, redistribución de residuos, industria cañera.

Abstract

A methodology for the analysis of waste redistribution was developed, taking as a case study the Sugarcane Industry system of the Valles Region in Jalisco. This was with the aim of evaluating possible redistribution scenarios within a regional circular economy ecosystem. For the implementation, the Cañero system was dynamically modeled and an analysis tool, that allowed a multi-objective optimization to be carried out with evolutionary algorithms, was developed, seeking to minimize the proposed redistribution flow linearity indicator, as well as the redistribution costs.

Four scenarios were evaluated, an initial one where all the bagasse was used for steam generation, a second hypothetical scenario of redistribution to two additional process units, and a third and fourth scenario in which the efficiencies of the processes, in which the waste is use, were modified. With this evaluation, it was found how the linearity indicator decreases if waste is redistributed to units whose processes are more sustainable and efficient.

With the implementation of the methodology and the analysis of the results of the case study, the relevance and pertinence of the development of quantitative-based strategies to establish regional circular economy ecosystems is reiterated; having as opportunities for improvement and subsequent works of this development, fine-tuning the code and complementing the user interface by establishing a graphic database that allows the visualization of the dynamic model of the system, as well as the interactions in the redistribution and conformation of the circular ecosystem.

Keywords: Circular Economy, flow linearity indicator, multi-objective optimization, evolutionary algorithms, waste redistribution, sugarcane industry.

1. Fundamentación del trabajo

1.1. Identificación y caracterización del problema a atender

Se tiene la visión, desde algunos sectores productivos en México, de que el crecimiento económico conlleva una degradación ambiental implícita que no puede ser evadida y por tanto no es prioritaria. También se encuentran los sectores que visualizan como inherente al gobierno la falta de atención por parte de instancias privadas a este aspecto, así como la problemática de saturación de vertederos e insuficiente logística en la recolección y disposición de residuos sólidos [1]. Otra vertiente, es la perspectiva de las comunidades que reclaman la restitución del daño a su entorno al verse afectado tanto por la presencia de sitios de disposición final de residuos, como por la escasez de recursos naturales a consecuencia de modelos productivos y sociales que no los contemplan como afectados por estas dinámicas de uso de recursos y disposición de residuos.

Dentro del sistema de múltiples actores e intereses que se esboza, el problema fundamental que concierne a este trabajo se representa por una gestión integral deficiente de los residuos a nivel regional, además de la carencia de estrategias que permitan una comunicación eficiente entre los generadores de residuos y las unidades productivas que pueden utilizarlos como insumos. Lo anterior, se debe en primera instancia, a la gran cantidad de residuos que se generan, tanto urbanos como especiales, y a la consecuente sobrecapacidad de los sitios de disposición y sistemas de recolección e información de la generación de residuos, que no cumplen con los requerimientos para su gestión.

Esta problemática se encuentra dentro del sistema de generación de residuos sólidos municipales y regionales. En Jalisco, el Instituto de Información Estadística y Geográfica, IIEG, agrupa en 12 regiones a los municipios del estado. Para delimitar la problemática, se seleccionó la Región Valles, en el estado de Jalisco, como ámbito del trabajo tomando como eje central de análisis la Industria Cañera dentro de esta zona de estudio.[2]

La selección de esta región se realiza debido a que en ella se producen grandes volúmenes de residuos agroindustriales anualmente, teniendo como principales fuentes el sistema de la Industria Cañera, el de la Industria Tequilera y la agricultura y ganadería en general. De estos sistemas, en particular la Industria Cañera cuenta con una mejor sistematización y accesibilidad a los datos de siembra, procesamiento y producción, por lo que se delimitó el desarrollo a este caso de estudio.

1.2. Contexto de la propuesta de intervención

El presente proyecto de aplicación surge dentro del marco de trabajo en el ITESO para el desarrollo de ecosistemas de economía circular regional. Se encuentra vinculado al Proyecto de Aplicación Profesional (PAP) que lleva por nombre “Ecosistema de Economía Circular en la región Valles”, en el que se tiene como objetivo general la implementación de un ecosistema de economía circular (EEC) en esta región de Jalisco. Ecosistema dentro del cual se busca una forma en la que todas las unidades económicas trabajen en conjunto para lograr un beneficio colectivo a partir del intercambio de materiales donde los desechos de una unidad de productiva puedan ser utilizados en otra.

1.2.1. Contexto de la región de intervención

La Región Valles, ubicada en el estado de Jalisco, (Figura 1) comprende 14 municipios, Ahualulco del Mercado, Amatitán, Ameca, San Juanito de Escobedo, San Martín Hidalgo, El Arenal, Etzatlán, Cocula, Hostotipaquillo, Magdalena, San Marcos, Tala, Tequila y Teuchitlán; con una superficie de 5,998 km². La población en la región ascendía a 316,993 habitantes en el 2015 con una proyección al 2020 de 332,423 habitantes[3], [4].

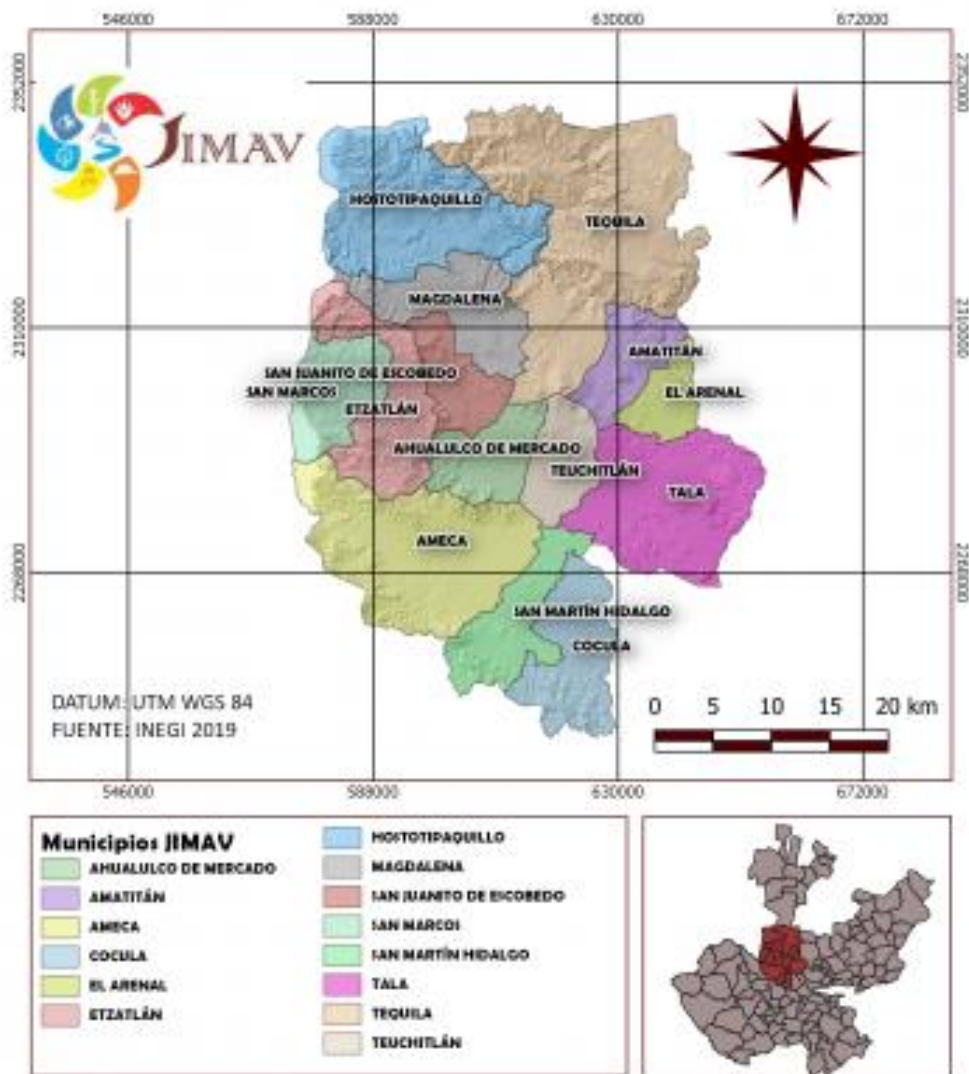


Figura 1. Región Valles, Jalisco.

(Fuente: JIMAV, Junta Intermunicipal de Medio Ambiente para la Gestión Integral de la Región Valles)

Dentro de los municipios destacan Ameca, Tala y Tequila con la población más numerosa y, por ende, la mayor generación de residuos sólidos urbanos (RSU) con 213,071 ton/día en conjunto, que representan el 62.8% de los residuos de la región [5].

De acuerdo con el Censo publicado en 2019 del INEGI, se estima que en México diariamente se recolectan 107,055,547 kg de residuos sólidos urbanos; en Jalisco el porcentaje de cobertura de recolección es del 94% y asciende a 7,961,000 kg/día, de los cuales sólo 388,720 kg se recolectan de forma separada para su revalorización. En la Región Valles se recolecta aproximadamente el 4.3% del

total del estado, es decir, un estimado de 339 355 kg/día. Sólo en Tala se estiman 96000 kg/día y en Ameca 85000 kg/día [5], [6].

La distribución de tipo de usos del suelo que predomina en la región es de flora y fauna, 51%, seguido del uso agrícola con el 33% aproximadamente [7]. El IIEG reporta que del total de la producción agrícola de la región el 36.8 % es de agave, el 23.2% corresponde a la caña de azúcar, el 21% de maíz de grano y el resto se distribuye en cultivos como el chile verde, jitomate, frambuesa entre otros. Por lo que la caña de azúcar representa el segundo producto principal del sector agrícola de la región.

Para la Industria Cañera y la Tequilera, grandes generadores de residuos sólidos especiales, no se cuenta con un diagnóstico específico de generación o su disposición final, sin embargo, es posible estimar la generación de subproductos residuales en cada proceso a partir de los registros de producción realizando una simulación del sistema dinámico. Esta situación se replica para otros sectores productivos que generan residuos especiales en la zona.

Los sistemas regionales en México son diversos, sin embargo, en el entorno de generación y manejo de residuos sólidos y especiales, se pueden identificar actores productivos principales, municipios y juntas intermunicipales de medio ambiente, grandes generadores de residuos, gestores de residuos y sitios de disposición final, así como actores en el área de valorización de residuos.

En la Región Valles, esta estructura la conforman los actores que se describe en la Tabla 1., adicionales a los municipios, gobierno y población. Dentro de los actores productivos y grandes generadores de residuos sólidos especiales más importantes de la región destacan la Industria Cañera, representada por los ingenios en Tala y Ameca, y la industria Tequilera y de fabricación de bebidas y productos derivadas del agave.

Según lo da a conocer la SEMADET, en Jalisco los municipios se agrupan como organismos públicos descentralizados, de común acuerdo con los integrantes, con el fin de fungir como plataforma de gobernanza ambiental para el manejo integral de la región; en la zona Valles este organismo es la Junta Intermunicipal de Medio Ambiente para la Gestión Integral de la Región Valles, JIMAV [4].

Tabla 1. Actores principales del sistema Región Valles en materia de generación y gestión de los residuos sólidos adicionales a los municipios per se.

Actor	Ubicación	
Industria Cañera	Tala y Ameca	Gran productor y generador de residuos especiales.
Empresas dedicadas a la Generación eléctrica a partir de biomasa	Tala y Ameca	Filiales de ingenios azucareros dedicadas a la cogeneración a partir del bagazo de caña.
Industria del Tequila y fabricación de productos y bebidas derivados del agave	Principalmente Tequila. Con actividad en la industria*: Amatitán, El Arenal, Magdalena, Teuchitlán y Etzatlán	Gran productor y generador de residuos especiales.
Productores Agrícolas	Región Valles	Grandes productores y generadores de residuos sólidos orgánicos.
JIMAV	Región Valles	Manejo Ambiental integral de la región y vinculación público-privado.
Concesionarios para recolección de RSU y gestión de vertederos municipales.	Región Valles	Operación, administración, mantenimiento, recolección, almacenaje, transformación, comercialización y gestión intergubernamental del relleno sanitario.

*Planeación Agrícola Nacional 2017-2030, Agave Tequilero y Mezcalero, SAGARPA.

El Índice Regional de Medio Ambiente (IRMA), es un indicador utilizado el IIEG que tiene como base los Índices Municipales del Medio Ambiente de todos los municipios en la región; estos se determinan calculando indicadores del estado de los acuíferos, especies, generación de residuos sólidos, emisiones, transferencia de contaminantes, riesgos y cobertura de agua, forestal, etc., para evaluar la presión sobre el ecosistema y la respuesta que tienen ante las problemáticas tanto la sociedad como el gobierno.

De acuerdo con el IRMA para la Región Valles, con un valor de 53.9 reportado en 2019, en esta zona la presión hacia los recursos naturales es media, lo que implica que las condiciones medio ambientales son regulares y se tiene una baja respuesta a las problemáticas que se presentan actualmente en la región [3].

En los diferentes municipios de la Región Valles se presenta degradación del suelo, principalmente por disminución de la fertilidad y reducción del contenido de materia orgánica, degradación química, ascendiendo en conjunto a un estimado del 51% de la superficie de la región. En Ameca y Tala se tienen 423.89 y 451.86 km² respectivamente, equivalente al 38% del total de superficie que presenta degradación química en toda la región [3], [8].

La necesidad de acciones para evitar el aumento en el deterioro de las condiciones medio ambientales y el contexto agroindustrial de la zona, con potencial para beneficiar la cogeneración y la regeneración del suelo a partir de la revalorización de residuos; aunado a la disposición de la JIMAV y otros actores regionales de propiciar la implementación de acciones en búsqueda de un desarrollo sostenible hacen a la Región Valles un sistema adecuada para el estudio e investigación para el desarrollo metodológico de sistemas de economía circular regional.

1.2.2. Contexto de la industria Cañera en la Región

En Jalisco, alrededor de 77,000 ha se destinan cada año a la siembra de caña de azúcar [9], de los cuales aproximadamente 41,500 ha corresponden a las hectáreas cosechadas por la Industria Cañera de la Región Valles anualmente [10], donde 3 ingenios procesan la caña para la producción de azúcar:

- El Ingenio de Tala, ubicado en el municipio del mismo nombre, donde se procesan 16,000 ton de caña diarias, catalogado como uno de los tres ingenios más grandes de México [11].
- Ingenio San Francisco Ameca, localizado en la ciudad de Ameca. En este ingenio se muelen 7,200 ton diarias de caña [12].
- Ingenio Bellavista, en el municipio de Acatlán de Juárez, con una capacidad de molienda de 4,000 ton de caña por día [13].

La producción de caña de azúcar en la Región Valles ascendió a 372,200 ton en la zafra 2020-2021 asciende a 185,00 ton en Tala, 117,000 ton en Ameca y 70,200 ton en el Ingenio de Bellavista, aproximadamente. Esta cifra representa el 51% de la producción estatal para el mismo periodo.

En cuanto a la cantidad de residuos de estos grandes generadores no se cuenta con un registro puntual, sin embargo, es posible realizar estimaciones a partir de las Bases de Datos Abiertos del Gobierno de México con información de la producción anual de cada ingenio, así como los Informes estadísticos del Sector Agroindustrial de la Caña de Azúcar en México [10], [14].

En cuanto al destino de los residuos, un porcentaje de alrededor del 92%, respecto a la caña que se cosecha, se quema en campo y un porcentaje del bagazo de caña residual de los Ingenios de Ameca y Tala se destina a la cogeneración.

Ameca cuenta con una capacidad instalada de 4.5 MW para la combustión directa de biomasa, registrando una generación de aproximadamente 15 GWh. Mientras que en Tala está ubicada la empresa Tala Electric, filial del Ingenio de Tala, con una capacidad instalada de 25 MW y generación de 96 GWh aproximadamente; adicionales a los 12 MW de capacidad instalada para cogeneración al interior del ingenio [3], [11], [12].

Adicionalmente, en el caso de la Industria Cañera el Inventario Nacional de Energías Limpias, INEL, registra que en Ameca y Tala en 2016 se generaron 124.55 GWh a partir de combustión directa del bagazo residual de los Ingenios Azucareros [15].

No se tiene un registro del destino de la melaza y cachaza, también residuos del proceso, en los ingenios de la zona, sin embargo, se sabe que la melaza se vende de forma comercial para la preparación de alimento para ganado [16].

1.2.3. Análisis causa-efecto

En la Figura 2. Se muestra el Diagrama de árbol del problema, utilizado para visualizar el análisis de causa-efecto. En este diagrama se identifica como problemática una deficiente gestión de los residuos, derivado de la gran cantidad de residuos que se generan y que sobrepasan la capacidad de sitios de disposición, así como de la falta de información de requerida para su gestión y procesos de transformación para su reutilización. En consecuencia, se pierden posibles alternativas para su aprovechamiento y aumenta la problemática en la recolección y disposición de estos, además de reducir la responsabilidad asociada a los generadores de residuos.

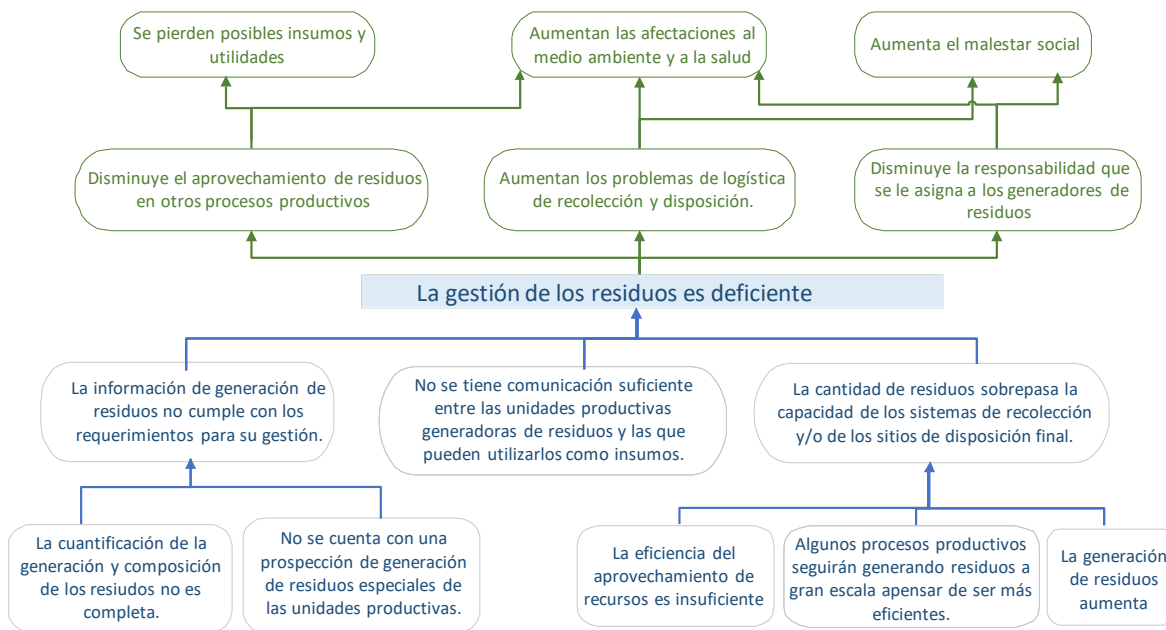


Figura 2. Diagrama de árbol del problema.

En complemento a la problemática, la Figura 3 presenta el Ciclo Causal de esta, en donde las afectaciones a la salud y al medio ambiente se encuentran en el centro del ciclo, derivados de esta generación de residuos desmedida y el agotamiento de los recursos naturales, en donde la redistribución de los residuos para su reaprovechamiento adoptado por la sociedad en conjunto con otras medidas de consumo y producción responsable tiene la posibilidad de incidencia positiva.

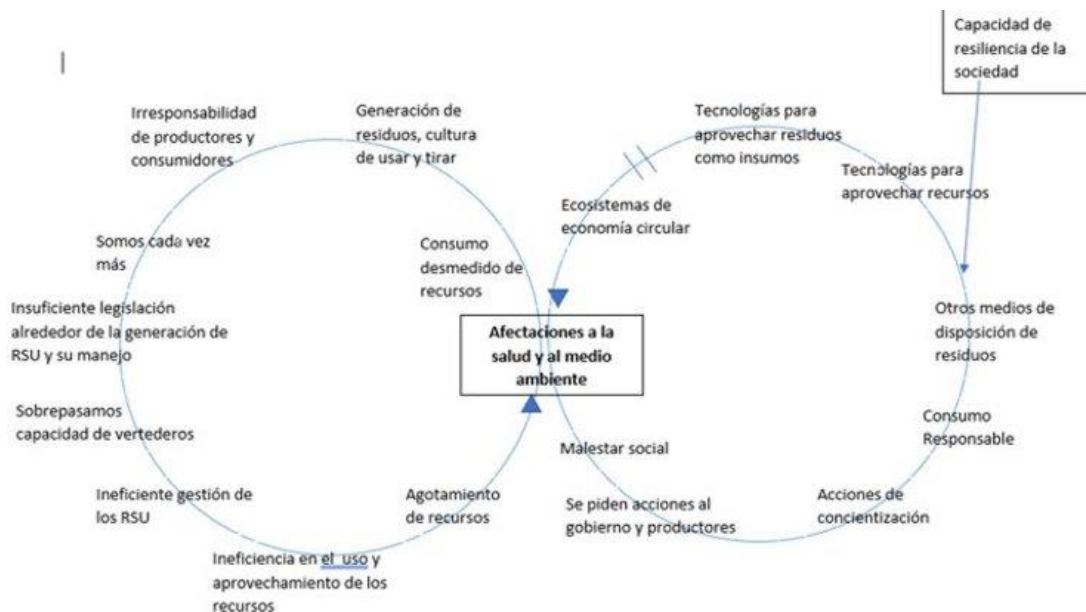


Figura 3. Diagrama de Ciclo Causal.

1.3. Objetivos de la intervención

El objetivo general de esta investigación consiste en el desarrollo de la metodología de análisis de redistribución de residuos con un enfoque de circularidad regional.

Los objetivos específicos consisten en:

- Modelado Dinámico del sistema del caso de estudio y su prospección para la generación de datos de producción y generación de residuos principales.
- Implementación de algoritmos evolutivos de optimización para determinar la mejor redistribución de los residuos utilizando los criterios de economía circular como restricciones.
- Generar una herramienta para la implementación del proceso en Excel capaz de ser transferible a otras regiones.
- Evaluación de escenarios de redistribución de residuos en el sistema de la Industria Cañera de la región Valles.

1.4. Delimitaciones y área funcional por intervenir

Con base en el análisis de causa- efecto se determinó intervenir la problemática atacando la insuficiente comunicación entre las unidades productivas generadoras de residuos y las que tienen la posibilidad de utilizarlos como insumos, revalorizarlos, dentro de la región, aportando así a mejorar la gestión de los residuos al aumentar el aprovechamiento de estos, disminuyendo así las afectaciones al medio ambiente y la salud, así como generando utilidades que, aunado al incremento en la responsabilidad por parte de los generadores de residuos pretende propiciar la adopción de sistemas de economía regional.

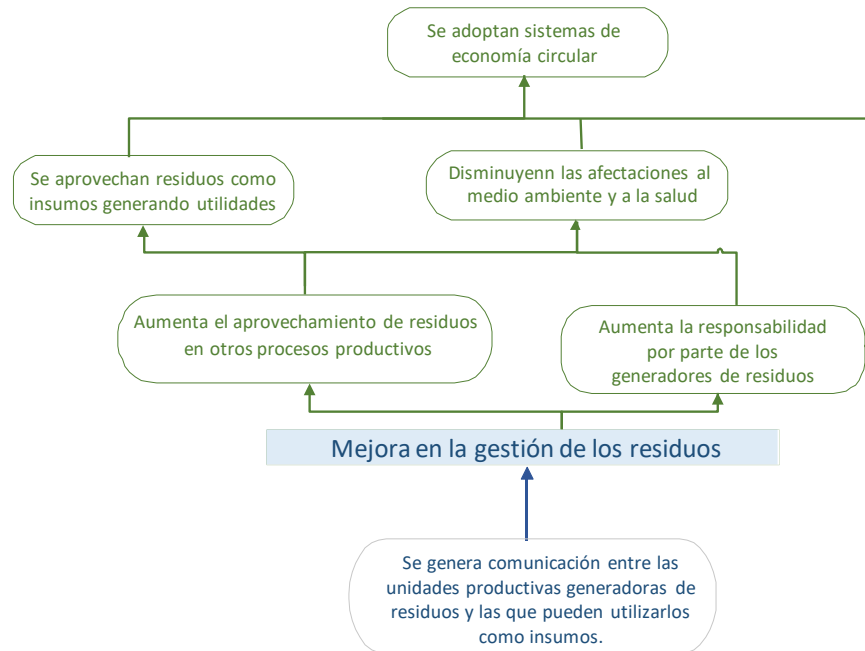


Figura 4. Delimitación de objetivos con base en el árbol de problemas.

1.5. Justificación y pertinencia del trabajo

En la República Mexicana se cuenta con diversos mecanismos y legislatura que fomentan la incorporación de los sectores productivos y de particulares al desarrollo sostenible, tales como:

- El programa *cero residuos* de la SEMADET que concibe el manejo de residuos con un enfoque de EC a partir de la jerarquización de residuos.
- La Ley General de Economía Circular (LGECE), aprobada por el Senado en noviembre de 2021, surge como marco normativo que, con la obligatoriedad de presentar un Plan de Economía Circular a agentes con actividades de manufactura de envases y empaques, promueve el uso eficiente de materias primas, productos, subproductos y servicios por medio de la reutilización, recuperación, reciclaje y rediseño [17].

En la Estrategia Nacional para la Implementación de la Agenda 2030 se establece el objetivo de que México adopte un enfoque de economía circular en sus patrones de producción, distribución y consumo por medio de incentivos, subsidios y tasas impositivas en las políticas fiscales. Mientras que

el Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024 no estipula un plan de acción para lograr el desarrollo sostenible que se plantea [18], [19].

Bajo el modelo de desarrollo económico actual, las unidades productivas, particularmente los grandes generadores de residuos seguirán teniendo desechos a gran escala a pesar de mejorar la eficiencia de sus procesos, por ello es esencial el desarrollo e implementación de nuevos modelos de gestión de residuos que tomen en consideración las características propias de cada región, económicas, productivas y sociales.

La EC se presenta como una alternativa a los modelos de producción lineales, teniendo como objetivo desacoplar el crecimiento económico de la extracción de recursos y generación de residuos, y sirviendo como herramienta para propiciar el desarrollo sostenible [20].

México se encuentra en una etapa de inicio en la adopción de la EC. El incremento en el fomento de las prácticas sostenibles denota la importancia de contar con métodos y herramientas que permitan un análisis de los sistemas dinámicos regionales en el país para la planeación y evaluación de SEC que busquen beneficios colectivos e impulsen entrar a una etapa de transición hacia un desarrollo sostenible.

La aplicación de la propuesta metodológica permitirá hacer un análisis de los sistemas dinámicos y evaluar diversos escenarios, con su inherente complejidad, y así fungir como un instrumento de apoyo en la toma de decisiones, favoreciendo el cambio de paradigma desde procesos productivos lineales hacia un pensamiento circular y la implementación de la EC regional.

2. Marco conceptual o de referencia

2.1. Estado de la cuestión

El concepto de Economía Circular se establece en 1966 con la teoría de Kenneth Boulding y el análisis de los flujos materiales, impulsado por el desarrollo de modelos de bucles a finales de los años 70, que surge con el fin de enfatizar el desarrollo sostenible de los procesos industriales. En la actualidad, la Fundación Ellen MacArthur es la principal promotora a nivel internacional de la implementación de modelos de EC [20].

A nivel nacional, se cuenta con muy poca investigación y análisis tanto a escala regional como en cada industria en aras de propiciar los sistemas productivos circulares. Destaca el Caso de Higuera, donde se construyó un ecosistema regional de valor circular utilizando una metodología de dinámica de sistemas y propiciando la sinergia entre los actores de la región [21]; mientras que a nivel industrial, entre las empresas que han implementado procesos circulares en México se encuentran Heineken y Grupo Bimbo [22], [23].

La complejidad en un SEC plantea un gran número de desafíos en la toma de decisiones para su diseño; por lo que el modelado y la evaluación del sistema siguen siendo un obstáculo por la falta de herramientas para su análisis. Se requiere un conocimiento y una comprensión más profundos sobre cómo los datos adquiridos de las tecnologías pueden desbloquear el potencial de una economía circular [22]–[24].

En el ámbito del modelado de cadenas de suministro en sistemas dinámicos con el objetivo de fomentar la EC la revisión de la literatura muestra casos de estudio en los que se aborda la comprensión de las interrelaciones como factores de decisión. En este sentido, entre las principales propuestas, hay holísticas de jerarquización para evaluar cadenas de suministro circulares integrando aspectos ambientales, económicos y operativos [25]; también se encuentran investigaciones utilizando aspectos sociales y económicos desde una perspectiva de cadena de suministro inversa, o logística inversa, permitiendo la recuperación de parte del material de los procesos productivos [26]–[28].

La gestión de cadenas de suministro circulares se encuentra en creciente desarrollo, principalmente hacia el interior de las empresas, contemplando proveedores y distribuidores, y no

considerando una región con diversos actores dentro de ella cuya vinculación puede detonar la circularidad del ecosistema regional.

En cuanto a la evaluación de los objetivos de gestión y optimización, se encontraron modelos que consideran principalmente objetivos económicos y medioambientales, seguidos de los que involucran también la maximización de los beneficios sociales. Sin embargo, en ningún caso dentro de la investigación realizada se encontró una evaluación de los resultados con indicadores específicos de circularidad de los procesos [22]–[24], [28], [29].

La Fundación Ellen MacArthur, desarrolló un primer encuadre para evaluar el grado de circularidad de productos y cadenas productivas dentro de una empresa a través de índices que tienen su sustento en la evaluación de la procedencia y redistribución de los materiales de los productos, la eficiencia de procesos de recuperación y el comparativo entre el ciclo de vida de un producto en un sistema lineal y dentro de un sistema circular. Estos indicadores tienen un enfoque de aplicación al interior de las industrias [22].

También cuentan con indicadores englobados en *Circulytics*, que en general evalúan la circularidad de una empresa o negocio cualitativamente, a través de cuestionarios para diferentes rubros según el giro de la empresa y la asignación de calificaciones acorde a las respuestas [30]. Estos indicadores fueron creados para sustentar y evaluar la transición de una empresa en particular hacia los modelos productivos circulares, no como indicadores de circularidad de sistemas con diversos actores productivos.

2.2. Conceptos y enfoques teóricos relacionados

Las principales características de la economía circular son el intercambio de materiales donde los desechos de una unidad de proceso, incluida la energía, el agua, los materiales y la información es la entrada de otra. Un SEC busca una forma en la que todas las unidades del sistema económico trabajen en conjunto para lograr un beneficio colectivo que es mayor que la suma del beneficio individual que cada unidad obtendría si tuviera la intención de optimizar su rendimiento de forma particular [31].

La dinámica de sistemas es un enfoque de modelado que representa la estructura de sistemas complejos a través de circuitos con retroalimentación de material e información formados alrededor de flujos, existencias y variables auxiliares, de tal forma que es posible explorar las causas y consecuencias de las dinámica de interés y así diseñar políticas para mejorar el desempeño de los sistemas [32], [33].

Los problemas en sistemas dinámicos, presentes tanto en el área académica como industrial, contienen varios objetivos que deben evaluarse simultáneamente, a estos se les llama problemas de optimización multiobjetivo, *MOPs* por sus siglas en inglés, cuyo estudio en el campo de las matemáticas e ingeniería aplicada se ha impulsado desde los años 80s [34].

Para resolver el problema se debe establecer un balance entre los objetivos o características deseadas que se encuentran en conflicto, obteniendo diversas posibles soluciones adecuadas. Es posible incluir restricciones algebraicas, así como establecer límites que no pueden ser excedidos o donde se aplicará algún método de penalización para los valores resultantes que lo hagan.

Se han desarrollado muchas herramientas para solucionar *MOPs* en las que se aplica uno de los dos principales métodos: la transformación de las funciones multiobjetivo en un solo objetivo (escalarización) y la optimización de Pareto. En el primero se aplican pesos a las funciones objetivo-individuales para lograr un solo objetivo, mientras que el segundo busca tantas soluciones factibles como sea posible y devuelve, con un procedimiento de clasificación, un conjunto de soluciones no dominadas, que proporcionan un resultado con una relación balanceada, eficiente, entre todos los objetivos.

Dentro del conjunto de herramienta se encuentran los Algoritmos Evolutivos (AE), que son algoritmos metaheurísticos capaces de resolver problemas de optimización numérica no convexa; aplican principios de la teoría de la evolución de Darwin, como la selección, la recombinación y la mutación, para encontrar un conjunto de soluciones de Pareto.

En 1994, se desarrolló el algoritmo de clasificación no dominado (NSGA), que fue uno de los primeros AE para *MOPs*. En el 2002 se creó el NSGA-II, en el que se introdujo una técnica para incorporar restricciones en el paradigma de optimización [35].

El algoritmo NSGA-II genera descendencia a partir una población inicial usando un tipo específico de recombinación y mutación y selecciona la siguiente generación según la clasificación de

soluciones no-dominadas y la comparación de la distancia de apilamiento, ya que se busca una mayor distancia entre las soluciones de la población generada para asegurar la diversidad [36].

2.3. Herramientas tecnológicas o de innovación consideradas en el trabajo

Para el desarrollo metodológico y la herramienta de implementación de análisis de escenarios de la cadena de suministro circular se propone el modelado dinámico del sistema y su evaluación a través de la optimización multiobjetivo utilizando el algoritmo evolutivo NSGA-II. Lo anterior contemplando dentro de las funciones objetivo a evaluar la viabilidad de las interacciones entre las unidades de proceso por medio de un indicador de circularidad de la cadena de suministro, así como de los factores económicos asociados.

El proceso se propone realizarlo a través de la programación en Python dentro del marco de optimización multiobjetivo de la librería *pymoo* [37], desarrollado por Blank y Deb en 2020, considerando también que Deb es también uno de los desarrolladores del algoritmo NSGA-II.

Para propiciar la transferibilidad del producto del desarrollo tecnológico y lograr una interacción amigable con el usuario final, que aplicará la metodología y utilizará la herramienta para el análisis del sistema, se plantea la vinculación del código en Python a una plataforma de uso extendido, *Excel*®, mediante la librería *xlwings*® [38].

El uso de estas herramientas tecnológicas se establece después de la indagación de opciones para el modelado del sistema y la necesidad de un entorno transferible de análisis y evaluación, a partir de la retroalimentación, utilizando los aspectos que denoten el grado de circularidad del sistema y la inversión económica del mismo.

3. Estrategia metodológica o de intervención

Este proyecto surge a partir de la necesidad de análisis de la generación de residuos en la región Valles en búsqueda de estrategias que fomenten el desarrollo de ecosistemas de economía circular.

Inicialmente, no se contaba con un panorama claro del enfoque ni del alcance de este desarrollo tecnológico, por lo que fue necesaria su definición aplicando las estrategias y métodos estudiados en las primeras asignaturas cursadas de Investigación, Desarrollo e Innovación (IDI).

Después del primer mapeo de la región, realizado dentro del Proyecto de Aplicación Profesional (PAP) de Ecosistema de Economía Circular en la Región Valles (EECRV), se complementó la caracterización con información cuantitativa y se analizaron las principales fuentes de residuos sólidos urbanos y especiales y se decidió trabajar en un modelo para la prospección de generación de residuos sólidos urbanos, sin embargo, al profundizar cuantitativamente en la generación de RSU en los municipios de la región, en las posibilidades de reutilización de los mismos y al estudiar a los principales generadores de RE en la región, se determinó que era pertinente trabajar alrededor de los RE.

Se estableció como eje central del proyecto el modelado dinámico de alguno o algunos de los principales sistemas productores-generadores en la región y, a partir de este modelo, prospectar y desarrollar la metodología para evaluar las posibilidades de redistribución de residuos entre unidades productivas dentro del sistema y pertenecientes a otros sistemas.

También se determinó que en esta evaluación se requiere un énfasis en la contribución a la circularidad en y entre los sistemas; por lo que se incluyó dentro de los alcances del desarrollo tecnológico establecer un proceso de optimización con el cual obtener resultados cuantitativos que fundamenten y ayuden a visualizar los escenarios que contribuirán, y en qué medida a la circularidad de la redistribución.

3.1. Justificación de la estrategia metodológica o de intervención

El desarrollo de una metodología que analice la redistribución de los residuos hacia nuevas unidades productivas dentro de una región busca principalmente propiciar el establecimiento de

ecosistemas circulares, sustentando la selección de las estrategias a implementar, mediante criterios cuantitativos.

Para llevar a cabo la evaluación cuantitativa es necesario contar con una herramienta de análisis estructurada que lo permita, a través de la cual se identifique no sólo la inversión económica de la redistribución, si no que denote el grado de circularidad que se alcanzaría al implementarla y permita la revisión de opciones que favorezcan el aumento de dicha circularidad, que conlleva beneficios socioambientales en la región.

Se quiere que el método sea aplicable en sistemas dinámicos complejos, regiones dentro del marco nacional con unidades productivas de diversa índole, con volúmenes de producción y generación de magnitudes heterogéneas.

Para esto, es necesario determinar la situación inicial del sistema, definir las variables sensibles de las unidades de proceso y que, dentro del análisis y aplicación de la herramienta de evaluación, el usuario precise las metas y características particulares que proporcionarán los límites de cada posible escenario a evaluar.

Por lo tanto, la herramienta de análisis debe ser transferible y de fácil acceso para el usuario, permitiendo explorar las vías dentro de la región hacia el desarrollo de cadenas de suministro circulares.

La función objetivo para minimizar la linealidad de flujo toma como base el indicador propuesto por la Fundación Ellen MacArthur, el cual se modifica para evaluar flujos de residuos en la región; con este indicador se establece el criterio de selección de la mejor redistribución que busque la circularidad.

En la construcción de la función objetivo se requieren los flujos máxicos de residuos, identificar su procedencia y especificar también la eficiencia de los procesos de transformación; es por esto por lo que se utiliza el modelado dinámico para la obtención de información que alimente esta función, además de identificar los flujos de residuos para incluir en la redistribución.

Este proceso de optimización se realiza a través del código programado en Python y requiere el ingreso de datos por parte del usuario, por esto se emplea el complemento de *xlwings*® que permite tener como interfaz la hoja de cálculo e inicializar la optimización descrita en el código a través de un botón con una función de enlace programada y que al finalizar el proceso presenta los resultados de

éste, de tal forma que el uso de la herramienta por el usuario es simple y permite una presentación y análisis de datos asequible.

3.2. Muestra o sujeto de investigación

Para la obtención de información de la región se tiene como principal fuente las bases de datos del Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (CONADESUCA), disponibles en la página de Datos Abiertos del Gobierno de México. En esta instancia, se emiten informes de los avances en la zafra anual, así como un Informe Estadístico del Sector Agroindustrial de la Caña de Azúcar, en donde se presentan los indicadores principales de producción en el campo y de los 51 ingenios a nivel Nacional y por Entidades Federativas.

Adicionalmente se contempla la información del destino de los residuos procedentes de los procesos productivos tomando como fuentes:

- Grupo Beta San Miguel – Datos públicos del Ingenio San Francisco Ameca, ubicado en la región de estudio, con información entre la zafra 2015 a 2019 [12].
- Sistema de Información Energética – Capacidades de generación de energía eléctrica de las Centrales de cogeneración de los ingenios en la Región Valles, datos 2016 -2018 [39].
- INEGI – Censo Nacional de Gobiernos Municipales – Generación de Residuos, consulta de los censos del 2011 al 2019 [5].

En la selección de variables que delimite el sistema y el análisis de los datos es necesaria la extracción de las bases de datos que correspondan específicamente a la Región Valles. Con este marco de información, y el conocimiento previo del proceso productivo, una descripción estadística en la que se organizó la información, se determinó la variabilidad y tendencia de los datos, y se evaluó la correlación entre las variables, para seleccionar las indicadas para el modelado dinámico en su condición inicial, así como la prospección del sistema.

En este proceso, realizar entrevistas con especialistas en los ámbitos acordes a las diferentes áreas afines al sector de estudio, así como con actores regionales incorpora información respecto a los requerimientos, experiencia y validación de la propuesta.

La matriz de correlación de las variables que describen el sistema y el proceso productivo se muestran en la Figura 5, de esta se identifica, por ejemplo, que la eficiencia de cada fábrica incide significativamente en la generación de Melaza como residuo y es necesario monitorear el porcentaje de caña quemada en campo, ya que afecta a la generación eléctrica. También se establecen relaciones importantes entre el rendimiento de hectárea sembrada y la cogeneración, además de evidenciarse la relación entre la eficiencia de fábrica no sólo con los aspectos inherentes al proceso productivo si no también con la generación de melaza como residuo.

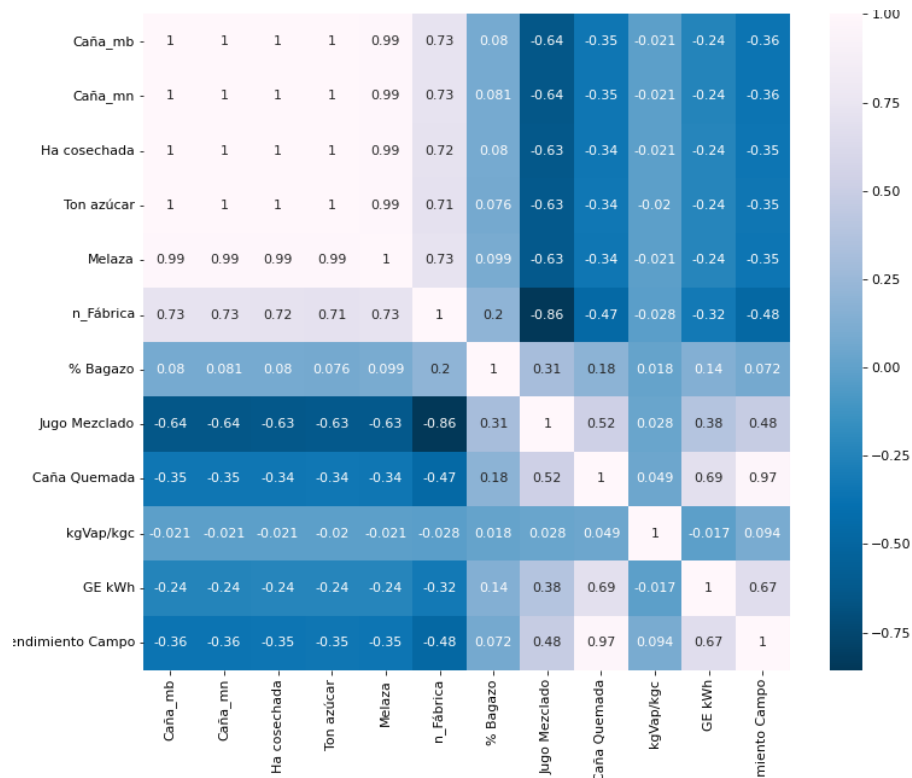


Figura 5. Matriz de Correlación de Variables que describen el Sistema Cañero y el Proceso Productivo presente.

El análisis de la Generación Eléctrica por ingenio en cada zafra según el bagazo con un gráfico de jerarquización destaca que el proceso de Cogeneración en la región inicia en la zafra del 2018 siendo el Ingenio de Tala el de mayor producción de kWh en relación con la cantidad de bagazo generado en el proceso de producción de azúcar; también muestra que en este Ingenio se tiene más del 50% del total de residuos generados en el sistema.

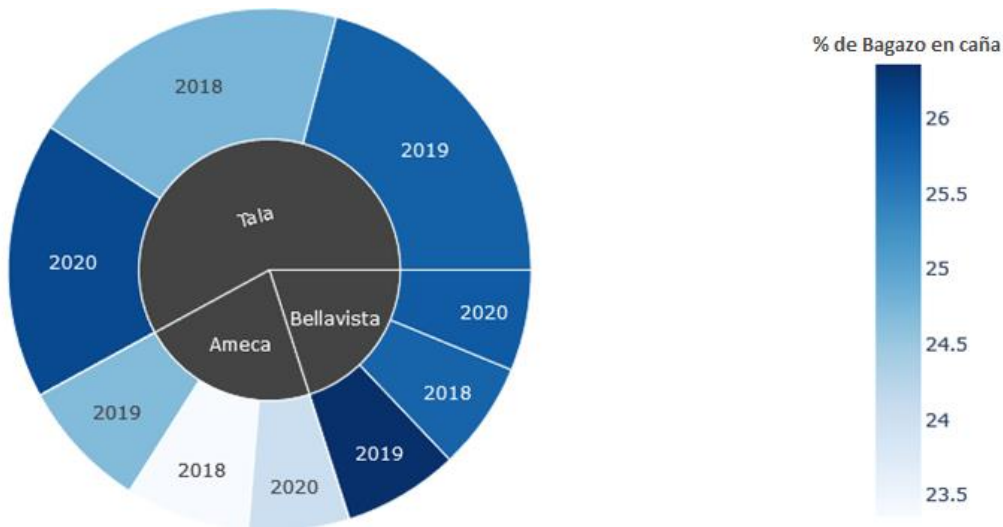


Figura 6. Jerarquización de Generación Eléctrica por ingenio en cada zafra según % de bagazo.

El sistema de la Industria Cañera de la Región Valles a modelar con las variables seleccionadas con base en el análisis incluye como etapas generales: la siembra de caña de azúcar, zafra anual, proceso de producción de azúcar y residuos derivados del proceso (melaza, bagazo, cachaza) para su análisis como materia prima en la producción de alimento para ganado, composta y generación eléctrica.

Se seleccionó la generación eléctrica como unidad de proceso debido a que actualmente ya se destina el bagazo de caña para este fin; mientras que la elaboración de composta y de alimento para ganado derivado de los residuos de la industria cañera también se realiza dentro de la Región Valles y son procesos de transformación de los residuos con posibilidad de crecimiento en la región.

El proceso de producción de azúcar, y por tanto el inicio del sistema seleccionado, tiene origen en la siembra de la caña de azúcar, en donde el rendimiento del campo por hectárea es la variable inicial para el modelado dinámico. Posteriormente se realiza la zafra y se lleva la caña a los ingenios en donde se muele, teniendo como residuo el bagazo de caña. El jugo producto de esta moliendo se procesa para la fabricación de azúcar y originando como residuos la melaza y cachaza.

A partir de los flujos materiales de residuos el sistema se enlaza con las unidades de proceso para la generación eléctrica, la elaboración de alimento para ganado y la producción de composta. El diagrama del sistema se presenta en la Figura 7, y las variables que involucra se enlistan en la Tabla 2.,

donde se especifica si la variable se presenta como dato o se determina durante el proceso de modelado.

Tabla 2. Variables del sistema.

Variable	Condición inicial	Unidades
Rendimiento del campo por hectárea (implícita la superficie sembrada y caña bruta)	Datos anuales 2009 a 2020	ton/ha
Caña de azúcar en campo	Calculada	ton
Caña Quemada (en función del % de quema anual por ton de caña bruta)	Calculada	ton
Caña bruta	Calculada	ton
% Pérdidas para obtener caña neta	Datos anuales 2009 a 2020	%
Caña neta molida	Calculada	ton
% Imbibición (agua adicionada en molienda)	Constante	%
Jugo mezclado	Calculada	ton
% Bagazo en caña	Constante promedio	%
Bagazo residual de molienda	Calculado	ton
Cachaza residuo de clarificación	Calculado	ton
Melaza	Calculado	ton
Rendimiento de fábrica	Constante promedio	%
Azúcar producida	Calculada	ton
Bagazo para generación Eléctrica	% Asignado según escenario	ton
Bagazo para alimento	% Asignado según escenario	ton
Alimento para ganado producido	Calculado	kg
Energía eléctrica generada	Calculada	kWh
Generación eléctrica por tonelada de caña bruta	Datos anuales 2009 a 2020	kWh/ton

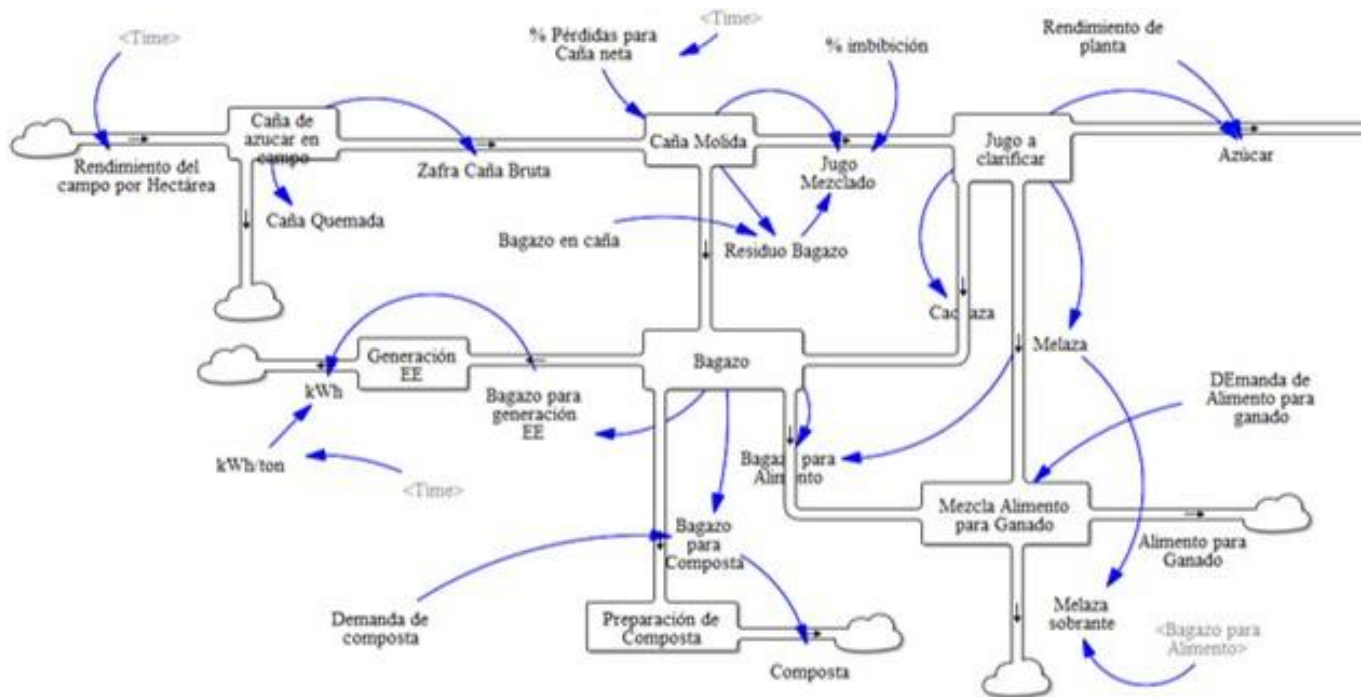


Figura 7. Diagrama del Sistema de la Industria Cañera.

Fuente: Elaboración propia en VENSIM®.

La estrategia de intervención contempla el modelado y evaluación de escenarios con base en la dinámica del sistema, que funge tanto como parte de las etapas de desarrollo como de herramienta para recopilación de información.

La muestra seleccionada de datos y variables que simulan el sistema conforman el marco de referencia para el planteamiento de diversos posibles escenarios de redistribución de los residuos y su evaluación a través de un proceso de optimización multiobjetivo con algoritmos evolutivos.

- Delimitación de región de estudio – Especificar los sistemas principales de la región y las unidades productivas de cada uno.
- Caracterización del sistema e identificación de variables y requerimientos – Descripción cualitativa y cuantitativa de cada unidad de proceso, identificando los residuos que se generan y posibles aspectos requisitos específicos de

3.3. Etapas del proceso

- Definición del problema – En esta etapa se detallan las condiciones iniciales bajo las que se desarrollará el proyecto.
- Delimitación de región de estudio – Especificación del área de interés y los alcances del desarrollo.
- Caracterización del sistema e identificación de variables y requerimientos - Descripción cualitativa y cuantitativa, en este caso del sistema de la Industria Cañera, identificando las unidades productivas, así como los residuos generados.
- Exploración de soluciones y diseño de propuesta metodológica – Evaluación y selección de las propuestas que se generaron para mejorar la gestión de los residuos en la región.
- Prueba de Concepto – Proceso de implementación de la metodología propuesta para la verificación de la viabilidad técnica de esta.
- Análisis e integración de resultados – procesamiento de la información obtenida de la prueba de concepto.
- Verificación y Validación – confirmación del cumplimiento de los objetivos y alcances del desarrollo y de los resultados obtenidos.

3.3.1. Cronograma de trabajo

Tabla 3. Cronograma de Etapas del proceso de desarrollo.

Etapa	2020	2021		2022		
	Otoño	Primavera	Otoño	Primavera	Verano	Otoño
Definición del Problema	■					
Delimitación de la Región de Estudio	■					
Caracterización del sistema e identificación de variables y requerimientos	■		■			
Exploración de soluciones			■	■		
Diseño de Propuesta				■		
Prueba de Concepto					■	
Análisis e integración de Resultados					■	■
Verificación y Validación					■	■
Informe de TOG						■

3.3.2. Problemáticas para llevar a cabo el proceso de aplicación

En el proceso de aplicación de la metodología se modeló el sistema dinámico utilizando el software *VENSIM*[®], sin embargo, este software requiere el pago de licencia para el acceso a todas las funciones necesarias para el análisis y la optimización multiobjetivo por lo que se recurrió al uso de hoja de cálculo para realizar el modelado y tener la posibilidad de ejecutar el proceso de optimización multiobjetivo a partir del marco de optimización multiobjetivo en *pymoo*, de libre acceso, a través del desarrollo del código en *Python*, de tal forma que la herramienta de análisis cumpla con la característica de ser transferible.

3.4. Metas de información

De la caracterización del sistema se tiene como meta en información establecer las unidades productivas principales y su estado inicial, además de proporcionar los datos de las variables mínimas requeridas para la simulación del sistema y prospección del caso de estudio (Rendimiento del campo por hectárea, porcentaje de pérdidas de caña en campo y de bagazo presente en caña, rendimiento de fábrica).

Con las entrevistas a expertos y actores regionales se espera conocer e incorporar los requerimientos, metas productivas, inversión y características particulares que proporcionen las condiciones de cada posible escenario a evaluar. Adicionalmente, con entrevistas subsecuentes a la prueba de concepto, se busca la retroalimentación de los resultados que deriven.

4. Exposición de hallazgos

Como metodología general para el análisis de escenarios de la cadena de suministro circular se propone iniciar con la delimitación de la región a estudiar, realizando una caracterización de esta para identificar los sistemas productivos principales y las unidades productivas dentro de estos con posibilidad de generar sinergia para el aprovechamiento de los residuos.

Con base en la caracterización se efectúa el modelado dinámico de cada sistema y su prospección, incluyendo las principales etapas productivas de cada unidad, para posteriormente plantear todos los posibles escenarios de redistribución que se desee evaluar. De los resultados derivados se analiza cuantitativamente el impacto de cada escenario a la conformación de cadenas circulares, así como la incidencia de las inversiones para aumentar la eficiencia de los procesos, con el objetivo de generar estrategias en las unidades productivas, y en el entorno en general, para la creación de sistemas de economía circular.

4.1. Organización de la información obtenida

Se presentan dos etapas de resultados, la primera correspondiente al Modelado Dinámico del Sistema Cañero, con la cual fue posible estimar cuantitativamente la generación de residuos, así como establecer la dinámica de las variables y realizar una prospección de producción y generación de residuos; y una segunda etapa en donde se tienen resultados de la evaluación de posibles escenarios de redistribución.

Para el modelado del sistema se parte del rendimiento del campo por hectárea sembrada, con base en esta magnitud del registro estadístico se determinan las toneladas de caña producidas anualmente, la caña quemada en campo y la que finalmente ingresa al ingenio para ser procesada. Lo anterior con base en los porcentajes promedio de rendimiento en cada etapa.

Para el cálculo de las toneladas que se producen de azúcar y de residuos, bagazo, cachaza y melaza, se considera el porcentaje de rendimiento de fábrica, así como los porcentajes de composición

que caracterizan a la caña de azúcar. Una vez realizado el balance de masa, se establecen los porcentajes de distribución para las unidades de proceso a los que se destinan los residuos, realizando el cálculo de cada etapa de forma anual.

Con base en este modelo, se realizó la prospección a futuro del sistema utilizando un algoritmo de suavizado exponencial triple, función que se encuentra programada en Excel, que pronostica la continuación de los valores de las variables hasta un tiempo determinado de forma periódica, en este caso anual.

En la Tabla 4 se muestran los resultados entre el 2018 y 2025 generados por el modelo realizado en el que se prospecta la producción de azúcar y generación de bagazo y melaza residuales hasta el 2025, así como los kWh producidos con la quema de bagazo de caña. Estos resultados se compararon con los registrados en el reporte estadístico anual de la CONADESUCA arrojando un porcentaje de diferencia que varía del 1 al 20 %, aproximadamente, en las diferentes variables entre el 2015 y 2021. La Figura 8 muestra el comparativo entre el bagazo generado de acuerdo con el cálculo a partir del registro y los resultados del modelado entre el 2013 y 2019.

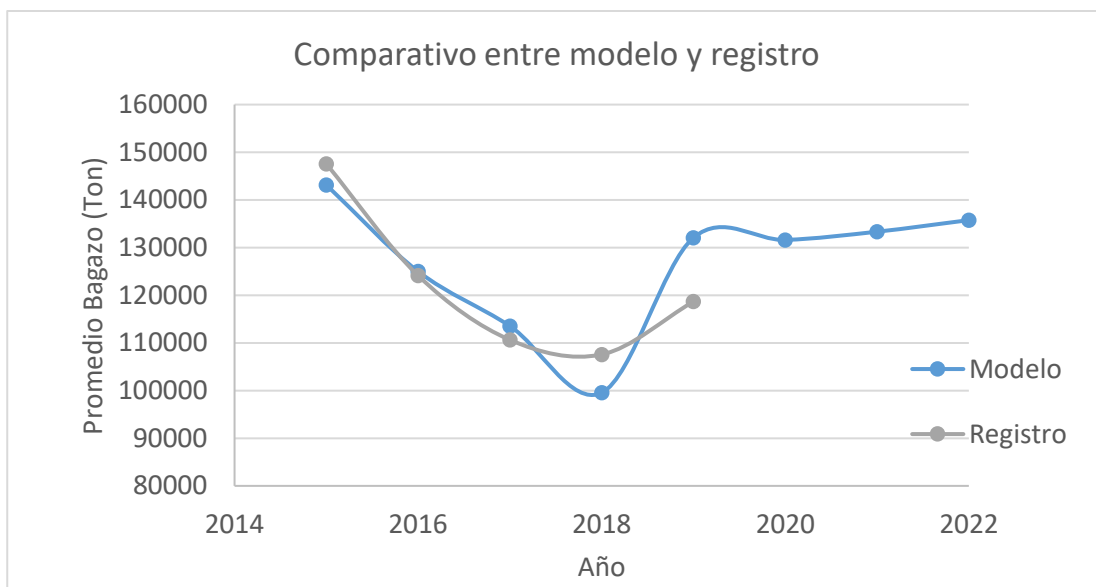


Figura 8. Gráfico comparativo de la generación de bagazo promedio registrada con los resultados del modelo.

Tabla 4. Resultados de modelado dinámico y prospección comparados con registro estadístico [10].

COMPARATIVO RESULTADOS DE MODELADO Y PROSPECCIÓN										
	REGISTRO			MODELADO				COMPARATIVO		
Tiempo	Melaza	Bagazo	Azúcar	Melaza	Bagazo	Azúcar	GE	Melaza	Bagazo	Azúcar
Año	ton	ton	ton	ton	ton	ton	kWh	%	%	%
2015	51491	147563.38	77052.73	49748	143136	77002	7713395	3.5	3.1	0.1
2016	46360	124125.78	68741.58	45838	124994	72411	7226325	1.1	0.7	5.1
2017	49684	110640.12	60295.43	41635	113534	64922	6644469	19.3	2.5	7.1
2018	47996	107572.75	59393	44575	99543	69024	7164776	7.7	8.1	14.0
2019	53698	118680.36	66453	48434	132073	72651	7400398	10.9	10.1	8.5
2020	51489	128966.41	67149	48265	131613	74996	8637320	6.7	2.0	10.5
2021	48152		64579	48895	133332	75975	8943113	1.5		15.0
2022				49785	135758	73755	9302271			
2023				50674	138183	78739	9668452			
2024				51564	140608	80121	10041656			
2025				52453	143034	81503	10421885			

Estos resultados conforman los datos de entada de masa de bagazo y melaza para posteriormente conformar escenarios de redistribución, en los que se varia la fracción másica de residuos designada a cada unidad productiva a partir de la optimización multiobjetivo con la que se desea disminuir el índice de linealidad de flujo de los residuos establecido a partir de la función objetivo que describen las ecuaciones 1 y 2, en conjunto con los costos asociados a su distribución, ecuación 3.

$$f_1 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{Mv_i + Mnt_i}{(2 * M_i) + \left(\frac{(Mn_{i,3} - Mn_{i,4})}{2} \right)} \right)$$

Ecuación 1. Función Objetivo para minimizar la linealidad de flujo.

$$Mnt_i = \left(\left(M_i * \left(1 - \sum_{j=1}^n Xd_{i,j} \right) \right) + \left(\frac{((M_i * (1 - (E_{i,2} * w_{2,k})) * Xp_{i,1}) / (E_{i,2} * w_{2,k})) + (M_i * (1 - (E_{i,3} * w_{3,k})) * Xd_{i,3}))}{2} \right) \right)$$

Ecuación 2. Definición de Masa no recuperada total del residuo i.

VARIABLES

i – Residuo (1,2,3,...n)	Mnt,i– Masa no recuperada total del residuo i
j – Destino del residuo (1,2,3,...n)	Mni,j – Masa no recuperada de residuo i en j
k – Unidad productiva (1,2,3,...n)	Xdi,j – Fracción de residuo i con destino j
Mi – Masa residuo i	Xpi,j – Fracción de procedencia j del residuo i
Mvi – Masa Procedencia Virgen o sin especificar del residuo i.	Ei,j – Eficiencia de proceso j para residuo i
	wj,k - factor de inversión eficiencia para j en k

$$f_2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n D_{j,k} M_{i,j,k} X_{d_{i,j,k}} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n O_{j,j} M_{i,j,k} X_{d_{i,k,l}} + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n I_{j,k} w_{j,k}$$

Ecuación 3. Función de costos de redistribución.

VARIABLES

i – Residuo (1,2,3,...n)	Di,k – Costos Distribución para j en k
j – Proceso de transformación (1,2,3,...n)	Oj,k – Otros costos para j en k
k – Unidad de proceso, agente (1,2,3,...n)	wj,k – factor de inversión para eficiencia del proceso j en k
Mi,j,k – Masa residuo i con j en k	lj,k – Inversión de j en k
Xdi,j,k – Fracción de residuo i con j en k	

Las restricciones para el proceso de optimización que se escriben como funciones se describen en las ecuaciones 4 y 5. Estas actúan en conjunto con la definición de variables de inicialización en la programación del algoritmo en donde es necesario especificar la dimensión de la matriz resultante como otro aspecto restrictivo, en este caso, el número de unidades de proceso a las cuales se redistribuirá el residuo; así como el número de funciones y condiciones. También es posible restringir los costos totales de redistribución e inversión a una magnitud específica máxima.

Por otra parte, a través de una función programada se selecciona el número de residuos que se redistribuirán; la información para ello se extrae de la hoja de cálculo en Excel en la que se ingresan los datos.

$$g_1 = 1 \leq \sum_{i=1}^n X_i \leq 1$$

Ecuación 4. Ecuación de restricción para que las fracciones de distribución se encuentren entre un rango de 0 a 1.

$$g_2 = \sum_{i=1}^n X_i M_i \leq \sum_{i=1}^n M_i$$

Ecuación 5. Ecuación de restricción de masa total de residuo a redistribuir.

Utilizando como interfaz de trabajo Excel se designa la magnitud de residuos a distribuir junto con eficiencias y costos base, en este caso supuestos, para cada unidad productiva seleccionada como posible destino en la redistribución. El ejemplo de la hoja de cálculo de trabajo para la entrada y salida de datos se presenta en la figura 9. Con esta información y a través de las funciones propuestas para la obtención de una mejor redistribución de los residuos que considere el grado de linealidad de esta se evaluaron diferentes escenarios.

DATOS		RESULTADOS													
RESIDUO	LINEALIDAD DE FLUJO	Masa del producto	Procedencia del residuo (Xp,n)							Redistribución (Xd,n)					
			Reciclaje Reuso			Producción Sostenible	Virgen o sin especificar	Reuso	Composta		Recuperación de E (GE)				
			Xpr	Xpu	Xps				ton	1	2	3	4	5	6
1	BAGAZO	621042	0	0	0	621042	0	0.40	0.30	0.29					
2	MELAZA	10200	0	0	0	10200	0	0.27	0.00	0.71					

Figura 9. Vista de hoja de cálculo de herramienta de análisis para el ingreso de datos y la presentación de resultados.

En la figura 10 se muestra un resumen de resultados del proceso de redistribución de bagazo y melaza, a partir de la optimización multiobjetivo, en cuatro escenarios distintos considerando tres unidades productivas de destino para generar sinergia. Las fracciones de redistribución representan el porcentaje de residuo que se destinaría a cada unidad productiva respecto a la magnitud de residuo generada anualmente.

Las unidades productivas seleccionadas fueron la producción de vapor a partir de la quema de bagazo de caña, el composteo de bagazo de caña y la preparación de alimento para ganado con bagazo y melaza. Cabe mencionar que la cantidad de alimento para ganado en cada escenario se encuentra limitada por la cantidad de melaza producida, ya que no se puede preparar más alimento si no se tiene suficiente melaza.

El primer escenario representa la condición actual, en la que el bagazo se destina a la producción de vapor y se tiene un factor de costo asociado de 0.65 así como un indicador de linealidad de flujo de 0.7.

El segundo escenario muestra una posible redistribución en donde se tiene de moderada a baja eficiencia en los procesos de transformación para la reutilización de los residuos, en este caso el indicador de linealidad desciende hasta 0.57 y se presentan factores de costo tanto de la preparación de alimento para ganado como de la producción de composta.

En un tercer caso, se incluye un aumento del 25% en la eficiencia de producción de alimento para ganado, con lo que se logra descender el indicador de linealidad a 0.55 aunque se incrementa el factor de costo correspondiente.

El cuarto escenario representa el caso en el que adicionalmente se aplica un aumento en la eficiencia de la cogeneración, lo que modifica el indicador a 0.51 con un aumento en el factor de costo.

Para los cuatro escenarios descritos se observa la línea de tendencia de la magnitud del indicador de linealidad propuesto, el cual se desea minimizar, observándose una disminución en la linealidad al buscar alternativas de redistribución adicionales a la quema de bagazo de caña. Los marcadores en la figura representan el factor de costo asociado a cada unidad productiva que se asigna con base en los costos de distribución supuestos para cada residuo.

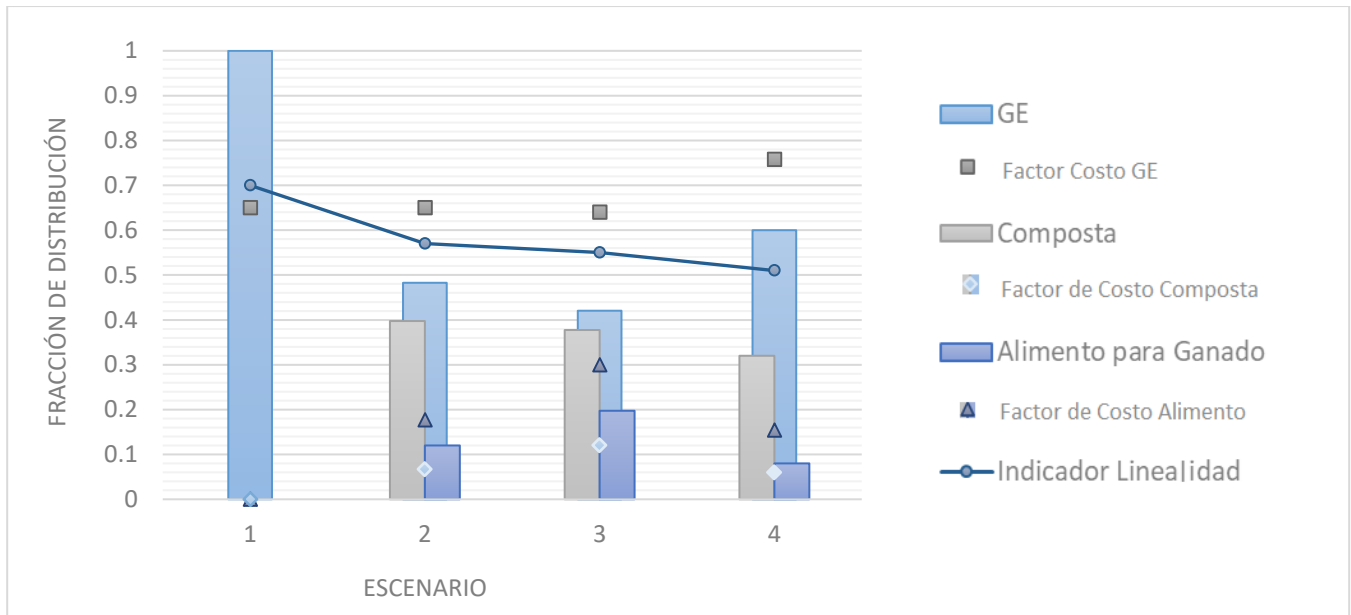


Figura 10. Gráfico con redistribución de residuos en 4 diferentes escenarios.

4.2. Impacto de la estrategia en la solución del problema

El sistema analizado para la prueba de concepto fue la Industria Cañera, que involucra una redistribución de bagazo y melaza residual limitada a 3 posibles unidades productivas dentro de este. Es posible proyectar los resultados al generar escenarios con base en la prospección del modelado dinámico del sistema, así como visualizar un crecimiento en el sistema que comprenda un mayor número de residuos y unidades de productivas e involucrando, por ejemplo, el sistema de la Industria Tequilera, de gran impacto también dentro de la región, se espera que surjan alternativas interesantes y diversas para conformar nuevos escenarios de redistribución, al igual que problemáticas asociadas, en donde será fundamental una evaluación cuantitativa para la toma de decisiones.

Es en este punto en el que la herramienta de análisis generada incrementa su potencial de aplicación, ya que es posible su uso tanto para un solo sistema, como el caso de la Industria Cañera, como para el conjunto de sistemas que componen la región, añadiendo unidades productivas y residuos a redistribuir con diversas codependencias.

Económicamente no se percibe una mejora considerable con los escenarios de redistribución, sin embargo, se destaca la posibilidad de vinculación con la disminución de la huella de carbono

inherente a la eficiencia de los procesos, ya que al incrementar esta eficiencia se incide positivamente en el indicador de linealidad de flujo; aspecto que sería posible monetizar.

En su conjunto, el análisis de los resultados que se pueden obtener para los escenarios respalda la toma de decisiones para propiciar sinergia en la redistribución de residuos en la región y, por ende, en la instauración de Ecosistemas de Economía Circular, mejorando así la gestión de los residuos.

4.2.1. Alineación con la estrategia general del contexto de aplicación dentro del PAP EECRV

El PAP EECRV tiene como objetivo minimizar la disposición final de residuos y la extracción de materias primas articulando un EEC en la región Valles. Lo anterior implica realizar propuestas de revalorización tanto en las unidades productivas ya existentes dentro de la región, como proponiendo nuevos posibles procesos productivos en los que se empleen los residuos.

Para llevar a cabo el análisis de los posibles ecosistemas circulares, se está siguiendo la metodología propuesta, iniciando con la caracterización y delimitación del sistema, y se encuentra en etapa de modelado dinámico; con cuyos elementos será posible evaluar las propuestas de revalorización y el funcionamiento actual de dicho subsistema, utilizando la herramienta desarrollada en el presente TOG.

De esta forma, se contará con la valoración cuantitativa para definir acciones subsecuentes y sustentar la incidencia de las propuestas de revalorización en la generación de sistemas circulares regionales.

5. Discusión final

De acuerdo al inventario estatal de emisiones de gases de efecto invernadero la quema de bagazo de caña como combustible en los ingenios realiza la principal contribución a las emisiones estatales, representado el 44.1% [40]. Al invertir en mejoras a la eficiencia en los procesos de cogeneración actuales y en la planeación para migrar a fuentes de energía limpia, buscando la sostenibilidad y el cumplimiento de la normativa en relación con emisiones de efecto invernadero, se obtendrá un beneficio ambiental y social en la región. Es por esto necesario el análisis de escenarios de redistribución del bagazo de caña para su gestión, como los propuestos en el caso de estudio, en los que también se muestra el beneficio de la inversión desde el marco de la circularidad.

Por otra parte, de acuerdo con los indicadores de sustentabilidad de la CONADESUCA, el porcentaje de superficie con aplicación de abonos orgánicos, derivados del compostaje de residuos, para la producción de caña de azúcar en la región se ha incrementado de menos de un 1% en 2015 hasta alrededor de un 15% promedio en 2021 [41]. Los valores de referencia establecidos por esta instancia indican que se pasó de un rango muy bajo (menos del 10%) a uno bajo (menos del 20%) en la aplicación de abonos orgánicos; teniendo como meta de los índices de sustentabilidad del campo llegar a porcentajes mayores en los próximos años.

En consecuencia, se prevé un potencial en la redistribución de residuos para la producción de composta y abonos orgánicos en la región, involucrando otras unidades productivas y sistemas agroindustriales como el de la industria tequilera y la producción agrícola en general.

5.1. Recomendación de Intervenciones subsecuentes

Derivado de la limitante en la información de costos específicos de redistribución al realizar la prueba de concepto se recomienda que, una vez seleccionados escenarios de interés, como una segunda etapa se realice el estudio de factibilidad económica específico para cada residuo desde cada unidad productiva interesada en la redistribución. En este proceso, se pueden integrar a la evaluación los incentivos económicos gubernamentales que puedan derivar de buscar procesos sostenibles e invertir en aumentar la eficiencia de estos.

Como oportunidad de seguimiento de este desarrollo se propone buscar mejoras a la programación de las herramientas y la visualización de la interfaz del usuario. Uno de estos aspectos se plantea estableciendo una base de datos gráfica que permita representar el modelo dinámico del sistema en una imagen, dentro de la hoja de cálculo, en conjunto con las interacciones en la redistribución y formación del ecosistema circular para visualizar y hacer más claros los diferentes escenarios. Lo anterior a través de funciones en programadas en el lenguaje seleccionado, Python.

5.2. Relevancia y trascendencia disciplinaria del caso

En el contexto nacional, son pocos los casos documentados de implementación de sistemas de economía circular regional. Dentro de los avances en este ámbito se tiene el caso Higuera, en donde se logró un modelo circular regional a partir del fomento a la sinergia entre las unidades de proceso. El presente desarrollo, contribuye al permitir tanto la valoración cuantitativa del sistema circular conformado, como la evaluación de otros posibles ecosistemas circulares a desarrollar en una región, brindando con el indicador de linealidad un instrumento para describir y medir las ventajas asociadas a cada posible escenario.

También es relevante la compatibilidad de uso del indicador propuesto a nivel regional para establecer el grado de linealidad de la redistribución con el índice de linealidad de flujo creado por la Fundación Ellen MacArthur, que se utiliza al interior de las industrias, y la posibilidad de complementarlo con análisis del ciclo de vida de los productos derivados del uso de los residuos con el objetivo de determinar el índice material de circularidad, coadyuvante en la identificación del posible valor circular de productos y materiales, así como de los riesgos asociados al diseño de las cadenas de suministro.

De esta forma, el análisis que se inicia dentro de cada industria para su propio beneficio se amplía con esta metodología a otras unidades económicas, para trabajar en conjunto por un beneficio colectivo social y ambiental en la región a partir de una gestión más sustentable de los residuos. Aspectos que se podrán evidenciar en los instrumentos de evaluación medio ambiental y de desarrollo municipales y regionales al implementar ecosistemas de economía regional.

Referencias bibliográficas

- [1] INECC, «Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático | Gobierno | gov.mx». <https://www.gob.mx/inecc> (accedido 8 de marzo de 2021).
- [2] IIEG, «Valles. Diagnóstico de la región». 14 de mayo de 2018. [En línea]. Disponible en: www.iieg.gob.mx
- [3] «10-Valles-Diagnóstico.pdf». Accedido: 14 de abril de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://iieg.gob.mx/ns/wp-content/uploads/2019/07/10-Valles-Diagn%C3%B3stico.pdf>
- [4] «Inicio | JIMAV». <https://www.jimav.org/> (accedido 6 de mayo de 2022).
- [5] «Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México 2019», 2019. <https://www.inegi.org.mx/programas/cngmd/2019/> (accedido 18 de mayo de 2021).
- [6] INEGI, «Residuos sólidos», 2021. <https://www.inegi.org.mx/temas/residuos/> (accedido 8 de febrero de 2021).
- [7] «Modelo de Ordenamiento Ecológico Territorial de Jalisco». <http://siga.jalisco.gob.mx/moet/> (accedido 7 de mayo de 2022).
- [8] SEMARNAT, «Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales | Gobierno | gov.mx», 2021. <https://www.gob.mx/semarnat> (accedido 27 de agosto de 2020).
- [9] C. N. para el D. S. de la C. de Azúcar, «8° Informe Estadístico del Sector Agroindustrial de la Caña de Azúcar en México», *gov.mx*. <http://www.gob.mx/conadesuca/es/articulos/8-informe-estadistico-del-sector-agroindustrial-de-la-cana-de-azucar-en-mexico?idiom=es> (accedido 14 de mayo de 2022).
- [10] «CONADESUCA». <https://www.siiba.conadesuca.gob.mx/infocana/Consulta/ReportesP.aspx?f=2&acu=1> (accedido 25 de marzo de 2022).
- [11] GAM, «GAM». <http://www.gamsa.com.mx/Tala.aspx?menu=0> (accedido 14 de mayo de 2022).
- [12] «GRUPO BETA SAN MIGUEL | INGENIOS». <https://www.bsm.com.mx/ameca.html> (accedido 17 de marzo de 2022).
- [13] «Ingenio Bellavista», *Ingenios Santos*. <https://www.santos.com.mx/ingenio-bellavista/> (accedido 14 de mayo de 2022).
- [14] «Datos Abiertos de México - datos.gob.mx». <https://datos.gob.mx/> (accedido 12 de mayo de 2022).
- [15] «INEL - Instituto Nacional de Energías Limpias», *Instituto Nacional de Energías Limpias*. <https://dgel.energia.gob.mx/inel/> (accedido 18 de mayo de 2021).
- [16] «Unión Ganadera Regional de Jalisco - Uso de melaza en raciones para bovinos finalizados en corral». http://www.ugrj.org.mx/index.php?option=com_content&task=view&id=579 (accedido 15 de marzo de 2022).
- [17] Senado de la República, «Gaceta del Senado», 2021. https://www.senado.gob.mx/64/gaceta_del_senado/documento/122141 (accedido 14 de abril de 2022).
- [18] Gobierno del estado de Jalisco, «Plan Regional de Desarrollo 2030. Región 11 Valles.» Gobierno del estado de Jalisco, 2008.
- [19] Agenda 2030, «Estrategia Nacional para la Implementación de la Agenda 2030 en México», *gov.mx*. <http://www.gob.mx/agenda2030/documentos/estrategia-nacional-de-la->

implementacion-de-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible-en-mexico (accedido 13 de abril de 2022).

- [20] «How to Build a Circular Economy | Ellen MacArthur Foundation». <https://ellenmacarthurfoundation.org/> (accedido 12 de julio de 2022).
- [21] «(PDF) Desarrollando Ecosistemas Regionales de Valor Circular: El Caso de Higuera, México», *ResearchGate*. Accedido: 25 de agosto de 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/295749522_Desarrollando_Ecosistemas_Regionales_de_Valor_Circular_El_Caso_de_Higuera_Mexico
- [22] M. A. Misrol, S. R. W. Alwi, J. S. Lim, y Z. A. Manan, «Multi-objective Optimization of an Integrated Energy-Water-Waste Nexus for Eco-Industrial Park», *Chem. Eng. Trans.*, vol. 89, pp. 349-354, dic. 2021, doi: 10.3303/CET2189059.
- [23] «(17) (PDF) Multi-Objective Optimization for Sustainable Supply Chain and Logistics: A Review». https://www.researchgate.net/publication/356913460_Multi-Objective_Optimization_for_Sustainable_Supply_Chain_and_Logistics_A_Review (accedido 15 de mayo de 2022).
- [24] C. Jayarathna, D. Agdas, L. Dawes, y T. Yigitcanlar, «Multi-Objective Optimization for Sustainable Supply Chain and Logistics: A Review», *Sustainability*, vol. 13, dic. 2021, doi: 10.3390/su132413617.
- [25] Y. Kazancoglu, I. Kazancoglu, y M. Sagnak, «A new holistic conceptual framework for green supply chain management performance assessment based on circular economy», *J. Clean. Prod.*, vol. 195, pp. 1282-1299, sep. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.06.015.
- [26] Y. A. Alamerew y D. Brissaud, «Modelling reverse supply chain through system dynamics for realizing the transition towards the circular economy: A case study on electric vehicle batteries», *J. Clean. Prod.*, vol. 254, p. 120025, may 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120025.
- [27] J. Valenzuela, A. Espinoza, y M. Alfaro-Marchant, «Design of a reverse logistics chain for a circular economy business model», vol. 40, pp. 306-315, dic. 2019.
- [28] M. Beheshtinia, P. Feizollahy, y M. Fathi, «Supply Chain Optimization Considering Sustainability Aspects», *Sustainability*, vol. 13, p. 11873, oct. 2021, doi: 10.3390/su132111873.
- [29] A. Zhang, J. X. Wang, M. Farooque, Y. Wang, y T.-M. Choi, «Multi-dimensional circular supply chain management: A comparative review of the state-of-the-art practices and research», *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 155, p. 102509, nov. 2021, doi: 10.1016/j.tre.2021.102509.
- [30] «Circulytics - A world without measurement doesn't work». <https://ellenmacarthurfoundation.org/resources/circulytics/overview> (accedido 15 de mayo de 2022).
- [31] «Circular Economy - UK, USA, Europe, Asia & South America - The Ellen MacArthur Foundation». <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/> (accedido 27 de agosto de 2020).
- [32] J. W. Forrester, *Principles of Systems*. Productivity Press, 1990.
- [33] J. W. Forrester, *Collected Papers of Jay W. Forrester*. Wright-Allen Press, 1975.
- [34] O. L. D. Weck, «MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION: HISTORY AND PROMISE», p. 14, 2004.
- [35] N. Srinivas y K. Deb, «Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms», *Evol. Comput.*, vol. 2, n.º 3, pp. 221-248, sep. 1994, doi: 10.1162/evco.1994.2.3.221.
- [36] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, y T. Meyarivan, «A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II», *IEEE Trans. Evol. Comput.*, vol. 6, n.º 2, pp. 182-197, abr. 2002, doi: 10.1109/4235.996017.
- [37] «pymoo: Multi-objective Optimization in Python». <https://pymoo.org/index.html> (accedido 25 de mayo de 2022).

- [38] «Automate Excel with Python (Open Source and Free)», *Automate Excel with Python (Open Source and Free)*. <https://www.xlwings.org/> (accedido 27 de noviembre de 2022).
- [39] «SENER | Sistema de Información Energética». https://sie.energia.gob.mx/movil.do?action=back&node=DIPS_ER_C10_ESP (accedido 17 de marzo de 2022).
- [40] «RESUMEN2 TRANSPARENCIA- IEEGYCEI2017.pdf». Accedido: 21 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://transparencia.info.jalisco.gob.mx/sites/default/files/RESUMEN2%20TRANSPARENCIA-%20IEEGYCEI2017.pdf>
- [41] «SI-SUSTENTABILIDAD». <https://www.siiba.conadesuca.gob.mx/sicostossustentabilidad/consultapublica/IndicadoresPublico.aspx?app=sustenta#> (accedido 21 de noviembre de 2022).

Índice de materias

A

algoritmo de clasificación no dominado (NSGA), · 18
Algoritmos Evolutivos · 18
Análisis causa-efecto · 11

C

Cronograma de trabajo · *Véase* cronograma

D

Diagrama de árbol del problema · 11
Diagrama de Ciclo Causal · 12
dinámica de sistemas · 17

E

Economía Circular · 15
ecosistemas de economía circular · 6
Estado de la cuestión · 15
estrategia metodológica · 20

F

Función Objetivo para minimizar la linealidad de flujo · 30

H

hallazgos · 28
Herramientas · 18

I

Imprevistos · 27
Índice Regional de Medio Ambiente · 9

M

Marco conceptual o de referencia · 15
Muestra o sujetos de investigación · 21

P

Palabras clave · 4
proceso de aplicación/intervención · *Véase* proceso de
aplicación o intervención

T

TOG
Trabajo de Obtención de Grado · 43

Índice de figuras

Figura 1. Región Valles, Jalisco.....	8
Figura 2. Diagrama de árbol del problema.	13
Figura 3. Diagrama de Ciclo Causal.	13
Figura 4. Delimitación de objetivos con base en el árbol de problemas.....	15
Figura 5. Matriz de Correlación de Variables que describen el Sistema Cañero y el Proceso Productivo presente.	24
Figura 6. Jerarquización de Generación Eléctrica por ingenio en cada zafra según % de bagazo.	25
Figura 7. Diagrama del Sistema de la Industria Cañera.	27
Figura 8. Gráfico comparativo de la generación de bagazo promedio registrada con los resultados del modelo.	31
Figura 9. Vista de hoja de cálculo de herramienta de análisis para el ingreso de datos y la presentación de resultados.....	33
Figura 10. Gráfico con redistribución de residuos en 4 diferentes escenarios.	35

Índice de tablas

Tabla 1. Actores principales del sistema Región Valles en materia de generación y gestión de los residuos sólidos adicionales a los municipios per se.	10
Tabla 2. Variables del sistema.....	26
Tabla 3. Cronograma de Etapas del proceso de desarrollo.	28
Tabla 4. Resultados de modelado dinámico y prospección comparados con registro estadístico [10].	32

Índice de siglas

AE Algoritmos Evolutivos

CONADESUCA Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar

DPTI Departamento de Procesos Tecnológicos e Industriales

EC Economía Circular

EECRV Ecosistema de Economía Circular en la Región Valles

GE Generación Eléctrica

IDI Investigación, Desarrollo e Innovación

IIEG Instituto de Información Estadística y Geográfica

INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía

INEL Inventario Nacional de Energías Limpias

IRMA Índice Regional de Medio Ambiente

ITESO Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente

JIMAV Junta Intermunicipal de Medio Ambiente para la Gestión Integral de la Región Valles

LGEC Ley General de Economía Circular

MOPs Problemas de Optimización Multiobjetivo

NSGA Algoritmo de Clasificación no Dominado

PAP Proyecto de Aplicación Profesional

RE Residuos Especiales

RSU Residuos Urbanos

SEC Sistema de Economía Circular

SEMADET Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial

TOG Trabajo de Obtención de Grado