Revista Geográfica | 165 | julio-diciembre 2022 | Artículos | 11-29
ISSN (impresa) 0031-0581 | ISSN (en línea) 2663-399X
DOI: https://doi.org/10.35424/regeo.165.2022.1126
Artículo de acceso abierto bajo licencia https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/

Optimización de costos de transporte para el aprovechamiento energético de la biomasa

Optimization of transportation costs for biomass use for energy generation

Raúl Tauro[1]
José Ezequiel Santibañez-Aguilar[2]
Roberto Rangel Heras[3]
Oscar Antonio Álvarez Galán[4]
José Luis Caballero[5]
Jorge Odenthal[6]
José Manuel Arroyo[7]
Borja Velázquez Martí[8]
Adrián Ghilardi[9]

Fecha de recibido: 18 de septiembre de 2021
Fecha de aceptado: 21 de enero de 2022

[1] Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES), Unidad Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México, correo electrónico: rtauro@cieco.unam.mx. ORCID: https://0000.0002-9789-3807

[2] Tecnológico de Monterrey, Monterrey, México correo electrónico: santibanez.ezequiel@tec.mx. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6907-8768

[3] Laboratorio Nacional de Análisis y Síntesis Ecológica (LANASE), Universidad Nacional Autónoma de México (ENES-UNAM), Morelia, México, correo electrónico: mcrangelheras@gmail.com. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3173-175X

[4] Laboratorio Nacional de Análisis y Síntesis Ecológica (LANASE), Universidad Nacional Autónoma de México (ENES-UNAM), Morelia, México, correo electrónico: oscar_alvarez90@outlook.com

[5] Laboratorio Nacional de Análisis y Síntesis Ecológica (LANASE), Universidad Nacional Autónoma de México (ENES-UNAM), Morelia, México. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA), UNAM, México, correo electrónico: jlcaballerobios@gmail.com

[6] Laboratorio Nacional de Análisis y Síntesis Ecológica (LANASE), Universidad Nacional Autónoma de México (ENES-UNAM), Morelia, México, correo electrónico: jorge.odenthal@gmail.com

[7] Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Sede Subregional en México, Unidad de Energía y Recursos Naturales, México, correo electrónico: jose.arroyo@cepal.org

[8] Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria, Universitat Politècnica de València (UPV), España, correo electrónico: borvemar@dmta.upv.es. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8157-0421

[9] Laboratorio Nacional de Análisis y Síntesis Ecológica (LANASE), Universidad Nacional Autónoma de México (ENES-UNAM), Morelia, México; Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA), UNAM, México, correo electrónico: aghilardi@ciga.unam.mx. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7286-0670

Resumen

El aprovechamiento de la biomasa con fines energéticos es una alternativa atractiva para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y su impacto ambiental. En este sentido, la ubicación geográfica de los sitios de producción y consumo de biomasa, su logística, así como la planificación de la cadena productiva, son factores indispensables para la evaluación y puesta en marcha de proyectos biomásicos con fines energéticos. Aunque diversos estudios han abordado estos problemas de forma separada, son pocos los trabajos que integran todos estos aspectos. En este trabajo se describe la integración de una serie de análisis espaciales, con un modelo matemático para la optimización de costos de transporte entre diferentes nodos de la cadena productiva de la biomasa. Mediante un caso de estudio y el análisis de diferentes escenarios de oferta y demanda, se evalúa el funcionamiento del módulo de optimización. Los resultados obtenidos permiten estimar de manera óptima la distribución de biomasa desde diferentes centros de oferta (nodos de almacenamiento), hacia diferentes usuarios (nodos de demanda), tomando al costo de transporte como función objetivo. La distribución óptima de biomasa permite planificar su uso para diferentes regiones de interés a nivel nacional.

Palabras clave: *SIG (Sistemas de Información Geográfica), biomasa, evaluación de costes, planificación, cadena de suministro.*

Abstract

Biomass for energy generation is an attractive alternative to reduce dependence on fossil fuels and their environmental impact. Thus, the geographical location of the production and consumption sites, logistics, as well as the planning of the supply chain are crucial factors for the assessment and implementation of bioenergy projects. Although several studies have addressed these problems separately, there are few papers that integrate all these aspects. This study focuses on the integration of geographic information systems, transport modelling, and transportation costs optimization through the use of a web platform to determine biomass production and consumption sites for energy purposes. Through a case study and the analysis of different supply and demand scenarios, the operation of the optimization module is evaluated. The results allow optimally estimating the distribution of biomass from different supply centers (storage nodes), towards different users (demand nodes), taking the cost of transport as an objective function. The optimal distribution of biomass allows planning its use for different regions of interest at the national level.

Key words: *Geographic Information Systems (GIS), biomass, cost assessment, planning, supply chain*.

Introducción

El aprovechamiento energético de la biomasa constituye una estrategia para la sustitución de combustibles fósiles y la mitigación de gases efecto invernadero (GEI) (Tauro *et al.*, 2018). Sin embargo, el uso sustentable de la biomasa puede estar limitado por diversas restricciones como la baja competitividad económica respecto a combustibles fósiles, su amplia distribución geográfica, su estacionalidad, y las dificultades que conlleva su cosecha y transporte (Lozano-García *et al.*, 2020). Además, la eficiencia de uso de cada recurso biomásico depende de su naturaleza (madera, semillas, aceites, jugos, excrementos, residuos sólidos urbanos —RSU, etc.) y de la tecnología utilizada para su transformación en biocombustibles. Por ejemplo, la densidad energética de las astillas de madera corresponde aproximadamente a 12.1 GJ/Mg (Rajak y Banerjee, 2020), mientras que si se gasifica, la energía entregada se sitúa en 5.6 GJ/Mg (Lozano y Lozano, 2018).

Es importante mencionar que, además de las tecnologías de transformación y de uso final, la sostenibilidad económica del aprovechamiento de la biomasa depende de sus cadenas de suministro o logística, es decir, de los mecanismos utilizados para la recolección y transporte. En este sentido, la modelización de sistemas logísticos resulta muy útil para la optimización de los costos de aprovechamiento de la biomasa. El estudio de los sistemas logísticos o cadenas de transformación de la biomasa se puede dividir en tres partes principales: a) la evaluación de los medios de transporte desde la oferta a la demanda, b) el análisis de la localización de puntos de acopio y plantas de transformación (i.e. nodos), y c) la definición de rutas de abastecimiento.

El transporte es uno de los factores de mayor impacto en el costo logístico de la biomasa, por lo que la geografía puede ser considerada como una barrera significativa para su aprovechamiento. El costo de transporte está en función de la distancia o de los tiempos de desplazamiento de un punto a otro. Los tiempos de desplazamiento se relacionan de manera intrínseca con la orografía y la red de transporte. De esta forma, el vínculo entre la distribución geográfica de los recursos y los costos de transporte interviene en la selección de regiones económicamente viables para la localización de puntos de acopio o plantas de procesamiento de biomasa. Por ejemplo, la escala o capacidad de una planta de procesamiento de biomasa se ve afectada por la cantidad de recursos biomásicos disponibles en una región específica (Ishii *et al.*, 2016, y Tittmann *et al.*, 2010) y los costos de transporte asociados.

Las metodologías utilizadas para la localización de plantas de biomasa implican en su mayoría modelos de programación lineal que minimizan algún objetivo logístico. Estos modelos están basados en balances de materia, reglas heurísticas y restricciones lógicas y de factibilidad. Por ejemplo, Espinoza-Vázquez *et al.* (2021) abordaron el efecto de las variaciones en la disponibilidad

de materia prima y producto en una cadena de suministro basada en residuos lignocelulósicos, mientras que Yadala *et al.* (2020) llevaron a cabo un estudio para el diseño de una cadena de suministro para producción de biodiesel a partir de algas considerando un modelo dependiente del tiempo. No obstante, la mayoría de estos trabajos no han considerado la relación existente entre la localización de los nodos en una cadena de suministro, el tipo de transporte y características de las carreteras.

Diversas investigaciones han desarrollado metodologías basadas en programación matemática y sistemas de información geográfica para la localización de plantas de biomasa, en la cual se pueden minimizar ciertos parámetros específicos como: a) costo (Velázquez-Martí y Torregrosa-Mira, 2020); b) ganancia neta (Fattahi *et al.,* 2020): c) impacto ambiental (Martínez-Guido *et al.,* 2019); d) demanda satisfecha (Espinoza-Vázquez *et al.,* 2021); entre otros. Trabajos como los de Velázquez-Martí y Annevelink (2009), Velázquez-Martí y Fernández-González (2010), Santibañez-Aguilar *et al.* (2019), y Rahemi *et al.* (2020), han mostrado diversas formas de combinar los sistemas de información geográfica y modelos matemáticos. Particularmente, una de las áreas de oportunidad para esta combinación, es la estimación de los costos de transporte, ya que son altamente dependientes de la cantidad de biomasa transportada (modelos de disponibilidad), distancias de transporte (SIG), topografía del camino (SIG), consumo específico de combustible y tipo de vehículo (véase Díaz-Ramírez *et al.*, 2017).

Con el fin de solventar la falta de integración de herramientas de análisis y procesamiento de información geográfica, con el modelamiento de costos de transporte y la optimización de la cadena productiva, en este trabajo se presenta el desarrollo de un modelo para optimizar los costos de transporte entre dos tipos de nodos de la cadena productiva: centros de acopio del recurso biomásico y centrales de uso final de la biomasa. Se considera una función de costos de transporte de biomasa para satisfacer una demanda específica, y se utiliza una plataforma geoespacial en línea, de libre acceso, para obtener los parámetros de entrada para el modelo.

Las principales ventajas respecto a otras contribuciones, es que la incorporación de este modelo permite: a) la selección óptima de los sitios de oferta (producción) y demanda de biomasa (centros de transformación o uso final) a partir de un conjunto de nodos analizados previamente mediante herramientas SIG; y b) la determinación de la cantidad de biomasa transportada entre sitios de oferta y demanda a través de rutas óptimas al mínimo costo de transporte. Además, este modelo permite tomar decisiones mediante interacción directa en tiempo real del usuario del modelo, a diferencia de modelos que traen asociadas soluciones predeterminadas. Finalmente, es importante mencionar que este algoritmo podría ser montado, previa configuración, en cualquier plataforma geoespacial. Siempre y cuando

el modelo cumpla con las características de hardware y software mínimas para ser utilizado.

En este trabajo se utiliza primeramente la plataforma geoespacial del Clúster de Biocombustibles Sólidos de México (Biowep, https://www.wegp.unam.mx/cemie/Mexico) (Tauro *et al.*, 2021), la cual permite develar para cada recurso biomásico y área de interés, los diferentes centros de acopio y centrales de uso final (i.e. nodos). Posteriormente se busca la conexión óptima entre los diferentes centros de acopio y centrales de uso final para un recurso biomásico de ejemplo, con el objetivo de minimizar los costos de transporte. De esta forma, la herramienta permitirá planificar el aprovechamiento óptimo de biomasa, determinando la cantidad de recursos a aprovechar en una región de interés (i.e.: 50%) al menor costo posible, y la dirección de dicho recurso biomásico entre diferentes nodos. Se discute la relevancia de integrar el modelo matemático para la distribución óptima de biomasa como un nuevo módulo en la plataforma geoespacial Biowep.

Metodología

La metodología propuesta en este artículo se basa en resolver el problema de planificación de la cadena de suministro considerada, el cual corresponde a determinar cómo será la interacción de los nodos en la cadena de aprovechamiento de la biomasa. Esto implica decidir qué nodo productivo (origen-punto de acopio) abastece a un consumidor, con qué cantidad de biomasa y a qué costo.

Es importante mencionar que existen tres formas de abordar este problema, por ejemplo: a) decidir qué sitios de producción abastecerán a determinados centros de acopio y nodos subsecuentes (siguiendo el sentido de la demanda); b) decidir desde qué centro de acopio se abastecerá la demanda de los consumidores, así como el origen de dicha biomasa (siguiendo el sentido de la oferta); y c) la selección simultánea de nodos en ambos sentidos. Este trabajo aborda el problema desde la opción c), optimizando el costo de abastecimiento de biomasa a diferentes usuarios de una zona de estudio.

Además, es esencial recalcar que la complejidad de la evaluación de cualquier cadena de suministro es directamente proporcional al número de opciones a evaluar, independientemente de la estrategia utilizada para obtener una configuración de la cadena productiva. La Figura 1 muestra un ejemplo del número de opciones a evaluar dependiendo del número de nodos. Ver clasificación de nodos en material suplementario. En el inciso a) de la Figura 1, se ilustra la necesidad de evaluar 512 alternativas si se consideran dos productores de biomasa (O_i), dos centros de acopio (S_j), dos procesadores (P_k) y dos consumidores (U_i) así como dos tipos de transporte para unir cada uno de los nodos. En contraste, en el inciso b) de la Figura 1, presenta un caso

con 128 alternativas, pues se considera que los centros de acopio sólo pueden recibir biomasa de uno de los dos productores de la misma, y es enviada a uno de los procesadores.

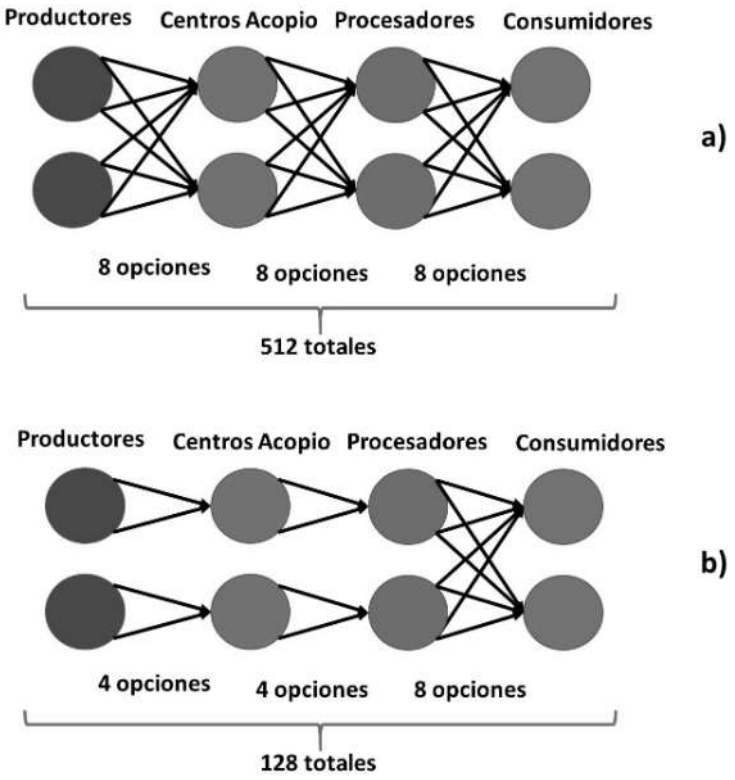

Figura 1. Número de opciones a evaluar dependiendo de la interacción entre nodos.

Tomando en cuenta la complejidad del sistema, cuando se incrementa el número de opciones a seleccionar en la planificación de una cadena de suministro, es altamente recomendable realizar un análisis previo para determinar las conexiones potenciales entre los nodos de dicha cadena. Dicho análisis se realizó utilizando SIG (Santibañez-Aguilar *et al.*, 2019). Fue necesario considerar aspectos tales como la distancia entre puntos, tiempos y costo de transporte, tipo de materia prima y temporalidad de la biomasa.

En ese sentido, el presente estudio aborda el problema de optimización en dos etapas: a) delimitación de los nodos de la cadena productiva en una región geográfica delimitada; y b) formulación de un modelo matemático para definir la configuración de la cadena productiva. Como se detalla a continuación,

la selección y delimitación de los nodos se realizó con información de la plataforma geoespacial Biowep, sin embargo, el modelo matemático fue corrido de manera independiente.

Caso de estudio

Como caso de estudio para el modelo de optimización, se seleccionaron los residuos de caña de azúcar de riego y temporal (puntas y hojas), en una de las regiones productoras de México en el límite de los estados de Veracruz, Tamaulipas y San Luis Potosí. Esto se asocia también al creciente interés en el uso de residuos biomásicos por parte de los ingenios azucareros para cogeneración, especialmente fuera de períodos de zafra.

Dicha región cuenta con una alta producción de recursos biomásicos distribuidos en diversos centros de acopio y plantas de procesamiento. Los nodos obtenidos por medio de la plataforma Biowep, las rutas de transporte entre ellos, la disponibilidad y demanda de biomasa fueron tomados como base para el modelo de optimización. La Figura 2 muestra una representación general del caso de estudio, el cual considera 11 centros de acopio de biomasa (CA) y ocho potenciales consumidores (CS) distribuidos geográficamente. Es importante mencionar que se adjunta la zona de estudio en formato .kml como material suplementario, para el caso que se requiera repetir la selección de los nodos en la plataforma Biowep.

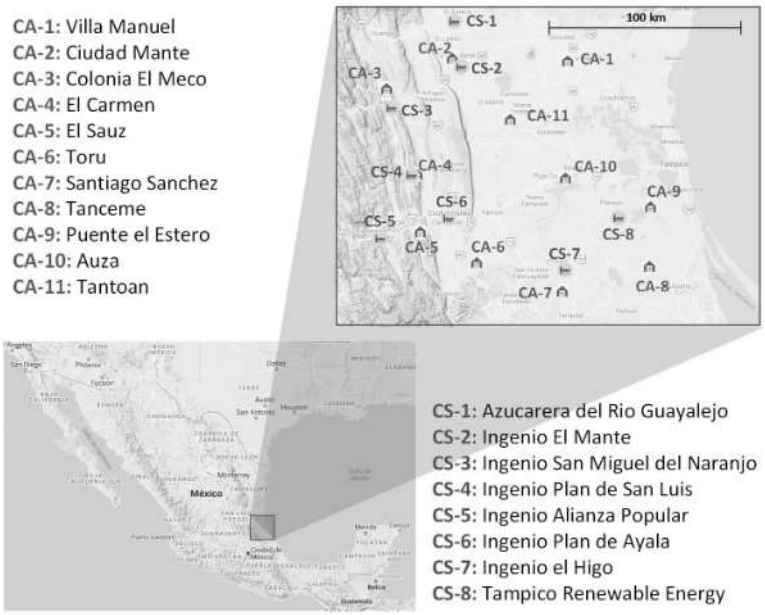

Figura 2. Ubicación de la región evaluada para el caso de estudio.

La Tabla 1 detalla un ejemplo de la información obtenida de la plataforma Biowep, necesaria para alimentar el modelo de optimización de costos. Existe una relación directa entre la cantidad total de biomasa disponible en la zona de estudio, la capacidad de potencia eléctrica instalada, y la biomasa demandada por un usuario específico (i.e.: CS-1). La cantidad total de biomasa estará repartida en diferentes nodos de almacenamiento (CA), cuya cantidad máxima de almacenamiento es uno de los parámetros de entrada para el modelo, junto a la distancia entre nodos y sus respectivos costos de transporte. Cada nodo de acopio tiene una capacidad de almacenamiento determinada, medida en toneladas de materia seca al año (Mg/año) o su equivalente energético (MW). El modelo calcula la distancia y el costo de transporte desde cada usuario (CS) hasta cada nodo de almacenamiento.

La capa de oferta de biomasa, relacionada a los rastrojos de caña de azúcar, cuenta con 100 centros de acopio distribuidos a nivel nacional, mientras que para el estudio de caso se contemplaron 11 centros que permitieron realizar los cálculos de manera eficiente utilizando el código de la plataforma junto con lenguajes de modelamiento algebraico, tales como GAMS, PYOMO y LINGO, entre otros. La capa de demanda considera la distribución de todos los ingenios azucareros del país con sus respectivas demandas energéticas, que se utilizan para comparar con la energía almacenada (cantidad de biomasa) en los nodos de oferta. Para ver selección de nodos ver material suplementario.

Tabla 1. Ejemplo de información obtenida de la plataforma geoespacial

Potencial teórico PJ/ año (Tg/año)	*Potencial Técnico* PJ/ año (Tg/año)*	*Potencia instalada** MWe (Tg/año)*	*Biomasa almacenada nodo CA-1 (Tg/año)*	*Potencia instalada usuario CS-1 MWe (Tg/año)*	*Distancia entre nodos CA-1 y CS-1 (km)*	*Costo de transporte ($MXN/ton)*
23.1 (1.42)	21.7 (1.34)	145 (0.62)	(0.26)	45 (0.19)	94	1,816

* Se estimó excluyendo de la zona de estudio las pendientes mayores a 10%.

** Valor obtenido para toda la zona de estudio. Se obtuvo considerando que todo el rastrojo es densificado en pacas chicas, y convertido en electricidad por medio de una turbina de vapor con una eficiencia de planta del 30% y un factor de planta de 0.63%.

Escenarios de demanda

Se resolvió el problema de optimización para dos ejemplos representativos dentro del mismo caso de estudio. Los ejemplos sirvieron para probar la obtención de datos a partir del módulo, la factibilidad de implementación en la plataforma de un lenguaje de modelamiento matemático y el

comportamiento que tiene el costo total de transporte de biomasa respecto a la cantidad de biomasa transportada en la región geográfica propuesta. Cabe resaltar que el modelo actual funciona para todos los nodos a nivel nacional, a pesar que en este trabajo se utilizó un estudio de caso.

Para el caso de estudio se definió como función objetivo el costo de transporte total de la zona de estudio, que se obtiene de sumar los costos de transporte específicos de cada centro de acopio hasta cada usuario, satisfaciendo la demanda total requerida (CA1 - CS1; CA1 - CS2; CA1 – CSn). Esto se repite para todos los usuarios de la zona seleccionada. De esta forma, el modelo minimiza el costo de transporte total, es decir, lo mínimo que podría valer la suma de todos los costos de transporte que buscan satisfacer la demanda de todos los consumidores. Generalmente, esta optimización está asociada a las menores distancias de transporte. La idea de considerar todos los usuarios de una zona, es que a cada uno le interesará abastecerse al menor costo. Se optimiza de esta forma el abastecimiento a cada uno de los consumidores (costo de transporte mínimo, porque se optimiza el costo de transporte de todos los nodos de demanda).

Al respecto, el primer ejemplo explorado es la minimización del costo de transporte con un abastecimiento de al menos 50% de toda la demanda requerida. El segundo ejemplo corresponde a la minimización del costo de transporte con un abastecimiento del 100% de la demanda total de biomasa requerida por los consumidores. Cabe señalar que estos ejemplos se desarrollaron para observar que pueden existir diversas maneras de abastecer la biomasa a los consumidores.

Formulación del modelo matemático para definir la configuración de la cadena productiva

La formulación del modelo matemático consiste en diversas ecuaciones basadas en balances de materia y en restricciones de factibilidad técnicas y económicas. Es importante mencionar que el modelo matemático está limitado a la interacción entre sitios productores o centros de acopio y consumidores de biomasa o centrales de uso final de los recursos, es decir, entre oferta y demanda.

Inicialmente para modelar la interacción que existe entre los nodos, se propusieron diferentes ecuaciones: en primer lugar, se definen las relaciones que deben considerarse en caso de que un centro de acopio abastezca un centro de consumo, así como el caso contrario. En resumen, si un centro de acopio abastece a un centro de consumo, se debe calcular el costo de transporte y la cantidad de biomasa transportada debe estar entre límites mínimos y máximos técnicamente factibles (i. e. un vehículo de una tonelada a la semana, 10 vehículos de 20 toneladas a la semana, etc.). En contraparte, si un centro de acopio no envía biomasa a un centro de consumo, la biomasa

transportada es cero y consecuentemente el costo de transporte también, por tanto la conexión entre este centro de acopio y consumo no existe en la cadena de suministro final. Debido a que la cantidad transportada es una variable a determinar por el modelo (no se conoce), se proponen ecuaciones que puedan modelar ambos casos, lo cual se hace mediante variables binarias.

La Ecuación 1 y la Ecuación 2, indican que, en caso de existir la conexión entre consumidor y productor ($y_{k,l}^{P-U}=1$), entonces la cantidad transportada entre ellos ($F_{k,l}^{P-U}$) debe ser menor que su valor máximo a transportar (${}^{MAX}F_{k,l}^{P-U}$) y mayor que la cantidad mínima a transportar (${}^{MIN}F_{k,l}^{P-U}$). En contraparte, si la variable binaria es cero, entonces el valor de la cantidad transportada entre ellos ($F_{k,l}^{P-U}$) será cero.

$$F_{k,l}^{P-U} \leq {}^{MAX}F_{k,l}^{P-U} \cdot y_{k,l}^{P-U}, \quad \forall k \in Productor, l \in Consumidor \qquad (1)$$

$$F_{k,l}^{P-U} \geq {}^{MIN}F_{k,l}^{P-U} \cdot y_{k,l}^{P-U}, \quad \forall k \in Productor, l \in Consumidor \qquad (2)$$

La Ecuación 3 permite calcular el costo de transporte entre un sitio de consumo y un productor.

$$C_{k,l}^{TRANSPTOTAL} = C_{k,l}^{Transp} \cdot F_{k,l}^{P-U} \qquad (3)$$

El costo de transporte unitario ($C_{k,l}^{Transp}$), costo por unidad de materia seca transportada) está calculado por la Ecuación 4 (Tauro *et al.*, 2018), la cual considera el costo de combustible ($C^{especifico}$) y la distancia existente entre distintos puntos ($d_{k,l}^{P-U}$), como, por ejemplo, entre consumidor y productor. Se contemplan tres tipos de camiones como medios de transporte, con sus respectivas capacidades de carga ($1/Cap$) para cada uno de los 5 tipos de materias considerados (leña, astillas, pellets, rastrojo y pacas). Las constantes son valores empíricos que contemplan los costos de retorno y el porcentaje del costo de combustible en el costo total de transporte.

$$C_{k,l}^{Transp} = d_{k,l}^{P-U} \cdot C^{especifico} \cdot 1.8 \cdot P^{combustible} \cdot \left(\frac{1}{0.38}\right)\left(\frac{1}{Cap}\right), \quad \forall k \in Productor, l \in Consumidor \qquad (4)$$

Debido a la naturaleza de este tipo de cadenas productivas, algunas conexiones (interacciones) entre los nodos productores y consumidores pueden ser fijadas. Las interacciones entre los sitios productores y consumidores podrían ser fijadas por el usuario por algunas de las siguientes razones: a) el consumidor ya existe y no puede ser ignorado, o b) se desea que el consumidor exista independientemente de la configuración de la cadena.

En este caso, el modelo permite definir la existencia de conexiones previamente establecidas por el usuario. Esto puede ser usado por el usuario,

en caso de que su interés sea analizar un nodo o conexión específica. Es importante señalar que uno de los objetivos del modelo es que el usuario pueda involucrarse en la toma de decisiones. La Ecuación 5 presenta la manera en que las conexiones son fijadas en el modelo (se usa un valor igual a 1 para denotar existencia de una conexión específica).

$$y_{k,l}^{P-U} = 1, \qquad \forall k \in Seleccion1, l \in Seleccion2 \tag{5}$$

Adicionalmente, un consumidor será considerado en la configuración final de la cadena productiva si al menos existe alguna conexión entre éste y un sitio productor. En contraparte, si ninguna conexión es generada con un consumidor, entonces el consumidor no debe ser incluido en la topología final y por tanto las ecuaciones asociadas a éste. Dicho comportamiento puede ser expresado por relaciones entre variables binarias (Ecuación 6 y Ecuación 7.

$$\sum_k \sum_l y_{k,l}^{P-U} \geq y_l^{Existencia}, \qquad \forall l \in Consumidor \tag{6}$$

$$y_{k,l}^{P-U} \leq y_l^{Existencia}, \qquad \forall k \in Productor, l \in Consumidor \tag{7}$$

La interacción entre los nodos de la cadena productiva está dada por la cantidad de materia prima transportada entre sitios de consumo y de producción. La Ecuación (8) establece que la cantidad recibida de materia en los sitios de consumo es igual a la suma de la cantidad de materia transportada desde los sitios de producción a un sitio de consumo específico.

$$F_l^U = \sum_k F_{k,l}^{P-U}, \qquad \forall l \in Consumidor \tag{8}$$

Adicionalmente, la Ecuación (9) indica que la cantidad de materia enviada desde un sitio de producción es igual a la suma de la cantidad transportada hacia todos los sitios de consumo, tomando como base un sitio de producción.

$$F_k^P = \sum_l F_{k,l}^{P-U}, \qquad \forall k \in Productor \tag{9}$$

Finalmente, el modelo considera una restricción extra para que las variables de decisión ($y_{k,l}^{P-U}$) estén relacionadas de acuerdo con un criterio basado en la distancia existente entre sitios de consumo y producción. La Ecuación 10 limita las conexiones posibles entre consumidor y productor a una distancia menor o igual a la distancia máxima a considerar.

$$d_{k,l}^{MAX} \geq d_{k,l}^{P-U} \cdot y_{k,l}^{P-U}, \qquad \forall k \in Productor, l \in Consumidor \tag{10}$$

Resultados

Se consideraron dos ejemplos de aplicación del modelo de optimización. El primero asume que se satisface al menos el 50% de la demanda de energía de todos los usuarios seleccionados en la zona de estudio. En el segundo ejemplo se cubre el 100% de la demanda. Esto da flexibilidad al modelo para planificar el aprovechamiento de biomasa según la cantidad de energía que necesiten satisfacer los usuarios.

En ambos ejemplos se eligió al costo de transporte total como objetivo, ya que la minimización de éste también minimizará los costos de transporte individuales para cada uno de los consumidores. Además, se puede analizar cómo se van abasteciendo los consumidores conforme el porcentaje de demanda satisfecha incrementa.

Ejemplo A. Mínimo costo de transporte para el 50 % de toda la demanda requerida

Primeramente, se obtuvo una solución para minimizar el costo de transporte (Ecuación (4)) asumiendo que la demanda satisfecha es de al menos el 50% de la demanda total para los consumidores de la zona de estudio. La Tabla 2 presenta un resumen de los resultados obtenidos para la biomasa transportada, el costo de transporte y la distancia entre centros de acopio y consumidores. En este caso se obtuvieron 4 centros de acopio para satisfacer de manera óptima la demanda de 4 consumidores (8 nodos de los 19 totales), siendo el costo total de transporte igual a $586,103 pesos mexicanos por año (MXN). Como se mencionó en la metodología, se puede observar que el resultado del modelo matemático está fuertemente asociado a la distancia entre centros de acopio y consumidores, siendo resultado de las rutas con la menor distancia (10, 11, 12 y 17 km).

Respecto al consumidor CS-3 (Ingenio San Miguel del Naranjo), a pesar de recibir la mayor cantidad de biomasa (10,400 Mg/año) se estima un costo de transporte moderado ($182,456 MXN), lo cual se debe a que recibe la biomasa desde el centro de acopio CA-3 (Colonia El Meco) en una ruta con 10 km de distancia. Por otro lado, el mayor costo de transporte corresponde a la biomasa transportada entre el centro de acopio CA-7 (Santiago Sánchez) al consumidor CS-7 (Ingenio El Higo), debido a que la cantidad de biomasa transportada es considerable y la distancia es igual a 17 km (la mayor del Ejemplo A).

Es importante mencionar que no son seleccionados los ocho consumidores (usuarios) iniciales del caso de estudio. Esto quiere decir que, aunque se abastece la mitad de la demanda requerida de biomasa por un usuario, no implica que todos los consumidores serán abastecidos en una misma proporción. La Tabla 3 muestra la cantidad y porcentaje de biomasa abastecida a cada uno de los consumidores para el caso de 50% de la

demanda total cubierta. La Tabla 3 permite observar que el consumidor con mayor demanda (CS-3) solo es abastecido en un 48.6%, a pesar de contar con con la ruta más corta hacia un centro de acopio. Además, el consumidor CS-7 (Ingenio El Higo) es abastecido un 94.3% aunque la distancia a su centro de acopio más cercano es de 17 km.

Tabla 2. Cantidad de biomasa transportada y costo de transporte asociado entre sitios de producción y consumo para la minimización de costo total de transporte y 50% de la demanda satisfecha

Centros de acopio		*Consumidor*		*Cantidad (Mg/año)*	*Costo (MXN/año)*	*Distancia (km)*
Clave centro de acopio	*Nombre de sitio*	*Clave consumidor*	*Nombre de sitio*			
CA-2	Ciudad Mante	CS-2	Ingenio El Mante	2,160	45,474	12
CA-3	Colonia El Meco	CS-3	Ingenio San Miguel del Naranjo	10,400	182,456	10
CA-4	El Carmen	CS-4	Ingenio Plan de San Luis	5,963	115,066	11
CA-7	Santiago Sánchez	CS-7	Ingenio El Higo	8,151	243,107	17
			Total	26,674	586,103	

Tabla 3. Porcentaje de demanda cubierta por consumidor seleccionado considerando un 50% de demanda total satisfecha

Clave consumidor	*Nombre de sitio*	*% demanda satisfecha*	*Demanda requerida (Mg/año)*
CS-2	Ingenio El Mante	100.0	2,160
CS-3	Ingenio San Miguel del Naranjo	48.6	21,420
CS-4	Ingenio Plan de San Luis	100.0	5,963
CS-7	Ingenio El Higo	94.3	8,640

Ejemplo B. Mínimo costo de transporte asumiendo que se satisface toda la demanda del usuario

Para el caso en el cual se minimiza el costo de transporte descrito en la Ecuación 4, se observa que el costo mínimo para abastecer toda la demanda de biomasa en los sitios de consumo es igual a $2,511,053 MXN. En este

ejemplo en particular, solo se seleccionan seis sitios de oferta para abastecer 53,348 Mg/año en los ocho sitios de consumo. Acorde a los resultados, se observa que la biomasa abastecida corresponde a un 3.56% de la biomasa total disponible en los centros de acopio, lo cual implica que estos centros de acopio son capaces de abastecer un número mucho mayor de consumidores o bien que la biomasa se puede utilizar para otros fines. La Tabla 4 presenta la cantidad transportada entre cada sitio de oferta y consumo, así como las distancias entre ellos. La distancia mínima de las conexiones resultantes fue igual a 10 km, mientras que la máxima fue de 78 km.

Tabla 4. Cantidad de biomasa transportada y costo de transporte asociado entre sitios de producción y consumo para la minimización de costo total de transporte y demanda totalmente satisfecha

Centros de acopio		*Consumidor*		*Cantidad (Mg/año)*	*Costo (MXN)*	*Distancia (km)*
Clave centro de acopio	*Nombre de sitio*	*Clave consumidor*	*Nombre de sitio*			
CA-2	Ciudad Mante	CS-1	Azucarera del Río Guayalejo	3,848	195,750	29
CA-2	Ciudad Mante	CS-2	Ingenio El Mante	2,160	45,474	12
CA-2	Ciudad Mante	CS-3	Ingenio San Miguel del Naranjo	1,040	142,316	78
CA-3	Colonia El Meco	CS-3	Ingenio San Miguel del Naranjo	10,400	182,456	10
CA-4	El Carmen	CS-3	Ingenio San Miguel del Naranjo	9,980	875,439	50
CA-4	El Carmen	CS-4	Ingenio Plan de San Luis	5,963	115,066	11
CA-5	El Sauz	CS-5	Ingenio Alianza Popular	4,388	323,289	42
CA-5	El Sauz	CS-6	Ingenio Plan de Ayala	3,150	187,895	34
CA-7	Santiago Sánchez	CS-7	Ingenio El Higo	8,640	257,684	17
CA-9	Puente El Estero	CS-8	Tampico Renewable Energy	3,780	185,684	28
			Total	53,348	2,511,053	

Con relación al consumidor con mayor demanda de biomasa, CS-3 (Ingenio San Miguel del Naranjo), este podría ser abastecido por un solo centro de acopio. No obstante, se abastece a partir de tres centros de acopio (CA-2, CA-3 y CA-4). Esto puede notarse debido a que la biomasa total transportada desde el centro de acopio CA-2 (Ciudad Mante) es solo 2.69 % de la biomasa disponible en este sitio de abastecimiento. Es decir, el centro de acopio CA-2 tiene la biomasa suficiente para abastecer al consumidor CS-3. Esta diversificación de centros de acopio se presenta debido a la limitante en la cantidad transportada entre centro de acopio y consumidor (520 viajes anuales con capacidad de 20 Mg cada viaje). Nótese que el costo de transporte entre CA-4 y CS-3 es de $875,439 pesos mexicanos lo cual corresponde al mayor valor de costos de transporte en la solución obtenida. Esto se debe a que corresponde a una cantidad de biomasa alta y a una distancia considerable. En contraste, el costo de transporte entre CA-2 y CS-3 es de $142,316 pesos mexicanos, un costo relativamente moderado debido a que la cantidad de biomasa transportada es solo 1,040 Mg/año, aunque la distancia de dicho trayecto sea igual a 78 km.

Adicionalmente, desde el punto de vista de los suministradores de biomasa, en la mayoría de los casos se seleccionan los consumidores con la menor distancia a un centro de acopio determinado. Cabe mencionar, que la solución del problema no es trivial y no se puede definir solo por la distancia entre los centros de acopio y consumidores, sino que dependen, a su vez, de la cantidad de biomasa a transportar.

Discusión

Comparación entre ejemplos: A.- 50 % de demanda abastecida y B.- 100 % de demanda abastecida

Es importante analizar las principales diferencias entre los dos ejemplos mostrados. En el primer ejemplo se abastece el 50% de la demanda total de biomasa de la zona de estudio, mientras en el segundo ejemplo se discute una propuesta para abastecer el 100% de la demanda total de biomasa.

La primera diferencia importante es el costo de transporte encontrado, ya que para el ejemplo A, éste corresponde a $586,103 MXN, mientras que en el caso B, se observa un costo de transporte de $2,511,053 MXN. Esto representa una diferencia de 328% entre el costo del ejemplo A respecto del ejemplo B, para un cambio de 50% a 100% de la demanda total de biomasa abastecida (desde 26,676 Mg/año hasta 53,348 Mg/año). En este sentido, el usuario de biomasa puede optar por abastecer una proporción del total de biomasa requerida.

Otra diferencia para destacar es la cantidad de biomasa abastecida a los sitios de consumo, ya que en el ejemplo A se abastecen 26,676 Mg/año a

partir de 4 centros de acopio, mientras que para abastecer 53,348 Mg/año de biomasa del ejemplo B son necesarios seis centros de acopio. Es decir, dos centros de acopio adicionales son suficientes para proveer la biomasa equivalente a los cuatro centros de acopio del ejemplo A. Específicamente el CA-5 (El Sauz) y CA-9 (Puente El Estero).

Adicionalmente, es importante destacar que en ninguno de los ejemplos se necesita el total de la biomasa disponible en los centros de acopio, por lo que se puede concluir que existe disponibilidad de biomasa suficiente que podría tener otros usos, además del energético. Se observa que se tiene la cantidad de biomasa suficiente para abastecer consumidores adicionales en caso de ser necesario.

La Figura 3 muestra la comparación de la distribución de los centros de acopio y consumidores para los ejemplos A y B. En el ejemplo A se ilustra que los centros de acopio seleccionados por el modelo abastecen a los consumidores aledaños. En el ejemplo B se observa que los consumidores pueden ser abastecidos desde varios centros de acopio cercanos considerando los menores costos de transporte.

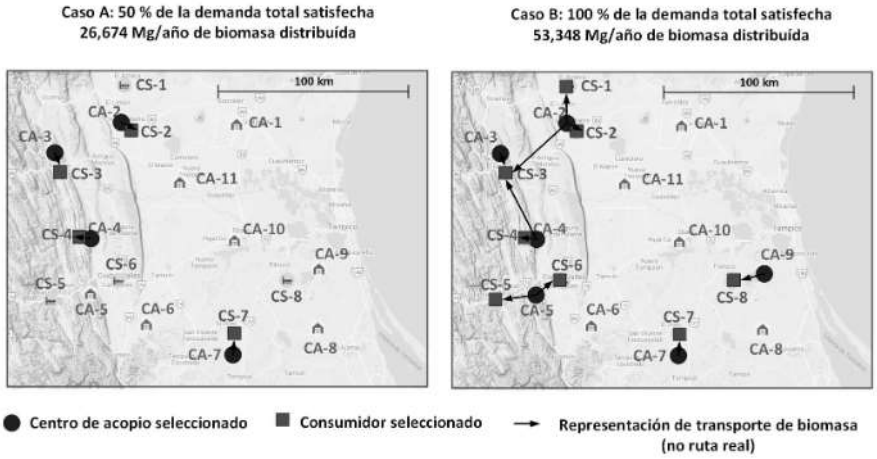

Figura 3. Comparación de sitios de la cadena productiva seleccionados.

Conclusiones

En este trabajo se pudo validar el funcionamiento de un modelo de optimización para la selección óptima de nodos de producción y consumo de biomasa, mediante información obtenida de una plataforma geoespacial. Para ello, se abordaron dos ejemplos representativos de un caso de estudio correspondiente a la región noreste de México con el objetivo de minimizar el costo total de transporte sujeto a cierto nivel de demanda satisfecha. Los resultados mostraron que en ninguno de los ejemplos abordados se necesita

un porcentaje elevado de biomasa almacenada en los centros de acopio para satisfacer la demanda de energía de la zona de estudio. Se concluye que en la zona de estudio existe suficiente disponibilidad de biomasa como remanente, que puede aprovecharse para diferentes fines.

Respecto a la selección de nodos para satisfacer la demanda de energía en la zona de estudio, destaca que no es necesario seleccionar todos los centros de acopio potenciales para satisfacer la demanda requerida. La metodología presentada puede coadyuvar a proponer estrategias de abastecimiento de biomasa en los sitios de consumo y otros usos finales. Finalmente, en trabajos futuros se pretende la integración del modelo de optimización en la plataforma web para optimizar los costos para cada usuario de manera independiente o global sin depender de que se la selección de nodos o la optimización se realicen en interfaces separadas. Esta integración permitirá estimar y visualizar la configuración de la cadena productiva y los costos asociados a la logística de la biomasa en una región de interés, aumentando los alcances de las plataformas geoespaciales como herramientas de planificación.

Agradecimientos

Se agradece al Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH), por el apoyo brindado mediante el proyecto GEO-08, 2020 de su Programa de Asistencia Técnica (PAT) 2020. También al Cluster de Biocombustibles Sólidos (BCS), Fondo Sectorial CONACYTSENER-FSE (CEMIE-Bio) no. 246911. Finalmente, se agradece el apoyo brindado por la Unidad de Energía y Recursos Naturales de la Sede Subregional en México de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) de las Naciones Unidas en el marco de la iniciativa sobre la Plataforma Geoespacial para la Evaluación del Potencial Energético de los Recursos Biomásicos en los Países del Sistema de la Integración Centroamericana (SICA) y en el taller sobre la "Evaluación del aprovechamiento energético de la biomasa. Planteamientos para optimizar los costos de localización de plantas de energía" realizado en línea los días 23 y 30 de septiembre de 2020, los cuales contribuyeron a la realización del presente documento.

Bibliografía

Díaz-Ramírez, J., Giraldo-Peralta, N., Flores-Cerón, D., Rangel, V., Mejía-Argueta, C., Huertas, J. I., Bernal, M. (2017). Eco-driving key factors that influence fuel consumption in heavy-truck fleets: A Colombian case. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 56, 258-270. https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.08.012

Espinoza-Vázquez, Y. M., Gómez-Castro, F.I., Ponce-Ortega, J. M. (2021). Optimization of the supply chain for the production of biomass-based fuels and high-added value products in Mexico. *Computers & Chemical Engineering,* 145. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.107181

Fattahi, M., Govindan, K., Farhadkhani, M. (2020). Sustainable supply chain planning for biomass-based power generation with environmental risk and supply uncertainty considerations: a real-life case study. *International Journal of Production Research,* 59 (10), 3084-3108. DOI: https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1746427

Ishii, K., Furuichi, T., Fujiyama, A., Watanabe, S. (2016). Logistics cost analysis of rice straw pellets for feasible production capacity and spatial scale in heat utilization systems: A case study in Nanporo town, Hokkaido, Japan. *Biomass and Bioenergy*, 94, 155-166. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.08.007

Lozano, F. J., Lozano, R. (2018). Assessing the potential sustainability benefits of agricultural residues: Biomass conversion to syngas for energy generation or to chemicals production. *Journal of cleaner production*, 172, 4162-4169. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.037

Lozano-García, D. F., Santibañez-Aguilar, J. E., Lozano, F. J., Flores-Tlacuahuac, A. (2020). GIS-based modeling of residual biomass availability for energy and production in Mexico. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109610

Martínez-Guido, S. I., Ríos-Badrán, I. M., Gutiérrez-Antonio, C., Ponce-Ortega, J. M. (2019). Strategic planning for the use of waste biomass pellets in Mexican power plants. *Renewable energy*, 130, 622-632. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.06.084

Rahemi H., Torabi, S. A., Avami A., Jolai, F. (2020). Bioethanol supply chain network design considering land characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109517

Rajak, R. C., Banerjee, R. (2020). An innovative approach of mixed enzymatic venture for 2G ethanol production from lignocellulosic feedstock. *Energy Conversion and Management*, 207. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112504

Santibáñez-Aguilar, J. E., Lozano-García, D. F., Lozano, F. J., Flores-Tlacuahuac, A. (2019). Sequential use of geographic information system and mathematical programming for the optimal planning for energy production system from residual biomass. *Industrial & Engineering Chemistry Research*; 58 (35), 15818-15837. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b00492.

Tauro, R., Rangel, R., Suárez, R., Caballero, J. L., Anaya-Merchant, C., Salinas-Melgoza, M., Ghilardi, A. (2021). An integrated user-friendly web-based spatial platform for bioenergy planning. *Biomass and Bioenergy*, 145. DOI: https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105939

Tauro, R., Serrano-Medrano, M., & Masera, O. (2018). Solid biofuels in Mexico: a sustainable alternative to satisfy the increasing demand for heat and

power. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20 (7), 1527-1539. DOI: https://doi.org/10.1007/s10098-018-1529-z

Tittmann, P. W., Parker, N. C., Hart, Q. J., Jenkins, B. M. (2010). A spatially explicit techno-economic model of bioenergy and biofuels production in California. *Journal of Transport Geography*, 18 (6), 715-728. DOI: https://doi.org/10.1016/J.JTRANGEO.2010.06.005

Velázquez-Martí, B., Torregrosa-Mira, A. (2020). Logistic models for distribution of straw in crops of fruit tree plots where mulch is applied. *Computers and Electronics in Agriculture*, 175. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105604

Velázquez-Martí, B., Fernández-González, E. (2010). Mathematical algorithms to locate factories to transform biomass in bioenergy focused on logistic network construction. *Renewable Energy*, 35 (9), 2136-2142. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.02.011

Velázquez-Martí, B., Annevelink, E. (2009). GIS application to define biomass collection points as sources for linear programming of delivery networks. *Transactions of ASABE,* 52 (4), 1069-1078. DOI: http://dx.doi.org/10.13031/2013.27776

Yadala, S., Smith, J. D., Young, D., Crunkleton, D. W., Cremaschi, S. (2020). Optimization of the algal biomass to biodiesel supply chain: case studies of the state of Oklahoma and the United States. *Processes*, 8 (4), 476. DOI: https://doi.org/10.3390/pr8040476