

# **DISEÑO DE UN PROCESO DE PRODUCCIÓN DE ACEITE DE MICROALGAS CON ENFOQUE A RUTA MÁS CORTA**

## *DESIGN OF A MICROALGAE OIL PRODUCTION PROCESS WITH A SHORTEST ROUTE APPROACH*

**Verónica Cordero Velázquez**

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México  
*m2003015@itcelaya.edu.mx*

**Salvador Hernández González**

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México  
*salvador.hernandez@itcelaya.edu.mx*

**Vicente Figueroa Fernández**

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México  
*vicente.figueroa@itcelaya.edu.mx*

**José Alfredo Jiménez García**

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México  
*alfredo.jimenez@itcelaya.edu.mx*

**Israel De la Cruz Madrigal**

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México  
*israel.delacruz@itcelaya.edu.mx*

**Recepción:** 31/mayo/2021

**Aceptación:** 24/junio/2021

### **Resumen**

En la actualidad existen diversas alternativas que podrían reemplazar a los combustibles, uno de estos es la producción de aceite a partir de microalgas. Existen diferentes tecnologías que pueden ser utilizadas a nivel industrial, para cada etapa de dicho proceso, el cual consta de tres etapas generales: cultivo, cosecha y extracción. El objetivo del presente artículo es crear una red con las diferentes tecnologías y aplicar el método de la ruta más corta utilizando el programa Tora para seleccionar aquellas que generen menos gastos energéticos y costos de producción unitario en el proceso de producción de aceite de microalgas a partir de la biomasa seca. Se obtienen dos rutas óptimas, la primera considerando el consumo energético el cual incluye las tecnologías A1-C2-D3-E2-F2, y la segunda considerando el costo de producción unitario A1-C2-D4-E2-F2.

**Palabras Clave:** Microalgas, óptima, red, ruta más corta, tecnologías.

## **Abstract**

*Currently there are several alternatives that could replace fuels, one of these is the production of oil from microalgae. There are different technologies that can be used at an industrial level, for each stage of this process that consists of three general stages: cultivation, harvesting and extraction. The objective of this article is to create a network with the different technologies and apply the method of the shortest route using the Tora program to select those that generate less energy costs and unit production costs in the process of producing microalgae oil from of dry biomass. Two optimal routes are obtained, the first considering energy consumption which includes the technologies A1-C2-D3-E2-F2, and the second considering the unit production cost A1-C2-D4-E2-F2.*

**Keywords:** *Microalgae, network, optimal, shortest route, technologies.*

## **1. Introducción**

Las grasas y los aceites forman parte de las materias primas esenciales para la elaboración de biocombustibles. El desarrollo de la industria de biocombustibles está confinado por la baja productividad de aceite por hectárea y la poca disponibilidad de tierras idóneas para el uso agrícola [Benjumea, Agudelo, & Ríos, 2009]. Algunas especies de microalgas pueden cultivarse con un rendimiento de lípidos de hasta 59 m<sup>3</sup> /ha año, lo que las hace atractivas como materia prima alterna para la producción de biocombustibles [Lee, Lewis, & Ashman, 2012] y [Castillo et al., 2017]. Las diferentes clases de microalgas contienen en promedio el 30% de aceites, y en especies particulares superan hasta el 50%. En condiciones especiales y de estrés, se puede obligar a los cultivos de microalgas a aumentar su producción en lípidos [Del Pozo, 2010].

Los retos que se presentan en el proceso de producción de aceite de microalgas consisten en los procesos de cultivo y cosecha, lo cuales indican que son los cuellos de botella y que deben ser eliminados para que el proceso sea factible. En el proceso de producción de biocombustibles la principal etapa que genera conflictos

a causa de sus elevados costos es el cultivo. Por lo cual, seleccionar la mejor tecnología de cultivo es una decisión importante, debido a que se pueden reducir los gastos de producción [Delkhosh & Sadjadi, 2020].

La etapa de cosecha también tiene un papel importante en dicho proceso, esto debido a posibilidad de adaptarse hacia la producción a nivel industrial. En esta etapa se tiene como objetivo separar la biomasa de las microalgas del medio de cultivo; significa el 20-30% de los gastos totales de producción, esto se debe al consumo energético y al costo de adaptación de las tecnologías utilizados [Arenas, Rodríguez, Juantorena, & Sebastián, 2016]. A pesar de estos obstáculos se pueden reducir los costos de producción, minimizando los gastos energéticos, o aumentando la productividad al seleccionar la tecnología adecuada para cada etapa del proceso.

El proceso de producción de aceite de microalgas consta de tres etapas generales: cultivo, cosecha y extracción. Para cada fase del proceso de producción de aceite se fijaron las respectivas variables de operación y se llevó a cabo una enumeración exhaustiva de los caminos posibles con diferentes tecnologías. Se han identificado 72 rutas diferentes de producción de biomasa seca en las etapas de cultivo y cosecha de donde se extrajo un subconjunto de rutas de proceso poco viables, además se identificaron otras 24 rutas para la producción de lípidos a partir de biomasa seca y otras 24 rutas para la producción de lípidos a partir de biomasa húmeda [Valdovinos-García, 2021].

El análisis exhaustivo se vuelve más complejo a medida que el número de tecnologías en cada fase se incrementa, por lo que se requiere aplicar una herramienta de análisis que agilice la identificación de la (s) ruta óptima de producción. El objetivo del presente artículo es plantear una red con las diferentes tecnologías y aplicar el método de la ruta más corta para seleccionar las tecnologías que generen menor consumo energético y menores costos de producción unitario en el proceso de producción de aceite de microalgas a partir de la biomasa seca.

A continuación, se presentan algunos antecedentes relacionados al tema de investigación, así como algunas técnicas y metodologías utilizadas para la optimización del proceso de producción de biocombustible de microalgas.

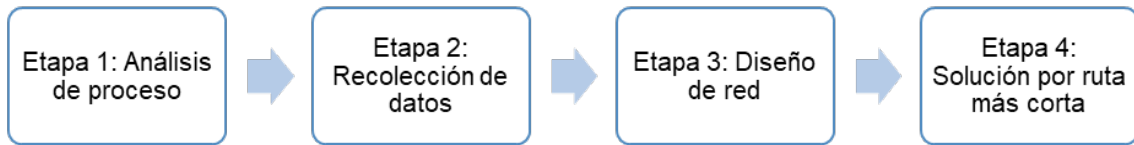
La selección de estrategias óptimas, la cepa de microalga óptima, las etapas de procesamiento y la gama de productos, son un gran reto. En especial, al generar varias alternativas para cada uno de los pasos de procesamiento hacen que la identificación y elección de la estrategia óptima no sea intuitiva. Una técnica útil para este objetivo es la optimización de la superestructura basada en modelos. Se propuso un modelo de programación lineal de enteros mixtos (MILP) cuya función objetivo es minimizar el costo neto anualizado del ciclo de vida de la biorrefinería utilizando como materia prima las microalgas [Gupta, Shastri & Bhartiya, 2017].

En algunas investigaciones se muestra un enfoque sistemático para la síntesis y el diseño de redes de procesamiento óptimas. Se desarrolló un modelo de superestructura para el proceso de biodiesel a partir de biomasa de microalgas la cual consiste en cinco etapas: (1) cosecha de biomasa de microalgas, (2) etapa de pretratamiento que incluye secado y disrupción celular de la biomasa cosechada, (3) extracción de lípidos, (4) transesterificación y (5) purificación. Para cada etapa de proceso se proponen diferentes opciones de tecnológicas. La función objetivo para la optimización es la maximización de la productividad, aunque también se pueden tomar la minimización de los costos de procesamiento [Rizwan, Lee & Gani, 2013]. En otra revisión, se plantea también una superestructura de red de procesamiento de microalgas la cual consiste en 7800 alternativas como rutas de proceso. A partir de dicha superestructura, se propone un modelo de programación no lineal de enteros mixtos, cuyo objetivo es optimizar al mismo tiempo el costo unitario y el potencial de calentamiento global unitario. Se identifican tres rutas de procesamiento óptimas [Gong & You, 2014].

## **2. Método**

Se presenta la secuencia de pasos empleados para desarrollar la metodología, la cual consta de 4 etapas que se muestran en la figura 1:

- **Etapa 1: Análisis de proceso de producción de aceite de microalgas.** Existen diferentes tecnologías (Figura 2) que se pueden utilizar a nivel industrial para cada etapa del proceso de producción de aceite de microalgas, generando así varias alternativas [Valdovinos-García, 2021].



Fuente: Elaboración propia.

Figura 1 Etapas de método de investigación.

Cultivo	Cosecha			Extracción	
	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Pretratamiento	Extracción
Sistema de canales (A1)	Autofloculación (C1)	Centrifugación (D1)	Secado por aspersión (E1)	Molienda (F1)	Solventes (G1)
Fotobiorreactor tubular (B1)	Floculación Química (C2)	Filtración con vacío (D2)	Secado de tambor (E2)	Prensado (F2)	
Fotobiorreactor tubular (B1)	Floculación con Biopolímeros (C3)	Filtración prensa de banda (D3)		Homogenización a alta presión (F3)	
		Filtración prensa de placas (D4)			

Fuente: Adaptación (Valdovinos-García, 2021).

Figura 2 Tecnologías para rutas de producción de aceites a partir de microalgas.

Se van a considerar las tecnologías necesarias para la producción de lípidos con biomasa seca las cuales incluyen las etapas de cultivo con sus diferentes alternativas (A1, B1, B2), la etapa de cosecha considerando tres sub-etapas con sus respectivas alternativas (C1, C2, C3, D1, D2, D3, D4, E1, E2) y para la etapa de pretratamiento solo se va a considerar la tecnología F2, al utilizar todas las posibles tecnologías de cada etapa se generan diferentes rutas o alternativas de dicho proceso.

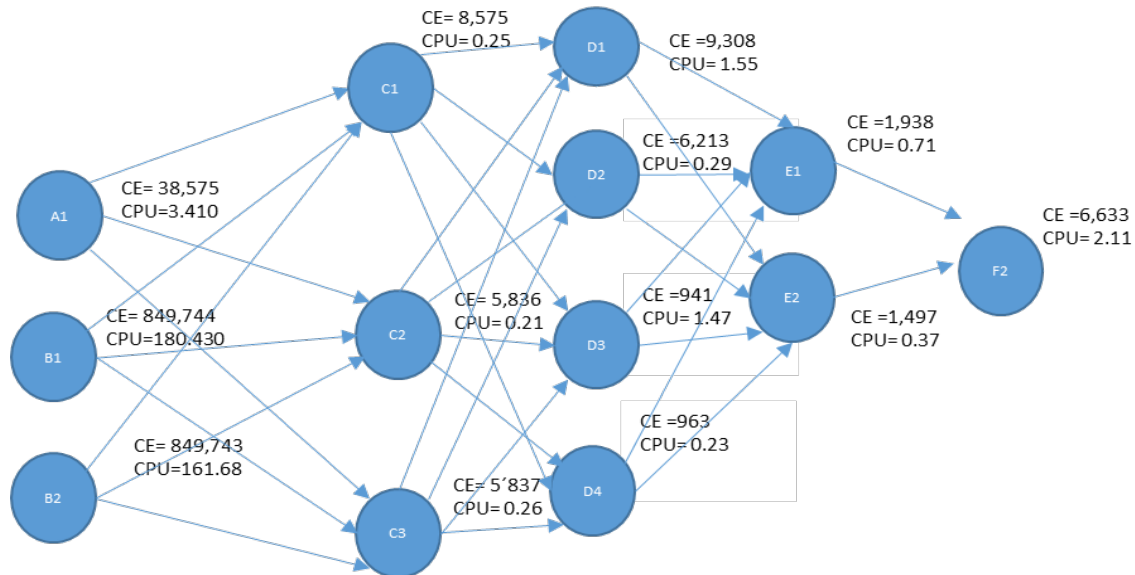
- **Etapa 2: Recolección de datos.** Los datos de las simulaciones del proceso de producción de aceite de microalgas se obtienen de la tesis [Valdovinos-García, 2021] en la cual se incluyen únicamente las tecnologías utilizadas dentro de la industria, excluyendo las que tienen gastos energéticos elevados. Para el desarrollo de la presente investigación se toma en cuenta los resultados obtenidos del CE= Consumo de energía (kWh/año) y CPU: Costo de producción unitario (US \$/kg), para cada una de las etapas del proceso y para cada tecnología, las cuales se muestran en la tabla 1.
- **Etapa 3: Diseño de red.** A partir de la figura 2 se planteó una red de manera general la cual se muestra en la figura 3. En esta red se incluyen las

diferentes tecnologías de las etapas del proceso las cuales son: cultivo, cosecha la cual incluye las 3 sub-etapas y la etapa de pretratamiento para la producción de aceite a partir de biomasa seca.

Tabla 1 Datos de las tecnologías del proceso de producción de aceite de microalgas.

Etapa		Tecnologías	CE (kWh/año)	CPU (US \$/kg)
Cultivo		Nodo (1) A1: Sistema de canales	38,575	3.410
		Nodo (2) B1: Fotobiorreactor tubular	849,744	180.430
		Nodo (3) B2: Fotobiorreactor tubular	849,743	161.680
Cosecha	Etapa 1	Nodo (4) C1: Autofloculación	5,837	0.250
		Nodo (5) C2: Floculación química	5,836	0.210
		Nodo (6) C3: Floculación con biopolímeros	5,837	0.260
	Etapa 2	Nodo (7) D1: Centrifugación	9,308	1.550
		Nodo (8) D2: Filtrado con vacío	6,213	0.290
		Nodo (9) D3: Filtro prensa de banda	941	1.470
	Etapa 3	Nodo (10) D4: Filtro prensa	963	0.230
		Nodo (11) E1: Secado por aspersión	1,938	0.710
	Pretratamiento		Nodo (12) E2: Secado de tambor	1,497
		F1: Molienda con perlas	34,650	2.430
		Nodo (13) F2: Prensado	6,633	2.110
		F3: Homogenización a alta presión	8,331	0.810

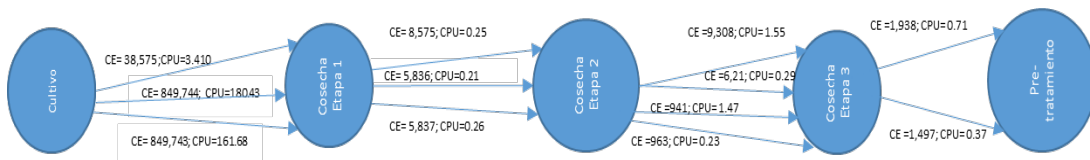
Fuente: Adaptado de (Valdovinos-García, 2021).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3 Red de tecnologías para la producción de aceite de microalgas.

En cada tecnología se incluyen los CE: consumos de energía (kWh/año) y los CPU: costos de producción unitario (US \$/kg), datos obtenidos de la tabla 1. En figura 3 se puede observar que la etapa de cultivo que incluye a las tecnologías A1, B1 y B2, son las etapas que determinan el origen de las rutas. En la figura 4 se muestra de manera simplificada la red de la figura 3, en la cual se puede observar que de la etapa de cultivo salen 3 arcos y estos representan las 3 tecnologías propuestas A1, B1 y B2, en la cosecha etapa 1 salen 3 arcos que representan a las tecnologías C1, C2 y C3, para la etapa 2 de la cosecha salen cuatro arcos que representan las tecnologías D1, D2, D3 y D4, para la etapa 3 de cosecha salen dos arcos que representan las tecnologías E1 y E2, estas últimas se dirigen al nodo final que es la etapa de pretratamiento, la cual incluye solo a la tecnología F2, esto debido a que es la única tecnología que requiere de biomasa seca, caso contrario de las tecnologías F1 y F3 que requieren de biomasa húmeda para obtener aceite.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4 Red por etapas de proceso de producción aceite de microalgas.

- Etapa 4: Solución ruta más corta.** A partir de las redes mostradas en la figura 3 y 4, se resuelve el problema en el programa Tora, utilizando el método de la ruta más corta. Tora es un programa para Windows, cuya finalidad es resolver diversos problemas de Investigación de Operaciones, y es empleado en algunas técnicas de optimización como lo es el método de la ruta más corta. En el problema de la ruta más corta se determina ésta, desde una fuente hacia un destino en una red, en donde cada arco de la red tiene una longitud, costo o tiempo asociado con él [Taha, 2004]. En la figura 3 se puede observar que el nodo de inicio está determinado por las tecnologías de la etapa de cultivo y el nodo destino está definido por la tecnología F2 de la etapa de pretratamiento.

### 3. Resultados

La red de la figura 3 se resuelve en el programa Tora, por el método de ruta más corta. Primero utilizando únicamente los consumos energéticos y después se resuelve para los costos de producción unitario. En la figura 5 se muestra como se ingresaron los datos al programa, en este caso para los costos energéticos se observa que los datos ingresados que van de los nodos A1, B1 y B2, hacia los nodos C1, C2 y C3, son los mismos valores, al igual que para los demás nodos.

NETWORK MODELS															
Problem Title: <b>COSTO ENERGETICO</b>		Editing Grid: >>>To DELETE, INSERT, COPY, or PASTE a column(row), click heading cell of target column(row), then invoke pull-down EditGrid menu >>>For INSERT mode, a single(double) click of target row/column will place new row/column after(before) target row/column.													
No. of Nodes: <b>14</b>															
INPUT GRID - SHORTEST ROUTE															
<input type="checkbox"/> Check here if network is symmetrical															
		N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12	N13	N14
	Node Name	A1	B1	B2	C1	C2	C3	D1	D2	D3	D4	E1	E2	F2	G1
N1	A1		infinity	infinity	38575.00	38575.00	38575.00	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity
N2	B1	infinity		infinity	849744.00	849744.00	849744.00	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity
N3	B2	infinity	infinity		849743.00	849743.00	849743.00	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity
N4	C1	infinity	infinity	infinity		infinity	infinity	5837.00	5837.00	5837.00	5837.00	infinity	infinity	infinity	infinity
N5	C2	infinity	infinity	infinity	infinity		infinity	5836.00	5836.00	5836.00	5836.00	infinity	infinity	infinity	infinity
N6	C3	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity		5837.00	5837.00	5837.00	5837.00	infinity	infinity	infinity	infinity
N7	D1	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity		infinity	infinity	infinity	9308.00	9308.00	infinity	infinity
N8	D2	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity		infinity	infinity	6213.00	6213.00	infinity	infinity
N9	D3	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity		infinity	941.00	941.00	infinity	infinity
N10	D4	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity		963.00	963.00	infinity	infinity
N11	E1	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity		infinity	infinity	infinity
N12	E2	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity		1497.00	infinity
N13	F2	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity		6633.00
N14	G1	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	infinity	

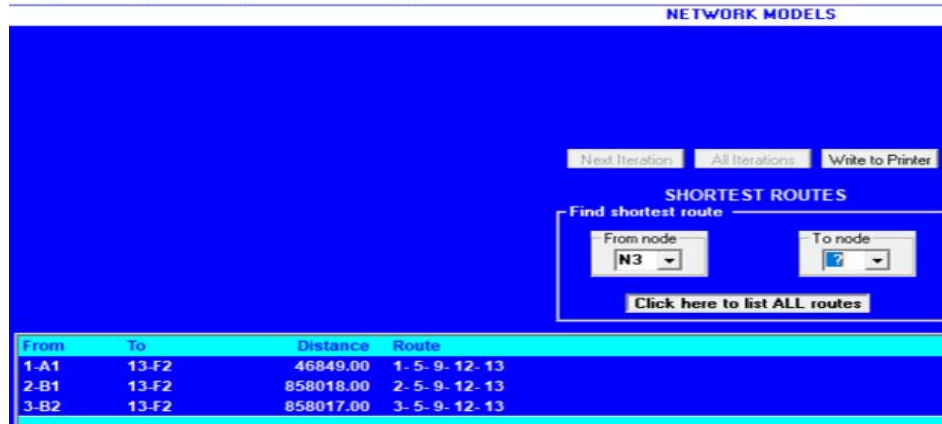
Fuente: Elaboración propia.

Figura 5 Datos en Tora de Consumo de energía (kWh/año).

En la figura 6 se muestran los resultados obtenidos de las rutas más cortas. Se utilizan 3 opciones como nodo de inicio, los cuales representan a las tecnologías A1, B1 y B2 y como nodo final se utilizó a la tecnología F2 debido a que es la única que requiere de biomasa seca. Como resultado se tiene que la ruta más corta es aquella que inicia con el nodo A1 con un consumo de energía de 46,849 kWh/año, a diferencia de los que inician con las tecnologías B1 y B2 que tiene consumos energéticos muy elevados de 858,018 kWh/año y 858,017 kWh/año respectivamente. La ruta más corta arrojada por el programa es la que tiene los siguientes nodos: 1-5-9-12-13, la cual está representada por las tecnologías A1-C2-D3-E2-F2. Es decir, considerando el consumo energético las tecnologías que pueden ser utilizadas para la producción aceite a partir de biomasa seca son:

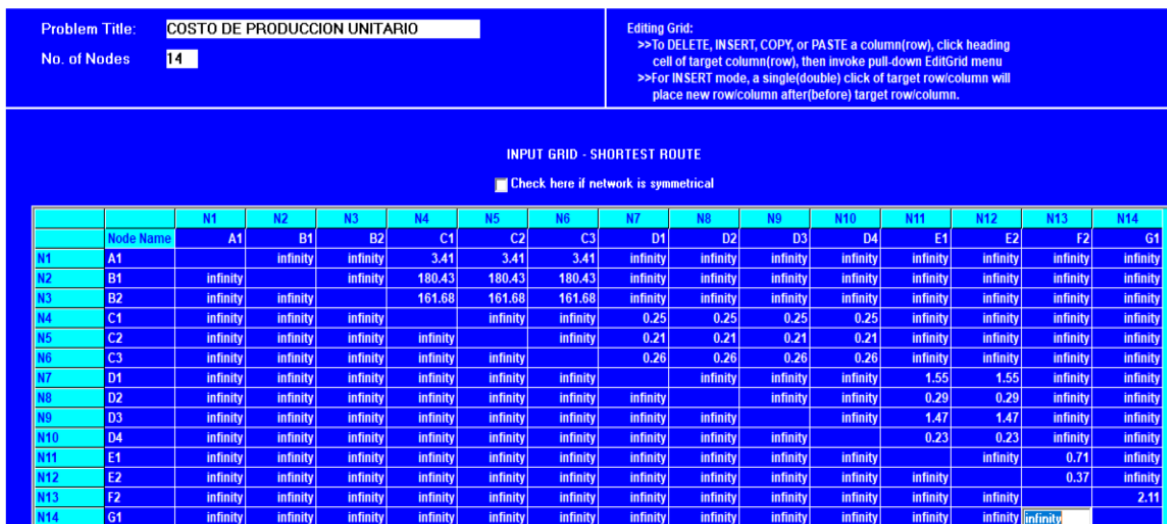


sistema de canales, floculación química, filtro prensa de banda, secado de tambor y prensado. Se ingresó la misma ruta de la figura 3 pero ahora considerando los datos de costos de producción unitario (US\$/kg), los cuales muestra la figura 7.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6 Rutas más cortas de Nodo A1, B1, y B2 al nodo F2.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 7 Datos en Tora de Costos de producción unitario (US \$/kg).

En la figura 8 se muestran los resultados de las rutas más cortas, y al igual que en el caso anterior también se consideran tres opciones como nodos de inicio: A1, B1 y B2, y como nodo final a F2. Al comparar las 3 rutas obtenidas se observa que la de menor distancia es la que inicia con el nodo A1 con un valor de 4.22 US \$/kg de costos de producción unitario.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 8 Rutas más cortas de nodos de inicio A1, B1 y B2 a nodo final F2.

La ruta óptima obtenida incluye los nodos 1-5-10-12-13 y está representada por las tecnologías A1-C2-D4-E2-F2. En este caso las tecnologías que representan un menor costo unitario son: sistema de canales, floculación química, filtro prensa, secado de tambor y prensado. Las rutas con nodos de inicio B1 y B2 tienen costos de producción unitarios muy elevados de 181.24 US \$/kg y 162.49 US \$/kg respectivamente.

#### 4. Discusión

Al analizar las rutas se puede observar que la que tiene mayor impacto es la tecnología utilizada en la etapa de cultivo, en este caso las rutas más cortas tienen como similitud que incluyen a la tecnología A1: Sistema de canales, ya que al usar las tecnologías B1 y B2 los consumos de energía y los costos son más elevados. Al comparar los resultados obtenidos de los costos de producción unitario con los de la bibliografía, en esta se reporta como la ruta 92, considerando solo producción de lípidos a partir de biomasa seca, la cual incluye las tecnologías A1-C1-D4-E2-F2 y en nuestro caso la ruta obtenida es la que incluye las tecnologías A1-C2-D4-E2-F2, la única diferencia es la tecnología C1 y C2, en nuestro caso se obtiene un menor costo de producción unitario, debido a que el valor del CPU en la floculación química es inferior que en la tecnología de autofloculación.

Sin embargo, para el consumo energético en la bibliografía se obtuvieron 5 rutas con el mismo consumo energético denominadas ruta 91 (A1-C1-D4-E1-F2), ruta 92

(A1-C1-D4-E2-F2), ruta 99 (A1, C2, D4-E2-F2), ruta 100 (A1-C2-D4-E2-F2) y ruta 107 (A1-C3-D4-E2-F2), y en nuestro caso se obtiene la ruta con las tecnologías A1-C2-D3-E2-F2, en este caso también se obtiene un menor consumo energético, debido a que en la ruta propuesta se incluyen las tecnologías C2 y D3 las cuales presentan un menor consumo en comparación que si se usan las tecnologías C1 y D4, esto se puede observar en la tabla 1. La principal diferencia entre las rutas obtenidas radica, en la forma de analizar los resultados, en este caso se usó un método de optimización empleando redes.

## **5. Conclusiones**

La ruta más corta y considerando el costo unitario incluye las tecnologías A1-C2-D4-E2-F2, con un valor de 4.22 US\$/kg, mientras que la ruta más corta considerando los consumos de energía es la que representa las tecnologías A1-C2-D3-E2-F2 generando un consumo de 46,849 kWh/año. Se puede notar que en ambas rutas las únicas tecnologías que difieren son las de la etapa 2 de cosecha, en D2 y D3. En esta investigación solo se consideran las tecnologías utilizadas por [Valdovinos-García, 2021]. El método de optimización utilizado, como lo es la ruta más corta, y empleando el uso de redes, permite obtener una solución en un periodo relativamente corto en caso contrario de realizar una enumeración exhaustiva, y simular cada una de las rutas. A través del software Tora se puede reducir tiempo y obtener resultados más precisos.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Benjumea, P., Agudelo, J., & Ríos, L. A. (2009). Biodiésel: Producción, calidad y caracterización. Colombia: Universidad de Antioquia.
- [2] Castillo, O. S., Torres-Badajoz, S. G., Núñez-Colín, C. A., Peña-Caballero, V., Herrera Méndez, C. H., & Rodríguez-Núñez, J. R. (2017). Producción de biodiésel a partir de microalgas: avances y perspectivas biotecnológicas. *Hidrobiológica*, 27(3), 337-352.
- [3] Del Pozo, Á. (2010). Producción y valorización de biomasa de microalgas: un enfoque de biorrefinería. España: Ediciones Universidad de Salamanca.

- [4] Lee, A. K., Lewis, D. M., & Ashman, P. J. (2012). Disruption of microalgal cells for the extraction of lipids for biofuels: Processes and specific energy requirements. *Biomass and bioenergy*, 46, 89-101.
- [5] Delkhosh, F., & Sadjadi, S. J. (2020). A robust optimization model for a biofuel supply chain under demand uncertainty. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 11(2), 229-246.
- [6] Arenas, E., Rodríguez Palacio, M. C., Juantorena, A., & Sebastián, P. J. (2016). Microalgae as a potential source for biodiesel production: techniques, methods, and other challenges. *International Journal of Energy Research*, 761-789.
- [7] Valdovinos-García, E.M (2021). Evaluación sustentable del proceso de producción de aceite microalgal. México: Tecnológico Nacional de México/ IT de Celaya. Por publicarse.
- [8] Gupta, S., Shastri, Y., & Bhartiya, S. (2017). Optimization of integrated microalgal biorefinery producing fuel and value-added products. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 11(6), 1030-1050: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/bbb.1805>.
- [9] Rizwan, M., Lee, J. H., & Gani, R. (2013). Superstructure optimization of biodiesel production from microalgal biomass. *IFAC Proceedings Volumes*, 46(32), 111-116.
- [10] Gong, J., & You, F. (2014). Global optimization for sustainable design and synthesis of algae processing network for CO2 mitigation and biofuel production using life cycle optimization. *AIChE Journal*, 60(9), 3195-3210.
- [11] Taha, H. (2004). *Investigación de operaciones* (Séptima ed.). México: Pearson Educación.