

## Evaluación de la rentabilidad de la extracción de polifenoles y producción de biogás usando residuos de brócoli.

Francisco Gabriel Martínez Iñiguez<sup>1,3</sup>, Arturo de la Cruz Bosques<sup>1,3</sup>, Christian Arenas Grimaldo<sup>1,3</sup>, Aranza Manríquez Zúñiga<sup>2,3</sup>, Mariela Paola Vargas Rico<sup>1,3</sup>, Ana Gabriela Díaz Rodríguez<sup>1,3</sup>, Carlos Eduardo Molina Guerrero<sup>1,3\*</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Guanajuato, Campus León, División de Ciencias e Ingenierías. Lomas del Bosque 103, Col. Lomas del Campestre, León, 37150, Guanajuato, México.

<sup>2</sup>Universidad de Guanajuato, Campus Guanajuato, División de Ingenierías, Av. Juárez 77, Zona Centro, Guanajuato, 36000, Guanajuato, México.

<sup>3</sup>Bioprocess and Bioeconomy Group, Campus León, División de Ciencias e Ingenierías. Lomas del Bosque 103, Col. Lomas del Campestre, León, 37150, Guanajuato, México.  
ce.molina@ugto.mx

### Resumen

La mayor parte de la planta del brócoli se considera desecho, siendo la floreta la única parte comercializable. Este proyecto plantea una propuesta para el aprovechamiento de los residuos de brócoli (hoja y tallo). El proceso consiste en la extracción de polifenoles y en la producción de biogás para combustión, fertilizante sólido y agua para riego. Se compararon tres escenarios en el aspecto técnico y económico variando la alimentación de entre 100, 500 y 1000 TM/día de una mezcla de tallo y hoja de brócoli en base seca. El proceso se construyó en estado estacionario utilizando el simulador de procesos SuperPro Designer v.12.0. El proceso cuenta con la etapa de acondicionamiento de biomasa, extracción de polifenoles, recuperación de solvente y producción de biogás. De acuerdo con los resultados obtenidos, las plantas cuentan con una inversión inicial muy alta debido al alto costo de los biorreactores, lo cual es asociado a los altos tiempos de retención hidráulicos (10 días) para el procesamiento de la biomasa. Los parámetros económicos de rentabilidad como la tasa de retorno de la inversión (ROI) muestra valores de -3.62, -3.34 y -3.25 % para las plantas de 100, 500 y 1000 TM/día, respectivamente. Los escenarios mostraron la no rentabilidad de la producción de biogás con los escenarios planteados. En una perspectiva futura, se planteará el proceso de transformación de residuos de brócoli para la extracción de polifenoles con el fin de ajustar parámetros operativos que permitan obtener configuraciones económicamente rentables.

**Palabras clave:** Brócoli; Bioeconomía circular; Polifenoles.

### Introducción

El alto costo de los combustibles fósiles, además de la contaminación asociado a los mismos ha generado un importante interés en la producción de biocombustibles como una alternativa para mitigar la contaminación y disminuir nuestra dependencia del petróleo. Los biocombustibles son combustibles que pueden producirse de biomasa vegetal (Lignocelulosa) la cual puede ser transformada mediante la degradación de la celulosa en productos de valor agregado como el biogás, bioetanol, entre otros. Aunado a lo anterior, la búsqueda de biomasa que permitan obtener productos de alto valor, además de los biocombustibles, es un tema de creciente interés. Una biomasa que podría ayudar a resolver estas dos problemáticas es la biomasa de los residuos del brócoli la cuál es cultivada ampliamente en el mundo. Uno de los principales productores de hortalizas en el mundo es México teniendo una producción estimada de 567,000 TM en el 2017, de acuerdo con el SIAP<sup>1</sup>, particularmente el estado de Guanajuato es el principal productor en el país. Sin embargo, solo se reporta la comercialización de la floreta dejando la hoja y el tallo como desechos, estos desechos representan  $\frac{3}{4}$  partes del peso total de la planta, por lo que estarían generando 1,700,000 TM/año. De manera que, la biomasa también podría ser explorada para la producción de energéticos como el metano el cual podría ser generado a través de la digestión anaerobia de los residuos. Pero los componentes de estas plantas no solo se pueden utilizar para la producción de energía, estos tienen componentes los cuáles pueden ser extraídos para su aprovechamiento. Por ejemplo, los residuos del brócoli son ricos en polifenoles, los cuales tienen propiedades antivirales, antibacterianas, anticancerígenas, entre otras. Estas moléculas podrían ser utilizadas para la creación de productos de alto valor comercial para la industria farmacéutica y alimentaria. Se ha reportado la presencia en los extractos de brócoli de compuestos promotores de la salud como vitaminas, glucosinolatos, compuestos fenólicos y minerales esenciales en la dieta<sup>2</sup>.

Por otro lado, posterior a la extracción de polifenoles, la biomasa podría ser transformada en biogás mediante la tecnología de digestión anaerobia (DA). La DA es una tecnología bien conocida capaz de transformar residuos orgánicos en biogás y fertilizante con altos rendimientos. Se han reportado estudios experimentales donde se evalúa la producción de biogás a partir de residuos de brócoli<sup>3</sup>. Otro estudio ha reportado la producción de biogás a partir de residuos de brócoli siendo los rendimientos bajos asociados a la presencia de componentes inhibitorios como el sulforafano<sup>4</sup>.

De acuerdo a la búsqueda bibliográfica no se encuentran reportes de la evaluación de la rentabilidad del proceso de producción de biogás y extracción de polifenoles a gran escala. Por lo que, este trabajo presenta la simulación de una biorrefinería para la extracción de polifenoles y producción de biogás, simultáneamente, con el objetivo de plantear escenarios para el aprovechamiento de estos desechos y evaluar la rentabilidad de procesos a gran escala. De acuerdo con nuestro conocimiento se plantea por primera vez un esquema de biorrefinería para el aprovechamiento de residuos de brócoli, la cual permitirá tener una visión más clara sobre el proceso de extracción de polifenoles y producción de biogás a partir de este residuo.

### Metodología

Se simuló una planta de procesamiento de desechos del brócoli con el objetivo de obtener polifenoles, fertilizante y gas combustible, en estado estacionario usando el software de simulación de procesos SuperPro Designer v.12.0 (SPD). El proceso consta de 4 etapas:

- i) Acondicionamiento (secado y molienda),
- ii) Extracción de polifenoles y
- iii) Digestión anaerobia (CH<sub>4</sub>).

La planta cuenta con equipos de digestor anaerobio, secador rotatorio, filtro rotatorio, desfibradora, secador por atomización, filtro rotatorio al vacío, transportador neumático, tanque de agitación, condensador, gusano transportador, pantalla vibratoria y unidad de lavado. El diagrama de flujo del proceso es mostrado en la Figura 1.

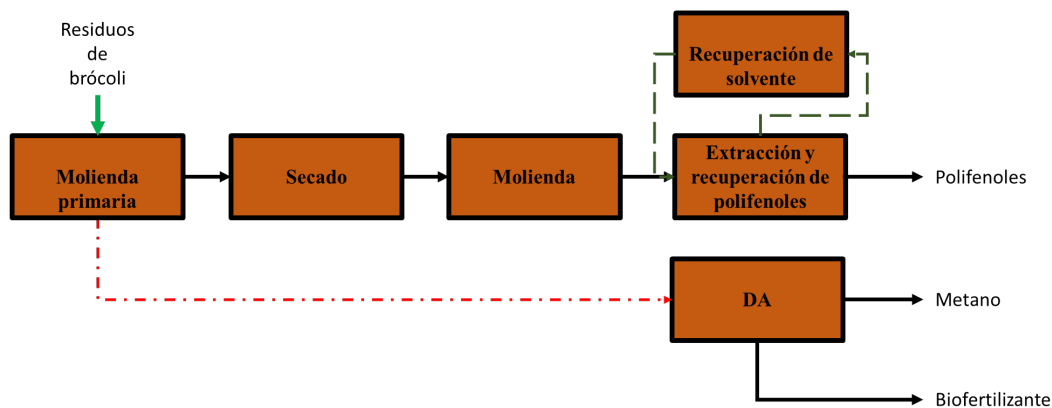


Figura 1. Diagrama de bloques del proceso

El sustrato utilizado en esta investigación fue tallo y hoja de brócoli con la composición mostrada en la Tabla 1:

**Tabla 1.** Composición del tallo y hoja del brócoli.

Compuesto	g/ Kg (Hoja seca)	g/Kg (Tallo seco)
Ceniza	146.700	92.400
Celulosa	604.530	645.765
Flavonoides	6.330	7.210
Lignina	16.000	65.000
Lípidos	67.200	65.800
Proteínas	121.300	87.600
Agua	36.000	36.000
Ácidos fenólicos	1.940	0.225

La composición del sustrato fue obtenida de las siguientes referencias:<sup>5-11</sup>.

La primera etapa (pretratamiento) involucra los residuos del brócoli (tallo y hojas) en la corriente DS-101 los cuales son lavados en la unidad P-24. Se consideró un litro de agua por kilogramo de materia prima, posteriormente el producto lavado pasa a una desfibradora donde se reduce su tamaño (unidad P-25) para, posteriormente, secar el material en un secador rotatorio (unidad P-12) donde se remueve humedad por medio de aire caliente hasta obtener un 3.5% de humedad. Antes de secar la materia prima, el flujo de brócoli triturado se divide en 2 corrientes, el 90% se envía al proceso de digestión anaerobia, transportada por medio de un gusano transportador y el 10% al secador rotatorio (La materia prima se seca con el fin de preservarla). El producto seco pasa por otra desfibradora (unidad P-2) donde se reduce el tamaño de partícula nuevamente. La materia seca, se envía a una pantalla vibratoria (unidad P-3) donde se selecciona por tamaño de partícula hasta alcanzar los 5mm. La materia prima que no logró reducirse es recirculada con ayuda de un transportador neumático (unidad P-4) hasta la desfibradora. Posteriormente, y una vez que se alcanzó el tamaño de partícula deseado, la materia seca y molida es transportada por medio de un gusano transportador hacia la etapa de extracción de polifenoles.

Del proceso de extracción de polifenoles se considera la corriente S-107 (materia seca), la cual entra a un tanque agitado (unidad P-6) junto con una solución de etanol al 30% con una proporción de 0.1Kg de materia seca por litro de solución, teniendo un tiempo de retención de 37 min y una temperatura de operación de 50°C, de acuerdo con datos experimentales obtenidos en nuestro laboratorio. Una vez terminado el tiempo de residencia, el contenido del tanque pasa a un filtro rotatorio al vacío (unidad P-7). La materia sólida filtrada es dirigida a la etapa de digestión anaerobia, mientras que la fase líquida compuesta por agua, etanol y polifenoles entra al secador por atomización (unidad P-9), donde con ayuda de aire caliente se evapora el agua y el etanol, obteniendo un polvo de polifenoles con un 3% de humedad. La corriente S-111 (que contiene agua, etanol y aire) proveniente de P-9 se separa en 2 corrientes de 5 y 95% del flujo proveniente del atomizador. El flujo mayoritario se dirige a un condensador donde el 70% (mol/mol) del agua y etanol pasan a fase líquida para ser recirculada al tanque de extracción de polifenoles.

En la etapa de digestión anaerobia se unen las corrientes S-126 (materia húmeda proveniente del pretratamiento), S-134 (torta de filtración proveniente de la extracción de polifenoles) junto con una corriente de agua para ingresarlas al digestor anaerobio (unidad P-10). En esta etapa se ensayaron dos escenarios: a) producción de metano y b) producción de hidrógeno. Para la etapa de producción de metano se consideró que la alimentación contenía 0.01Kg de materia sólida por litro con un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 10 días. El proceso de producción de metano generó, además de la corriente gaseosa, una corriente semisólida S-101. Ésta última, pasa por un filtro rotatorio al vacío (unidad P-17) donde la torta de filtración se considera fertilizante, mientras que la corriente líquida como agua de riego. Las reacciones consideradas en este proceso se muestran en la [Tabla 2](#).

**Tabla 2.** Reacciones llevadas a cabo en la digestión anaerobia.

Reacción	Estequiometría
----------	----------------

---

Hidrólisis a glucosa	1196.05 Celulosa + 1181.79 Agua → 1181.79 Glucosa + 1181.79 Hidrógeno
Glucosa a ácido butírico	1 Glucosa → 1 Ácido butírico + 2 CO <sub>2</sub> + 2 Hidrógeno
Glucosa a ácido propiónico	3 Glucosa → 2 Ácido acético + 2 CO <sub>2</sub> + 4 Ácido propiónico + 2 Agua
Glucosa a ácido acético	1 Glucosa 2 Agua → 2 Ácido acético + 2 CO <sub>2</sub> + 4 Hidrógeno
Ácido propiónico a ácido acético	1 Ácido propiónico + 2 Agua → 1 Ácido acético + 1 CO <sub>2</sub> + 3 Hidrógeno
Ácido butírico a Ácido acético	1 Ácido butírico + 4 Agua → 1 Ácido acético + 2 CO <sub>2</sub> + 6 Hidrógeno
Ácido acético a metano	1 Ácido acético → 1 CO <sub>2</sub> + 1 Metano
Dióxido de carbono a metano	1 CO <sub>2</sub> + 4 Hidrógeno → 1 Metano + 2 Agua

---

Método del Valor Presente Neto (VPN): análisis financiero y supuestos.

El costo total de producción (CTP) de biogás se calculó utilizando el análisis de flujo dinámico de capital (AFDC) que utiliza el valor presente neto (VPN) = 0 (por ejemplo,  $i$  es igual a la tasa interna de retorno (IRR)). Esta metodología es utilizada por SPD y ampliamente explicada en <sup>12</sup>. Brevemente, el VPN es una función de la capacidad seleccionada y los intervalos de alimentación para una condición de producción y financiación fija. El año de análisis fue 2020.

$$VPN = \frac{\text{Flujo de efectivo } ((1+i)^n - 1)}{i(1+i)^n} + \frac{\text{capital de trabajo}}{(1+i)^n} - \text{inversión} \quad \text{Eq. 1}$$

$$\text{Flujo de efectivo} = \text{Entrada de efectivo} - \text{Salida de efectivo} \quad \text{Eq. 2}$$

$$\text{Salida de efectivo} = \text{Costo directo de producción} + \text{Impuestos} + \text{Anualidad de préstamo} \quad \text{Eq. 3}$$

$$\text{Costo directo (DC)} = f_1(\text{costo del equipo}) \quad \text{Eq. 4}$$

$$\text{Costo indirecto (IC)} = f_2(\text{costo del equipo}) \quad \text{Eq. 5}$$

$$\text{Inversión de capital fijo (FCI)} = DC + IC \quad \text{Eq. 6}$$

$$\text{Arranque de la planta} = f_3(\text{FCI}) \quad \text{Eq. 7}$$

$$\text{Capital de trabajo (WC)} = f_4(\text{FCI} + \text{Arranque de la planta}) \quad \text{Eq. 8}$$

$$\text{Inversión total de capital (TCI)} = \text{FCI} + \text{WC} + \text{Arranque de la planta} \quad \text{Eq. 9}$$

$$\text{Inversión} = \text{FCI} - \text{Prestamos} \quad \text{Eq. 10}$$

#### Consideraciones económicas

La inversión financiera y los supuestos se consideraron de acuerdo con SuperPro Designer - Guía del usuario. El proceso consideró un tiempo operativo de 330 días/año. Se supuso que el 30% del capital está prestado a 10 años a una tasa de interés del 6% y un factor de inflación del 4%. Las regalías de patente se consideraron

en 5%<sup>13</sup>. La vida útil del proyecto y de la construcción se fijó en 15 y 2.5 años, respectivamente, con depreciación lineal. Los impuestos federales se consideraron con una ganancia del 40%. Los precios de los servicios utilizados en el proceso se fijaron de la siguiente manera: El costo de la energía eléctrica utilizada para calentamiento, enfriamiento, agitación, centrifugación, entre otros, se fijó en US\$0.1 kWh que está de acuerdo a los valores informados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE ) para la región centro de México<sup>14</sup>. El agua utilizada para proceso se fijó en \$1.5/m<sup>3</sup>. El vapor de calentamiento tuvo un costo de \$12/TM. En la etapa de condensación se utilizó salmuera de cloruro de calcio con un costo de \$0.25/TM.

### Resultados y Discusión

Se realizó la simulación de una planta para el tratamiento de desechos de brócoli conceptualizada para tener una alimentación de materia seca de 100, 500 y 1000 TM/día de residuos de brócoli, evaluando la rentabilidad de este si estas producen metano. Una vez construidos los 3 escenarios, estos se analizaron económicamente.

La planta de producción de metano, independiente de la capacidad de las plantas, presenta un gasto energético muy similar en proporción, al igual que en la planta de producción de hidrógeno. Siendo que, en la planta de producción de hidrógeno se tiene un menor gasto energético en comparación con la planta de producción de metano, teniendo ambas la misma capacidad, siendo la razón de esto (como se puede ver en el Figura 2) la cantidad y tiempo de retención de los tanques donde se llevan a cabo la digestión anaerobia. De manera que, en el caso de la producción de metano se tiene un tiempo de retención de 10 días.

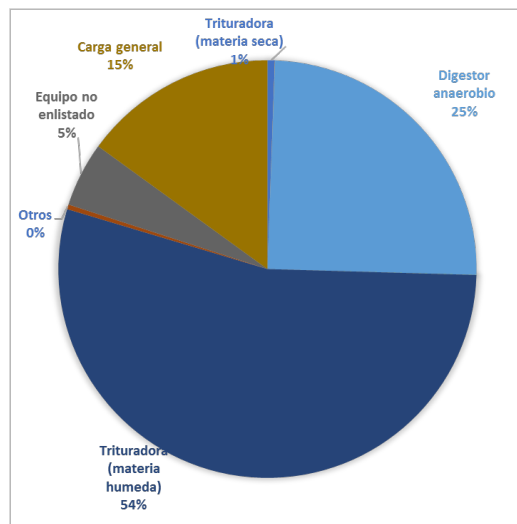


Figura 2. Gasto energético de producción en la planta.

Se sigue cierta tendencia a la disminución de los costos de producción conforme aumenta la capacidad de la planta (Figura 4). Observando que en el caso de la planta de metano se tiene un mayor gasto debido al costo de las instalaciones (debido a los digestores anaerobios). Considerando también que la razón de esto es la alta cantidad de agua utilizada.

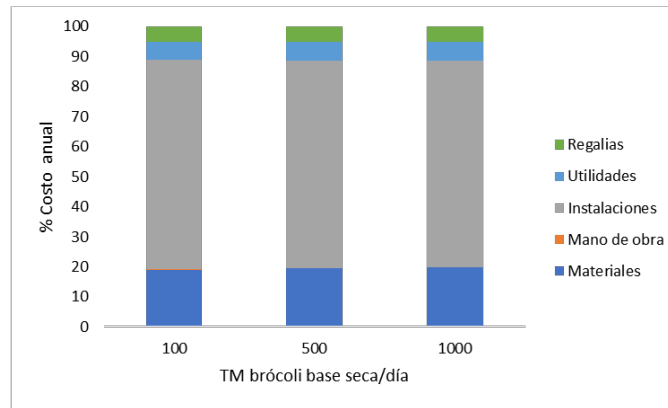


Figura 3. Gastos de producción asociados al biogás.

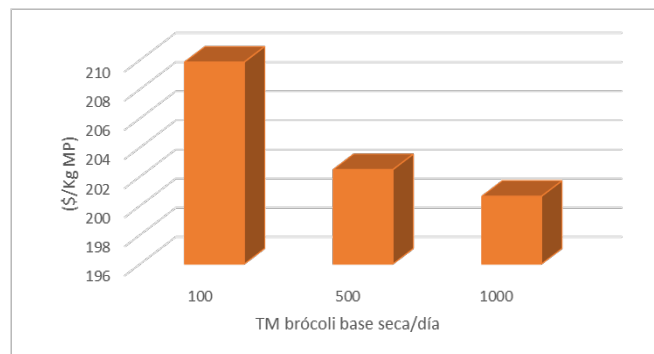


Figura 4. Costo total de producción por kilogramo de biogás.

La Figura 5 muestra los costos de inversión de las tres plantas propuestas. La inversión tan debido al costo de los equipos, principalmente al tanque donde se llevara a cabo la digestión anaerobia, ya que, la producción de metano se consideró una relación de alimentación de 10 g/L con un tiempo de retención hidráulica (TRH) de 10 días, teniendo un límite de tamaño por tanque de 25,000 m<sup>3</sup>, por lo que se necesitaría una gran cantidad de agua para poder cumplir con esta.

Aunado a esto, el valor presente neto (VPN) presentó que, para las plantas de producción de metano, este valor es negativo para todas las alimentaciones siendo cada vez más negativo conforme aumenta la alimentación de brócoli. Como se presenta en la Figura 5. De manera que, así como el costo de inversión se ve afectado por la parte de digestión anaerobia al igual que los costos de operación, por lo que el VPN presenta valores negativos para la producción de metano ya que su consumo de agua es muy grande.

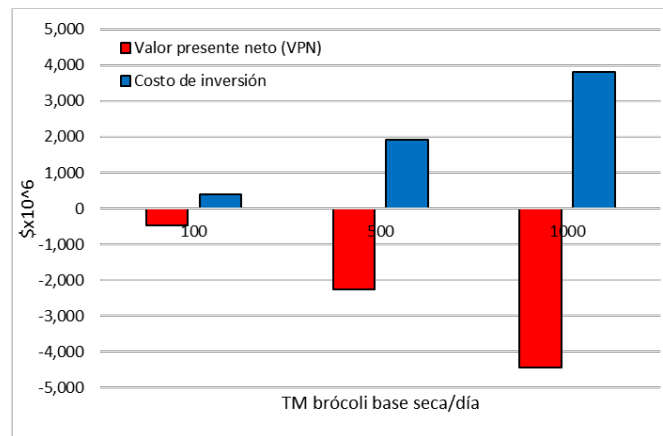


Figura 5. Valor presente neto vs costo de inversión para los escenarios planteados.

## Conclusión

Fue posible simular una planta de procesamiento de residuos del cultivo de brócoli. Los tres escenarios planteados indican nula rentabilidad. Esto fue adjudicado a la gran inversión inicial asociada a los digestores anaerobios. Los digestores anaerobios consideraron un tiempo de residencia alto por lo que impactó directamente el volumen de estos. En futuros escenarios se considerará diversificar los parámetros a evaluar con el fin de que la planta sea rentable.

## Referencias

- México produjo 567 mil toneladas de brócoli en 2017 | Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera | Gobierno | gob.mx. Available at: <https://www.gob.mx/siap/articulos/mexico-produjo-567-mil-toneladas-de-brocoli-en-2017?idiom=es>. (Accessed: 22nd July 2022)
- Ares, A. M., Nozal, M. J. & Bernal, J. Extraction, chemical characterization and biological activity determination of broccoli health promoting compounds. *J. Chromatogr. A* 1313, 78–95 (2013).
- Ramírez Raya, L. N., Alcocer Soto, J. L., Ayala Islas, A. & Peña Ramírez, R. Desarrollo De Un Sistema De Digestión Anaerobia Para Tratar Residuos De Brócoli ( Brassica Oleracea ). in XVI Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería (2015).
- Morales Garzón, Andrea Carolina. (UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ, 2020).
- Kumar, M., Raj, L., Isobe, S. & Tsushida, T. Steam processed broccoli (*Brassica oleracea*) has higher antioxidant activity in chemical and cellular assay systems. 114, 263–269 (2009).
- Fernández-León, M. F., Fernández-León, A. M., Lozano, M., Ayuso, M. C. & González-Gómez, D. Altered commercial controlled atmosphere storage conditions for ‘ Parhenon ’ broccoli plants (*Brassica oleracea* L . var . *italica*). In fl uence on the outer quality parameters and on the health-promoting compounds. *LWT - Food Sci. Technol.* 50, 665–672 (2013).
- García, S. L. R. & Raghavan, V. Microwave-Assisted Extraction of Phenolic Compounds from Broccoli (*Brassica oleracea*) Stems, Leaves, and Florets: Optimization, Characterization, and Comparison with Maceration Extraction. *Recent Prog. Nutr.* 2, 12 (2022).
- Berndtsson, E., Andersson, R., Johansson, E. & Olsson, M. E. Side streams of broccoli leaves: A climate smart and healthy food ingredient. *Int. J. Environ. Res. Public Health* (2020). doi:10.3390/ijerph17072406
- Müller, S. et al. Cell wall composition of vascular and parenchyma tissues in broccoli stems. *J. Sci. Food Agric.* 83, 1290 (2003).
- Bhandari, S. R. & Kwak, J. H. Chemical composition and antioxidant activity in different tissues of brassica vegetables. *Molecules* 1230 (2015). doi:10.3390/molecules20011228

Dos Reis, L. C. R. et al. Carotenoids, flavonoids, chlorophylls, phenolic compounds and antioxidant activity in fresh and cooked broccoli (*Brassica oleracea* var. Avenger) and cauliflower (*Brassica oleracea* var. Alpha F1). *Lwt* 4 (2015). doi:10.1016/j.lwt.2015.03.089

Sanchez, A., Sevilla-Güitrón, V., Magaña, G. & Gutierrez, L. Parametric analysis of total costs and energy efficiency of 2G enzymatic ethanol production. *Fuel* 113, 165–179 (2013).

Dudek, K., Molina-Guerrero, C. E. & Valdez-Vazquez, I. Profitability of single- and mixed-culture fermentations for the butyric acid production from a lignocellulosic substrate. *Chem. Eng. Res. Des.* 182, 558–570 (2022).

Comisión Federal de Electricidad.  
<https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCREIndustria/Tarifas/DemandaIndustrialTran.a.spx>  
(2020). Available at:  
<https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCREIndustria/Tarifas/DemandaIndustrialTran.a.spx>.