



# CILCA 2021

9TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON  
LIFE CYCLE ASSESSMENT IN LATIN AMERICA

BUENOS AIRES | ARGENTINA

*“Think long-term and act immediately”*

VIRTUAL MEETING  
ARGENTINA  
MAY 31 TO JUNE 04, 2021





Instituto Nacional de  
Tecnología Agropecuaria



ESTACIÓN EXPERIMENTAL  
AGROINDUSTRIAL  
OBISPO COLOMBRES  
Tucumán | Argentina



Agencia I+D+i

Agencia Nacional de Promoción  
de la Investigación, el Desarrollo  
Tecnológico y la Innovación



Life Cycle Initiative



# CILCA 2021

## *Proceedings of the 9th International Conference on Life Cycle Assessment*

From 31 May to 4 June 2021  
Buenos Aires, Argentina



*Think long-term and act immediately*

CILCA 2021 : Proceedings of the 9th International Conference on Life Cycle Assessment / Roxana Piastrellini... [et al.] ; coordinación general de Roxana Piastrellini... [et al.].- 1a ed.- Ciudad Autónoma de Buenos Aires : edUTecNe, 2021.

Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online

ISBN 978-987-4998-77-4

1. Ambiente. 2. Medio Ambiente. I. Piastrellini, Roxana, coord.

CDD 363.7063



**edUTecNe – Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional**

**Coordinador General a cargo: Fernando H. Cejas**

**Director Colección Energías Renovables, Uso Racional de Energía,**

**Ambiente: Dr. Jaime Moragues.**

**Disclaimer:** The responsibility for opinions expressed in articles and contributions rests solely with their authors.

**Selection of photographs:** BSc. Eliana Conci

**Editorial desing:** Dis. gráfica Brenda Rodriguez

Queda hecho el depósito que marca la Ley N° 11.723

© edUTecNe, 2021

Sarmiento 440, Piso 6 (C1041AAJ)

Buenos Aires, República Argentina

Publicado Argentina – Published in Argentina



ISBN 978-987-4998-77-4



Reservados todos los derechos. No se permite la reproducción total o parcial de esta obra, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio (electrónico, mecánico, fotocopia, grabación u otros) sin autorización previa y por escrito de los titulares del copyright. La infracción de dichos derechos puede constituir un delito contra la propiedad intelectual.



*Think long-term and act immediately*

# ANÁLISIS DE LOS IMPACTOS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO Y SOBRE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA DE LA PRODUCCIÓN DE HARINA DE MICROALGAS

Paula Daniela Rodríguez <sup>1,2,\*</sup>, Alejandro Pablo Arena <sup>1,2</sup>, Bárbara Civit <sup>3,2</sup>, Roxana Piastrellini <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Grupo CLIOPE, Facultad Regional Mendoza-Universidad Tecnológica Nacional. Rodríguez 273, Mendoza, Argentina. pdanielarodriguez@gmail.com

<sup>2</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Av. Ruiz Leal s/n, Mendoza, Argentina.

<sup>3</sup> Centro de Estudios para el Desarrollo Sustentable (CEDS), Facultad Regional Mendoza-Universidad Tecnológica Nacional, Rodríguez 273, Mendoza, Argentina.

aparena@gmail.com, barbara.civit@gmail.com, roxana.ppp@gmail.com

## RESUMEN

La biomasa de microalgas es utilizada para diversas aplicaciones, como la producción de alimentos para peces. Sin embargo, no existen estudios de ciclo de vida que evalúen los impactos ambientales derivados de la producción de alimentos para animales basados en microalgas. El objetivo de este trabajo fue analizar los impactos sobre el cambio climático y sobre la disponibilidad de agua originados por la producción de harina de microalgas destinada a la producción de alimento para peces en Mendoza (Argentina). Para ello, se utilizó la metodología del Análisis de Ciclo de Vida (normas ISO 14040:2006 y 14044:2006). Las emisiones de gases de efecto invernadero oscilaron entre 32,5 y 75,7 kg CO<sub>2</sub> eq/UF, y la huella de agua de escasez varió entre 27.700 y 77.600 m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O eq/UF, según la productividad de biomasa. Estos resultados denotan elevados impactos en la producción de proteína para alimentación animal, asociados principalmente a la generación y uso de electricidad durante el cultivo de las microalgas. En conclusión, es preciso reducir los impactos para tornar competitiva a la harina de microalgas en la industria de los alimentos para animales, desde un enfoque ambiental. Se resalta la necesidad de disminuir los requerimientos de energía en el proceso productivo.

**Palabras clave:** huella de carbono, huella de agua de escasez, Argentina.

## ABSTRACT

Microalgae biomass is used for various applications, such as the production of fish feed. However, there are no life cycle studies that evaluate the environmental impacts derived from the production of animal feed based on microalgae. This work aimed to analyze the impacts on climate change and water availability caused by the production of microalgae meal intended for fish feed production in Mendoza (Argentina). For that purpose, Life Cycle Assessment methodology was used (standards ISO 14040:2006 and 14044:2006). Greenhouse gases emissions varied between 32.5 and 75.7 kg CO<sub>2</sub> eq/FU, and water scarcity footprint varied between 27,700 and 77,600 m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O eq/FU, depending on biomass productivity. These results denote high impacts on the production of protein for animal feed, mainly associated with the generation and use of electricity during the cultivation of microalgae. In conclusion, it is necessary to reduce the impacts to make microalgae meal competitive in the animal feed industry, from an environmental perspective. The need to decrease the energy requirements in the production process is highlighted.

**Keywords:** carbon footprint, water scarcity footprint, Argentina.

## RESUMO

A biomassa de microalgas é usada para várias aplicações, como a produção de ração para peixes. No entanto, não existem estudos de ciclo de vida que avaliem os impactos ambientais derivados da produção de ração animal a partir de microalgas. O objetivo do trabalho foi analisar os impactos na mudança climática e na disponibilidade de água causados pela produção de farinha de microalgas destinada à produção de ração para peixes em Mendoza (Argentina). Para o efeito, foi utilizada a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (normas ISO 14040:2006 e 14044:2006). As emissões de gases de efeito estufa oscilaram entre 32,5 e 75,7 kg CO<sub>2</sub> eq/UF, e a pegada hídrica de escassez variou entre 27.700 e 77.600 m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O eq/UF, segundo a produtividade de biomassa. Esses resultados denotam altos impactos na produção de proteínas para ração animal, principalmente



asociados à geração e uso de energia elétrica durante o cultivo das microalgas. Em conclusão, é preciso reduzir os impactos para tornar a farinha de microalgas competitiva na indústria de rações para animais, desde uma perspectiva ambiental. Destaca-se a necessidade de diminuir a demanda energética no processo produtivo.

**Palabras-clave:** pegada de carbono, pegada hídrica de escasez, Argentina.

## INTRODUCCIÓN

El término “microalgas” designa a un grupo polifléctico de microorganismos capaces de realizar fotosíntesis oxigénica<sup>1</sup> (Acién et al., 2017). Las microalgas están constituidas principalmente por proteínas (6-52 %), lípidos (7-23 %) y carbohidratos (5-23 %), aunque su composición bioquímica es variable y depende principalmente de la especie y la forma de cultivo (Zhu, 2015). La plasticidad de su metabolismo permite la utilización de las microalgas con fines diversos (Barsanti y Gualtieri, 2018), tales como producción de alimentos para la nutrición humana y animal, producción de pigmentos, producción de biocombustibles y biofertilizantes, y aplicaciones ambientales.

Entre los diversos usos, se ha explorado la introducción de biomasa de microalgas en alimentos para peces. Históricamente, la harina de pescado ha sido utilizada como el ingrediente principal en la preparación de piensos para peces (Camacho-Rodríguez et al., 2018). Sin embargo, a partir del rápido crecimiento de la industria de la acuicultura, se ha dado una intensa búsqueda de sustitutos para la harina de pescado y el aceite de pescado (Samuel-Fitwi et al., 2013; Gamboa-Delgado y Márquez-Reyes, 2016). En este contexto, la inclusión de la biomasa de microalgas en los piensos para alimentación de peces ha sido evaluada con creciente interés (Yaakob et al., 2019), hallando en general resultados satisfactorios. Sin embargo, hasta el momento no se han hallado estudios que analicen los impactos ambientales derivados de la producción de alimentos para animales basados en microalgas, utilizando un enfoque de ciclo de vida. En consecuencia, el propósito de este trabajo fue analizar los impactos sobre el cambio climático y sobre la disponibilidad de agua originados por la producción de harina de microalgas destinada a la producción de alimento para peces en Mendoza (Argentina).

## METODOLOGÍA

Se utilizó la metodología del Análisis de Ciclo de Vida, siguiendo los lineamientos establecidos en las normas ISO 14040:2006 y 14044:2006, y las pautas de las normas ISO/DIS14067:2012 e ISO/DIS 14046:2014. La unidad funcional (UF) seleccionada fue “producir 1 kg de proteína contenida en la harina de microalgas para ser usada como alimento animal”, contemplando un contenido proteico de 43,2 % (Vizcaíno et al., 2014). Los límites del sistema comprendieron el cultivo de las microalgas, la cosecha y el secado de la biomasa (procesos de primer plano). Los datos para el modelado de estos procesos fueron tomados de Acién et al. (2012), suponiendo la instalación de la planta de producción en la ciudad de Mendoza (Argentina)<sup>2</sup>. Se consideraron 3 valores de productividad de biomasa: mínimo (0,24 kg.m<sup>-3</sup>.día<sup>-1</sup>), medio (0,42 kg.m<sup>-3</sup>.día<sup>-1</sup>) y máximo (0,68 kg.m<sup>-3</sup>.día<sup>-1</sup>). Asimismo, se incluyó la producción de insumos materiales y de energía eléctrica (procesos de fondo), utilizando la base de datos Ecoinvent 3.5.

### Breve descripción del sistema-producto

El núcleo de la planta está constituido por la unidad de cultivo, conformada por un conjunto de 10 fotobiorreactores (FBR) tubulares verticales, de tipo serpentina. El cultivo (esto es, las microalgas junto con el medio nutritivo) es recirculado dentro de los FBR mediante una bomba centrífuga. Además, se burbujea aire dentro de los FBR por medio de un aireador. Por último, se inyecta CO<sub>2</sub> a demanda con el doble propósito de proporcionar CO<sub>2</sub> para la fotosíntesis y controlar el pH. La tasa de consumo de CO<sub>2</sub> es de 2,31 kg CO<sub>2</sub>.kg<sup>-1</sup> biomasa seca. La unidad de cosecha comprende una centrífuga para la separación sólido-líquido y la unidad de secado se compone de un equipo de liofilización. Adicionalmente, para producir harina de microalgas, la biomasa seca se pasa por un molinillo manual. Las unidades auxiliares están integradas por la unidad de preparación de medio de cultivo, la unidad de desinfección y la unidad de control.

1 Con excepción de algunas microalgas que carecen de cloroplastos. Por ejemplo, aproximadamente la mitad de los dinoflagelados son organismos heterótrofos (Andersen, 2013).

2 En la publicación de Acién et al. (2012) se describe detalladamente la producción de biomasa de microalgas en una planta real de cultivo, localizada en la Estación Experimental “Las Palmerillas” (Almería, España). Aquí es preciso destacar que las condiciones de irradiancia solar de un sitio son determinantes para el cultivo de microalgas y, consecuentemente, la consideración de los datos de producción del sistema descrito por Acién et al. (2012) sólo podría adecuarse en sitios con similares características. Por tanto, se supuso la instalación del sistema de producción de microalgas en la ciudad de Mendoza (Argentina), puesto que sus condiciones de irradiancia solar son similares a las de la ciudad de Almería (España) (The World Bank Group, 2016).



La especie cultivada es *Scenedesmus almeriensis*. El sistema se opera en modo continuo, con una tasa de dilución o cosecha de 0,34 día<sup>-1</sup>. El medio de cultivo está compuesto por agua y fertilizantes agrícolas. Luego de la cosecha, el agua separada de la biomasa se recircula para ser reutilizada en el FBR (Acién, com. pers., 10 de mayo de 2018). Sin embargo, existe una pérdida en el proceso de liofilización, que debe ser añadida diariamente para completar el volumen de cultivo.

### Métodos de evaluación de impactos utilizados

Los impactos sobre el cambio climático se calcularon con el método IPCC 2013 GWP 100a, contenido en el software SimaPro ®. Si bien las microalgas realizan fotosíntesis, en este caso el CO<sub>2</sub> utilizado es sintético, es decir, no proviene directamente de la atmósfera. Por tanto, no es posible considerar el consumo de CO<sub>2</sub> como una remoción.

Los impactos sobre la disponibilidad de agua (huella de agua de escasez) se determinaron por medio del método AWARE (del inglés, *Available Water Remaining*) (Boulay et al., 2018), por medio de la Ec. (1).

$$HAE = AC_i * FC_i \quad (1)$$

donde, *HAE* es la huella de agua de escasez [m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O eq], *AC<sub>i</sub>* es el agua consumida en la región *i* (resultado del inventario) [m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O consumida en la región *i*], y *FC<sub>i</sub>* es el factor de caracterización para la región *i* [m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O mundial eq.m<sup>-3</sup> H<sub>2</sub>O consumida en la región *i*].

Dado que los impactos por consumo de agua deben considerar las condiciones locales (ISO, 2014), en este trabajo se estableció que las entradas y salidas directas de agua ocurren específicamente en Mendoza, donde se localiza la planta de microalgas, mientras que las entradas y salidas indirectas de agua suceden en Argentina. Para incluir este supuesto, se utilizaron factores de caracterización (FC) para el agua consumida anualmente en Argentina (30,14) y en Mendoza (69,50), correspondientes al uso “inespecífico”<sup>3</sup>.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Impactos sobre el cambio climático

Los resultados variaron de acuerdo a la productividad del sistema, oscilando entre 32,5 y 75,7 kg CO<sub>2</sub> eq/UF, para la productividad máxima y mínima, respectivamente. Esto implica que el impacto por unidad funcional aumentó 64,0 % cuando la productividad del sistema fue mínima, y se redujo 29,6 % cuando la productividad fue máxima, respecto a la productividad media.

El cultivo de las microalgas reportó la mayor contribución a los impactos en esta categoría, representando más del 80 % del impacto total. La mayor parte de las emisiones de gases de efecto invernadero se asoció a la producción y uso de electricidad, especialmente por la utilización de las bombas centrífugas y del aireador. En última instancia, estas emisiones se relacionan con la composición de la matriz eléctrica argentina, que posee un alto aporte de combustibles fósiles. Análogamente, Itoiz et al. (2012) reportaron que los mayores impactos de la producción de biomasa de microalgas se produjeron en la etapa de cultivo debido a las demandas eléctricas de las bombas y del sistema de inyección de aire. Por su parte, Pérez-López et al. (2017) también señalaron al cultivo como el proceso de mayor contribución al impacto total como consecuencia de sus requerimientos energéticos.

Por otra parte, la cuantificación de la función del sistema en masa de proteína producida fue útil para comparar el desempeño ambiental de la harina de microalgas con el de productos sustituibles. La consideración de esta unidad funcional mostró que la producción de harina de microalgas generó un impacto sobre el cambio climático al menos 33 veces superior al de la harina de pescado<sup>4</sup>. En función del contenido proteico considerado, si se analizaran los impactos por cada kg de harina de microalgas producida en lugar de cada kg de proteína producida, estos se verían disminuidos aproximadamente en un 57 % y, por tanto, al comparar el impacto equiparando la masa de los dos alimentos, la diferencia se vería atenuada.

3 Estos FC se encuentran disponibles en <http://www.wulca-waterlca.org/aware.html#tab-3>.

4 Los impactos de la producción de 1 kg de proteína contenida en la harina de pescado fueron calculados a partir de los inventarios publicados por Fréon et al. (2017) y disponibles en la base de datos Ecoinvent 3.5.





### Impactos sobre la disponibilidad de agua

La huella de agua de escasez varió según la productividad del sistema entre 27.700 y 77.600 m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O eq/UF, para la productividad máxima y mínima, respectivamente. Esto significa que el impacto por unidad funcional aumentó 78,6 % cuando la productividad del sistema fue mínima, y se redujo 36,3 % cuando la productividad fue máxima, respecto a la productividad media. El amplio rango de variación de los valores manifiesta que la productividad en biomasa adquiere un papel preponderante en la medida del impacto.

El mayor impacto sobre la disponibilidad de agua se asoció al proceso de cultivo, que representó aproximadamente el 78 % del impacto total, como consecuencia de la producción y uso de electricidad requerida por las bombas centrífugas y el aireador. En este caso, los factores de caracterización utilizados influyeron notablemente en el resultado, puesto que las regiones analizadas poseen menor disponibilidad de agua remanente que el promedio mundial. Por consiguiente, los consumos de agua para la producción de microalgas amenazan la disponibilidad de este recurso para otros fines en las regiones analizadas.

No obstante, se destaca que el consumo directo de agua mostró una contribución despreciable frente a la participación de la producción y uso de electricidad (consumo indirecto). Este aspecto es destacable, ya que el agua es uno de los principales recursos requeridos para la producción de microalgas (Junior et al., 2018), lo que puede conducir a inferir erróneamente que la demanda de agua para el cultivo implica un impacto considerable sobre la disponibilidad de este recurso. Sin embargo, los resultados de este trabajo demuestran que los mayores impactos sobre la disponibilidad de agua se asocian a la generación de la electricidad requerida para todo el proceso. De forma similar, Martins et al. (2018) hallaron que el consumo directo de agua para el crecimiento de las microalgas es muy bajo y lo atribuyeron al reúso casi total de agua luego de la cosecha. Dicha estrategia también es utilizada en el sistema analizado en este trabajo, por lo que se reconoce la importancia del reúso de agua para disminuir las adiciones diarias en la preparación del medio de cultivo.

### CONCLUSIÓN

La inclusión de la harina de microalgas en los alimentos para peces ha sido analizada con creciente interés dada la necesidad de hallar sustitutos para la harina y el aceite de pescado. Sin embargo, a partir de los resultados de este estudio particular, se resalta que es preciso reducir los impactos sobre el cambio climático y sobre la disponibilidad de agua para tornar competitiva a la harina de microalgas en la industria de los alimentos para animales, desde un enfoque ambiental.

A tal fin, se evidencia un amplio margen para la disminución del impacto en las dos categorías evaluadas utilizando estrategias de reducción de la electricidad requerida por unidad funcional, principalmente en el proceso de cultivo, aunque se reconoce la dificultad de alcanzar reducciones sustanciales sin afectar los parámetros operativos del proceso. Por otro lado, el uso de energía renovable para abastecer el proceso permitiría reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, es necesario estudiar la factibilidad técnica y económica de tal estrategia.

Por último, se destaca que la productividad de biomasa es una variable importante a considerar para mejorar el desempeño ambiental del producto, puesto que los impactos por unidad producida disminuyen conforme aumenta la productividad.

### AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y a la Facultad Regional Mendoza-Universidad Tecnológica Nacional (FRM/UTN) por el soporte económico e institucional para realizar este estudio.

### REFERENCIAS

1. Ación, F.G., Fernández, J.M., Magán, J.J. y Molina, E. (2012). Production cost of a real microalgae production plant and strategies to reduce it. *Biotechnol. Adv.*, 30(6), 1344–1353.
2. Ación, F.G., Molina, E., Reis, A., Torzillo, G., Zittelli, G. C., Sepúlveda, C. y Masojídek, J. (2017). Photobioreactors for the production of microalgae. En *Microalgae-based biofuels and bioproducts* (pp. 1-44). Woodhead Publishing.
3. Andersen, R.A. (2013). The microalgal cell. En *Handbook of microalgal culture: applied phycology and biotechnology*. 2a ed. (pp. 1-20), John Wiley & Sons.
4. Barsanti, L. y Gualtieri, P. (2018). Is exploitation of microalgae economically and energetically sustainable? *Algal research*, 31, 107-115.



5. Boulay, A.M., Bare, J., Benini, L., Berger, M., Lathuillière, M.J., Manzardo, A., Margni, M., Motoshita, M., Núñez, M., Pastor, A., Ridoutt, B., Oki, T., Worbe, S. y Pfister, S. (2018). The WULCA consensus characterization model for water scarcity footprints: assessing impacts of water consumption based on available water remaining (AWARE). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 23(2), 368-378.
6. Camacho-Rodríguez, J., Macías-Sánchez, M.D., Cerón-García, M.C., Alarcón, F.J. y Molina-Grima, E. (2018). Microalgae as a potential ingredient for partial fish meal replacement in aquafeeds: nutrient stability under different storage conditions. *Journal of Applied Phycology*, 30(2), 1049-1059.
7. Fréon, P., Durand, H., Avadí, A., Huaranca, S. y Moreyra, R.O. (2017). Life cycle assessment of three Peruvian fishmeal plants: Toward a cleaner production. *Journal of cleaner production*, 145, 50-63.
8. Gamboa-Delgado, J. y Márquez-Reyes, J.M. (2016). Potential of microbial-derived nutrients for aquaculture development. *Rev. Aquacult.*, 10 (1), 224-246.
9. International Organization for Standardization. International Organization for Standardization-ISO. (2006b). International Standard 14044. Environmental Management-Life Cycle Assessment-Requirements and guidelines.
10. International Organization for Standardization. International Organization for Standardization-ISO. (2012). Draft International Standard 14067. Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification and communication.
11. International Organization for Standardization-ISO. (2006a). International Standard 14040. Life Cycle Assessment. Requirements and guidelines.
12. International Organization for Standardization-ISO. (2014). Draft International Standard 14046. Environmental Management-Water Footprint-Principles, Requirements and Guidelines.
13. Itoiz, E.S., Fuentes-Grünwald, C., Gasol, C.M., Garcés, E., Alacid, E., Rossi, S. y Rieradevall, J. (2012). Energy balance and environmental impact analysis of marine microalgal biomass production for biodiesel generation in a photobioreactor pilot plant. *Biomass and bioenergy*, 39, 324-335.
14. Junior, E.N., Kumar, M., Pankratz, S., Oyedun, A.O. y Kumar, A. (2018). Development of life cycle water footprints for the production of fuels and chemicals from algae biomass. *Water research*, 140, 311-322.
15. Martins, A.A., Marques, F., Cameira, M., Santos, E., Badenes, S., Costa, L., Verdelho Vieira, V., Caetano, N. y Mata, T.M. (2018). Water footprint of microalgae cultivation in photobioreactor. *Energy Procedia*, 153, 426-431.
16. Pérez-López, P., de Vree, J.H., Feijoo, G., Bosma, R., Barbosa, M.J., Moreira, M.T., Wijffels, R.H., van Boxtel, A., Kleinegris, D.M. (2017). Comparative life cycle assessment of real pilot reactors for microalgae cultivation in different seasons. *Applied Energy*, 205, 1151-1164.
17. The World Bank Group. (2016). Global Solar Atlas. Disponible en: <https://globalsolaratlas.info/map>. Acceso: abril de 2020.
18. Vizcaíno, A.J., López, G., Sáez, M.I., Jiménez, J.A., Barros, A., Hidalgo, L., Camacho-Rodríguez, J., Martínez, T.F., Cerón-García, M.C. y Alarcón, F. J. (2014). Effects of the microalga *Scenedesmus almeriensis* as fishmeal alternative in diets for gilthead sea bream, *Sparus aurata*, juveniles. *Aquaculture*, 431, 34-43.
19. Yaakob, M.A., Mohamed, R.M.S.R., Al-Gheethi, A., Tiew, A., Kassim, A.H.M. (2019). Optimising of *scenedesmus* sp. biomass production in chicken slaughterhouse wastewater using response surface methodology and potential utilisation as fish feeds. *Environ. Sci. Pollut. Res*, 26 (12), 12089-12108.
20. Zhu, L. (2015). Biorefinery as a promising approach to promote microalgae industry: an innovative framework. *Renewable and sustainable energy reviews*, 41, 1376-1384.

