

Herramientas matemáticas y políticas para reducir el efecto invernadero

Mathematical and Policy Tools to Reduce Greenhouse Emissions

Aurora del Carmen Munguía López y José María Ponce Ortega

Resumen

En la actualidad, uno de los retos más importantes es desarrollar acercamientos para abordar problemas como la creciente generación de emisiones en el sector energético, debido a las consecuencias negativas que esto puede tener en nuestra vida diaria. En relación con estas problemáticas, se ha propuesto formular modelos matemáticos para evaluar políticas de carbono en sistemas de generación de energía no convencionales, que permitan reducir las emisiones. Estas políticas de carbono involucran impuestos y bonos de carbono para disminuir las emisiones; y algunos de los sistemas no convencionales incluyen plantas de potencia que utilizan combustión indirecta con un sistema de cultivo de algas y plantas de potencia de doble propósito, que incluyen el uso de biocombustibles y energía solar. El objetivo de este trabajo es mostrar cómo estas herramientas matemáticas y políticas permiten obtener soluciones óptimas que incluyen relaciones complejas entre aspectos económicos, ambientales, y sociales. Esto facilita la toma de decisiones en esquemas no convencionales de generación de energía.

Palabras clave: políticas de carbono, reducción de emisiones, sector energético, modelos matemáticos.

Abstract

Currently, one of the most important challenges is to develop approaches to address problems such as the growing generation of emissions in the energy sector, due to the negative consequences that this can have on our daily lives. In relation to these problems, it has been proposed to formulate mathematical models to evaluate carbon policies in non-conventional energy generation systems that allow emissions to be reduced. These carbon policies involve taxes and carbon credits to reduce emissions; and some of these unconventional systems include power plants that use indirect combustion with an algae cultivation system and dual-purpose power plants that include the use of biofuels and solar energy. The objective of this work is to show how these mathematical and political tools allow to obtain optimal solutions that include complex relationships between economic, environmental, and social aspects. This facilitates decision making in non-conventional power generation schemes.

Keywords: carbon policies, emission reduction, energy sector, mathematical models.

CÓMO CITAR ESTE TEXTO

Munguía López, Aurora del Carmen y Ponce Ortega, José María (2022, marzo-abril). Herramientas matemáticas y políticas para reducir el efecto invernadero. *Revista Digital Universitaria (RDU)*, 23(2). <http://doi.org/10.22201/cuaieed.16076079e.2022.23.2.4>



Aurora del Carmen Munguía López

Universidad de Wisconsin-Madison

Es investigadora postdoctoral en la Universidad de Wisconsin-Madison. Obtuvo sus títulos de Doctorado y Maestría en Ciencias en Ingeniería Química en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y en el Instituto Tecnológico de Celaya, respectivamente. Durante sus estudios de Doctorado realizó una estancia de investigación en el Departamento de Ingeniería Química y Biológica de la Universidad de Wisconsin-Madison. Sus intereses de investigación incluyen el modelado matemático, optimización de cadenas de suministro, diseño de procesos, sustentabilidad, asignación justa de recursos y manejo óptimo de residuos. Ha publicado 10 artículos en revistas indexadas de alto impacto y 1 capítulo de libro. La Dra. Munguía López ha presentado su trabajo en distintos foros nacionales e internacionales.

 1723704c@umich.mx

 orcid.org/0000-0001-6347-3874

 @AuroraMunguia09

José María Ponce Ortega

Instituto Tecnológico, Celaya

Obtuvo sus títulos de Doctorado y Maestría en Ciencias en Ingeniería Química en el Instituto Tecnológico de Celaya en 2003 y 2009, respectivamente. También realizó una estancia postdoctoral en Texas A&M University de 2011 a 2012. Es profesor titular en la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo desde 2003, pertenece al Sistema Nacional de Investigadores (SNI III). Su investigación es en el área de optimización de procesos, diseño sustentable, cadenas de suministro, así como en el uso eficiente de los recursos (masa y energía) dentro y fuera de la industria, con especial énfasis en el análisis del nexo agua-energía-alimentos. Ha publicado más de 260 artículos en revistas indexadas (JCR), 3 libros y más de 50 capítulos de libros, y cuenta con más de 3500 citas tipo A (SCOPUS). Ha sido director de 20 tesis de doctorado, 40 de maestría y 25 de licenciatura. Ha tenido proyectos financiados por diversas instituciones nacionales y extranjeras y es miembro del comité editorial de la revista *Clean Technologies and Environmental Policy*, así como de *Process Integration and Optimization for Sustainability*. Además, es editor asociado de las revistas *Sustainable Production and Consumption* (Elsevier), y *Computational Methods in Chemical Engineering and Sustainable Chemical Process Design* (Frontiers).

 jose.ponce@umich.mx

 orcid.org/0000-0002-3375-0284

Introducción

En la actualidad, uno de los retos más importantes es desarrollar acercamientos para abordar problemas como la creciente generación de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en el sector energético. Los principales GEI en la atmósfera terrestre son el vapor de agua (H_2O), el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O) y el ozono (O_3). En estudios previos se ha demostrado la naturaleza de captura de calor de estos gases (esto provoca un aumento en la temperatura global). Asimismo, de manera reciente, se ha observado un gran incremento en los niveles de los GEI debido a las actividades humanas. Se considera que este incremento causa el calentamiento extremo de la tierra y los cambios climáticos.

Es muy importante resaltar que la crisis climática tiene varios impactos negativos. Uno de ellos es que modifica el ciclo del agua y, por lo tanto, afecta la calidad y cantidad disponibles de este líquido. También puede alterar el impacto de los desastres naturales, causando más y de mayor magnitud. Algunos de éstos, tales como las olas de calor, inundaciones y sequías provocan, además, defunciones y enfermedades. Todo esto podría afectar de manera significativa y permanente la forma en la que vivimos.

El cambio en la temperatura global en los últimos años es muy alarmante, y en muchas partes del mundo se han notado las consecuencias: por ejemplo, días significativamente más cálidos, incluso

con temperaturas extremas. De acuerdo con datos reportados por la NASA (s. f.), los años 2016 y 2020 han sido los de mayor temperatura que se han registrado desde 1880. Además, los 10 años más cálidos en este período han ocurrido desde 2005 (ver figuras 1 y 2).

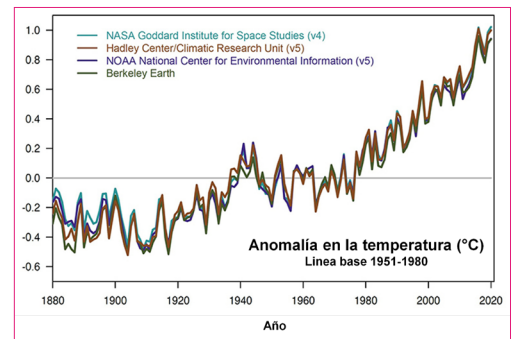


Figura 1. Datos históricos del cambio en la temperatura global de acuerdo con distintos institutos, desde 1880 hasta 2020 (adaptada de NASA, s. f.).

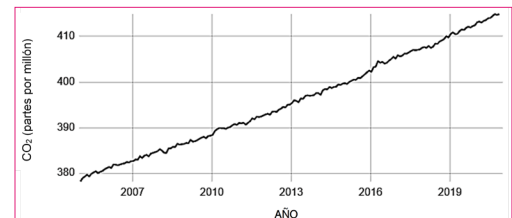


Figura 2. Rápido aumento de la concentración del dióxido de carbono en la atmósfera desde 2005 hasta el 2020. Adaptado de National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, s. f.).

El CO_2 presente en la atmósfera nunca había alcanzado una concentración mayor a las 300 partes por millón (ppm) hasta el año 1950 y a partir de ahí ha seguido incrementando. En estudios previos se ha demostrado la naturaleza de captura de calor del dióxido de carbono y otros gases. Además, los años de mayor cambio en la temperatura global coinciden con los de mayor rapidez de aumento de la concentración del CO_2 . Por lo tanto, se considera que el incremento

de los niveles en los GEI causa el calentamiento de la tierra y, por ende, los cambios climáticos. El Panel Intergubernamental del Cambio Climático afirma que la evidencia científica para el calentamiento del sistema climático es inequívoca y que es 95% probable que este calentamiento sea resultado de las actividades humanas (NASA, s. f.).

De acuerdo con la Environmental Protection Agency (EPA, s. f.) de Estados Unidos, la producción de electricidad es la segunda mayor fuente de emisiones de dióxido de carbono (ver figura 3), además de que aproximadamente 63% del consumo de energía procede de combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural). Esta agencia estima que, para el 2050, todas las emisiones de GEI provenientes de tecnologías relacionadas con la generación de energía necesitarán ser reducidas a la mitad de sus niveles de 2007 para estabilizar el calentamiento global.

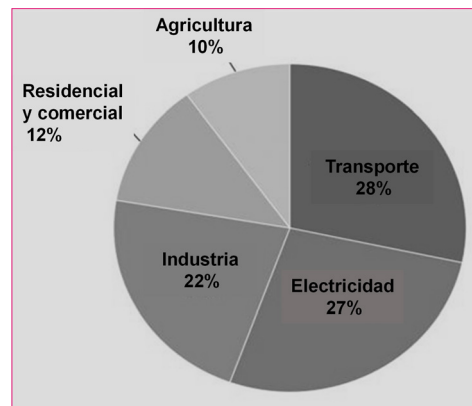


Figura 3. Emisiones de CO₂ en Estados Unidos por sector económico en 2018 (adaptado de EPA, s. f.).

Tomando en cuenta lo anterior, el objetivo de este trabajo es mostrar cómo ciertas herramientas matemáticas combinadas con modelos y políticas de carbono permiten obtener soluciones para reducir las emisiones de GEI.

¿Qué son las políticas de carbono?

Para buscar una solución a estos problemas, se ha propuesto evaluar, a través de modelos matemáticos, diferentes políticas de carbono en sistemas de generación de energía no convencionales. Así, con el fin de reducir las emisiones, distintos gobiernos han desarrollado *políticas de carbono*, que se definen como instrumentos económicos que incluyen penalizaciones (Vatn, 2015) y compensaciones económicas (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT] e Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC], 2012).

Una de estas políticas es el impuesto sobre el carbono, el cual se puede ver como una multa por las emisiones generadas. Este impuesto se define como un costo por tonelada de CO₂ producido. La otra política es el crédito fiscal o bono de carbono. Este bono es una compensación por las emisiones evitadas (Baranzini et al., 2000) y se define como un pago por tonelada de CO₂ evitado. Esta reducción ocurre después de un cambio en las tecnologías o en el proceso de producción incluyendo el uso de energías alternativas y biocombustibles. Estos parámetros se han abordado en la economía como el “principio de quien contamina paga” y el “principio de quien coopera obtiene” (Vatn, 2015). Esto significa que quienes alteran el medio ambiente deben pagar y quienes lo mejoran deben ser compensados (Avi-Yonah y Uhlmann, 2009).

Es importante notar que si la decisión es invertir en combustibles renovables (Cristóbal et al., 2012) o cambiar de tecnologías para reducir las emisiones (Afzal et al., 2018), existen costos asociados. Sin embargo, también se considera que las emisiones generan costos no deseados. Por esta razón, es posible usar los impuestos y bonos para limitar las emisiones en sistemas de generación de energía (Fuentes-Cortés et al., 2018). Estas políticas se han implementado en diversos sistemas energéticos, por ejemplo, en redes eléctricas (Feijoo y Das, 2014) y en sistemas de ahorro de energía y reducción de emisiones (Fang et al., 2017).

Valores económicos para los impuestos y bonos de carbono

Se ha hablado de los valores para los impuestos y bonos de carbono que ya han sido usados en distintos países o que están dentro de los planes para su uso futuro. En el caso de México, para la penalización económica (impuesto), es probable que se consideren en futuras regulaciones los valores de 10 y 15 dólares estadounidenses (USD)/tonelada de CO₂ (SEMARNAT e INECC, 2012). En comparación, los valores de 25, 32, 41 y 52 USD /tonelada de CO₂ se han utilizado como impuestos o multas sobre el carbono en Estados Unidos (Kaufman et al., 2016).

Por otro lado, los bonos de carbono reportados fluctúan entre 0.3 a 130 USD/tonelada de CO₂ evitado. El CO₂ evitado se refiere a las emisiones que no se generan al producir cierta cantidad de electricidad,

gracias a que se usaron tecnologías alternativas. El valor promedio de estas compensaciones ha cambiado en los últimos años de 4 a 7 USD/tonelada de CO₂, y para la mayoría de las emisiones mundiales se utiliza un valor de 10 USD/tonelada de CO₂, aunque el bono de 80-120 USD/tonelada de CO₂ ha sido estimado por modelos económicos (Kossov et al., 2015). Es importante determinar el valor óptimo de las multas y bonos que se deben usar en los sistemas de reducción de emisiones. A continuación, se explican algunos de ellos.

Sistemas de generación de energía no convencionales que incluyen reducción de emisiones

Un ejemplo es un ciclo de potencia que incluye el uso de sistemas de combustión indirecta o CLC (por sus siglas en inglés: *Chemical Looping Combustion*). Éstos pueden capturar el CO₂ con solamente una pequeña penalización en la eficiencia de la planta. En la combustión convencional, el combustible arde al reaccionar con el oxígeno que está en el aire¹. En cambio, en los sistemas de combustión indirecta el combustible que se va a consumir no entra en contacto directo con el aire. Esto sucede porque este tipo de combustión se lleva a cabo en dos reactores separados. Además, se usa un metal que funciona como acarreador de oxígeno, es decir, “transporta” el oxígeno del aire al combustible. Esto permite obtener dos corrientes como productos, una de aire exhausto y otra de dióxido de carbono con agua (ver figura 4).

¹ El aire está compuesto aproximadamente de 78% de nitrógeno (un gas inerte), 21% de oxígeno y 1% de otros gases.

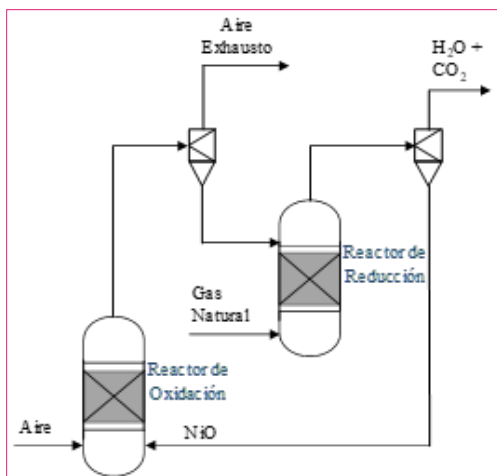


Figura 4. Esquema para el sistema de combustión indirecta convencional.

Una alternativa para aprovechar y mitigar el CO_2 generado en estos sistemas es enviar el efluente, ese líquido residual, a un sistema de cultivo de algas. Este último es eficiente y sustentable, pues sólo requiere carbón, nutrientes, temperatura ambiente y luz solar. El principal producto de estos sistemas de cultivo es la biomasa², que se puede procesar para producir biocombustibles, proteínas y otros productos de alto valor (Judd et al., 2015).

cultivo de algas (Munguía-López et al., 2018). En este modelo se propuso un enfoque de optimización que considera objetivos económicos y ambientales (maximizar la ganancia del sistema y minimizar las emisiones generadas). También se evaluaron diferentes tecnologías para cada paso del proceso, la selección del combustible óptimo y la cantidad de CO_2 enviada al sistema de cultivo (ver figura 5). Para encontrar la solución del modelo multiobjetivo se usaron distintas herramientas matemáticas implementadas en computadoras. A través de los resultados del modelo se presentaron soluciones para varias penalizaciones y compensaciones económicas. También se identificaron los beneficios de considerar los impuestos y bonos de carbono como una estrategia para reducir las emisiones y simultáneamente lograr un sistema rentable de generación de energía y producción de biocombustibles. El bono de 130 USD/tonelada permite obtener los mayores beneficios económicos y ambientales.

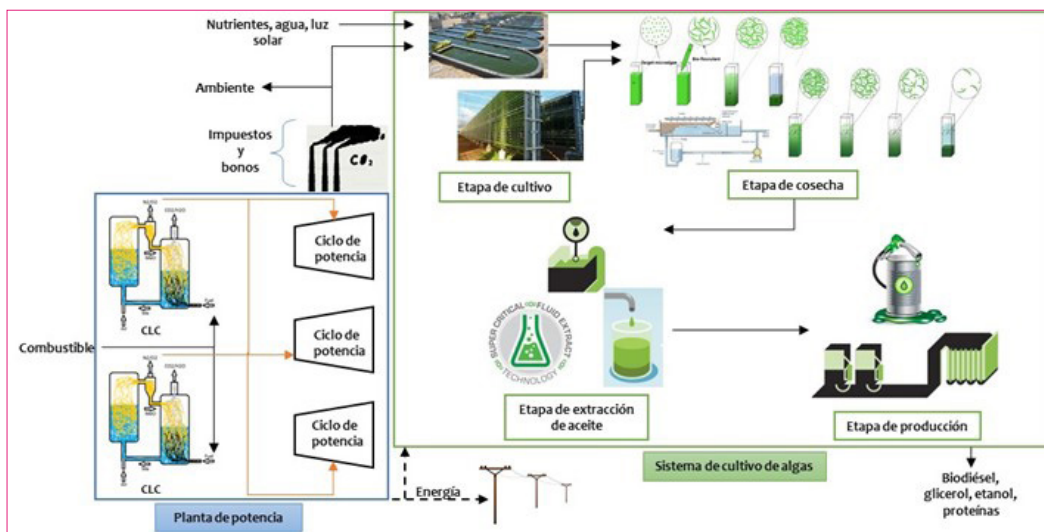


Figura 5. Representación esquemática del sistema propuesto que integra plantas de potencia usando combustión indirecta con sistemas de algas.

Se ha reportado un modelo matemático que evalúa las políticas de carbono en plantas de potencia usando combustión indirecta y sistemas de

Otra alternativa para reducir emisiones en la generación de energía incluye el uso de biocombustibles y energía solar. Dichos combustibles

² Materia orgánica que puede ser utilizada como materia prima y fuente energética.

están restringidos por su disponibilidad en temporada. Esta opción se ha estudiado en un sistema que involucra redes de reparto de agua y plantas de potencia de doble propósito, que pueden generar agua y energía simultáneamente. Se ha reportado un modelo de programación matemática para evaluar las políticas de carbono en este sistema (Munguía-López et al., 2019), el cual sólo tiene un objetivo: maximizar la ganancia del sistema. Sin embargo, a través de las multas y bonos, se espera un impacto positivo en las funciones ambientales y sociales incluidas en el problema.

distintas variables, parámetros y ecuaciones. Los resultados del modelo mostraron los beneficios de considerar los impuestos y bonos relacionados al carbono y al agua, ya que se identificaron compromisos importantes entre las funciones ambientales y sociales, maximizando el beneficio económico. Al usar los bonos al carbono, se encontró la mayor ganancia con beneficios similares al esquema de impuestos al carbono en la disminución de emisiones y el aumento de empleos generados. Usando el mayor bono de carbono (130 USD/tonelada) se encontró la mayor reducción de emisiones y un menor consumo de combustibles fósiles.

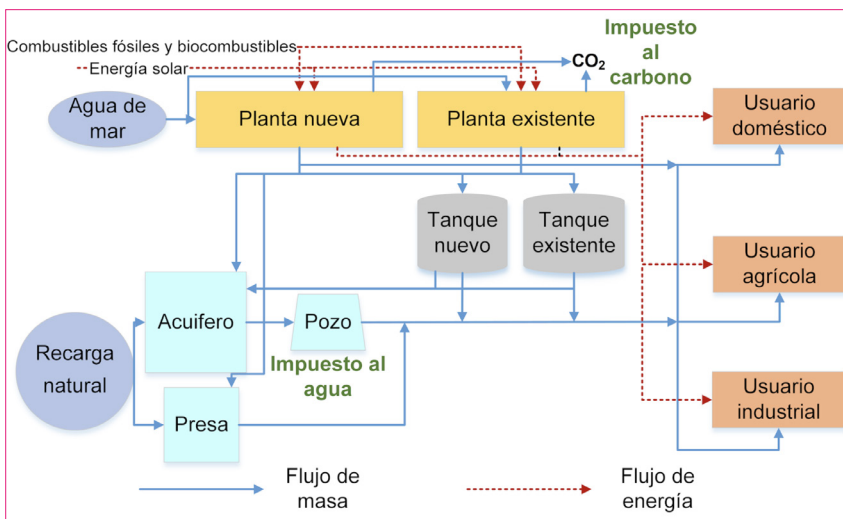


Figura 6. Representación esquemática del sistema de distribución de agua integrado con las plantas de potencia de doble propósito.

En este sentido, se busca una reducción en las emisiones producidas y extracción de agua, al igual que un aumento en la generación de empleos en el sistema macroscópico propuesto. Éste incluye la generación de energía en plantas de doble propósito existentes y nuevas, con el fin de satisfacer las demandas de distintos usuarios (ver figura 6). Para encontrar la solución del modelo se usan diversas herramientas matemáticas, basadas en su descripción con

Conclusiones

De manera general, se puede concluir que, al evaluar las políticas de carbono usando modelos matemáticos, es posible obtener soluciones óptimas que permiten reducir emisiones en sistemas de generación de potencia. Además, los resultados obtenidos a partir de los modelos matemáticos facilitan la toma de decisiones para determinar el impuesto o bono de carbono que se debe aplicar a las emisiones.

Debido a problemas actuales como la gran cantidad de emisiones generadas, es importante considerar políticas que fomenten su disminución. El uso de las políticas de carbono representa una alternativa interesante para abordar los problemas actuales y para obtener diseños óptimos que incluyan beneficios ambientales y económicos.

Referencias

- ❖ Afzal, S., Sengupta, D., Sarkar, A., El-Halwagi, M., y Elbashir, N. (2018). Optimization approach to the reduction of CO₂ emissions for syngas production involving dry reforming. *ACS Sustainable Chemistry y Engineering*, 6(6), 7532-7544. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b00235>
- ❖ Avi-Yonah, R. S., y Uhlmann, D. M. (2009). Combating Global Climate Change: Why a Carbon Tax is a Better Response to Global Warming than Cap and Trade. *Stan. Envtl. LJ*, 28(1), 3-50. <https://repository.law.umich.edu/articles/52>
- ❖ Baranzini, A., Goldemberg, J., y Speck, S. (2000). A future for carbon taxes. *Ecological economics*, 32(3), 395-412. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00122-6](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00122-6)
- ❖ Cristóbal, J., Guillén-Gosálbez, G., Jiménez, L., e Irabien, A. (2012). Optimization of global and local pollution control in electricity production from coal burning. *Applied energy*, 92, 369-378. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.11.028>
- ❖ Environmental Protection Agency (EPA). (s. f.). *Sources of Greenhouse Gas Emissions*. Consultado el agregar fecha de consulta de <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions#t1fn3>
- ❖ Fang, G., Tian, L., Fu, M., Sun, M., Du, R., y Liu, M. (2017). Investigating carbon tax pilot in YRD urban agglomerations—Analysis of a novel ESER system with carbon tax constraints and its application. *Applied energy*, 194, 635-647. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.041>
- ❖ Feijoo, F., y Das, T. K. (2014). Design of pareto optimal CO₂ cap-and-trade policies for deregulated electricity networks. *Applied Energy*, 119, 371-383. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.01.019>
- ❖ Fuentes-Cortés, L. F., Ma, Y., Ponce-Ortega, J. M., Ruiz-Mercado, G., y Zavala, V. M. (2018). Valuation of water and emissions in energy systems. *Applied Energy*, 210, 518-528. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.030>
- ❖ Judd, S., van den Broeke, L. J. P., Shurair, M., Kuti, Y., y Znad, H. (2015). Algal remediation of CO₂ and nutrient discharges: A review. *Water Research*, 87, 356-366. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.08.021>
- ❖ Kaufman, N., Obeiter, M., y Krause, E. (2016). Putting a price on carbon: Reducing emissions [Issue Brief World Resources Institute]. <https://www.wri.org/research/putting-price-carbon-reducing-emissions>
- ❖ Kossoy, A., Peszko, G., Oppermann, K., Prytz, N., Klein, N., Blok, K., Lam, L., Wong, L., y Borkent, B. (2015). *State and Trends of Carbon Pricing 2015*. World Bank. <http://hdl.handle.net/10986/22630>
- ❖ Munguía-López, A. del C., Rico-Ramírez, V., y Ponce-Ortega, J. M. (2018). Analysis of Carbon Policies in the Optimal Integration of Power Plants Involving Chemical Looping Combustion with Algal Cultivation Systems. *ACS Sustainable Chemistry y Engineering*, 6(4), 5248-5264. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b04903>
- ❖ Munguía-López, A. del C., González-Bravo, R., y Ponce-Ortega, J. M. (2019). Evaluation

of carbon and water policies in the optimization of water distribution networks involving power-desalination plants. *Applied Energy*, 236, 927-936. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.053>

- ❖ NASA. (s. f.). *Global Climate Change*. Consultado en enero de 2021 de <https://climate.nasa.gov/scientific-consensus/>
- ❖ National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (s. f.). *Trends in Atmospheric Carbon Dioxide*. Consultado en enero de 2021 de <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/>
- ❖ Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) e Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2012). Quinta comunicación nacional ante la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. <https://unfccc.int/documents/125276>
- ❖ Vatn, A. (2015). Markets in environmental governance. From theory to practice. *Ecological Economics*, 117, 225–233. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.07.017>