

Reseña del artículo titulado *Análisis del Modelos de Digestión Anaerobia (ADM1) y su Aplicación*

Anaerobic Digestion Model Analysis
and Application (ADM1)

Ciencia aplicada

Por: Jaime Ernesto Vargas
jaimee.vargas@utadeo.edu.co

Docente

Universidad Antonio Nariño



Artículo de Revisión

Palabras clave: Biomasa, digestión anaeróbica, microalgas, biorreactores, modelos matemáticos

Keywords: Biomass, anaerobic digestion, microalgae, bioreactors, mathematical models

Todos los organismos del planeta se surten de la naturaleza para su supervivencia. Los humanos no somos la excepción: con la energía del sol las plantas transforman moléculas inorgánicas en orgánicas que denominamos biomasa; este proceso que se realiza sin nuestra intervención dentro de los ecosistemas es denominado capital natural. Este capital natural con nuestra intervención lo convertimos en los llamados servicios ecosistémicos (ES) cuyas funciones y/o procesos directa o indirectamente contribuyen al bienestar humano, es decir los beneficios que la gente obtiene del funcionamiento de ellos. [1] [2]. Sin embargo, algunos eventos como: el cambio climático causado por la liberación desmedida de gases con efecto invernadero (GEI) como el metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) principalmente, la contaminación de las fuentes de agua, así como la explotación descontrolada de los recursos naturales con el fin de obtener energía, están poniendo en riesgo las actuales y futuras generaciones. Una forma de mitigar estos impactos es utilizando microorganismos fotosintéticos como las algas para que a través de la generación de biomasa nos provean la energía que requerimos; las algas tienen propiedades y particularidades de gran valor para nosotros como secuestrar carbono, realizar biorremediación y generar biocombustibles como el biodiesel y el metano, lo que lo convierte en una fuente promisoría de energía renovable. La importancia de las microalgas como productoras de biocom-

bustibles, de biogás, como fijadoras de CO_2 , y como biorremediadoras, ha sido objeto de una intensa investigación. Sin embargo, la biodegradación de la biomasa algar es complicada debido a los componentes de su pared celular la cual está compuesta según Tijani por carbohidratos entre el 30 a 75%; proteínas 1 al 37% que representan el 36 % de la masa total. Por lo tanto, se requieren pretratamientos que permitan modificar la estructura fisicoquímica de esta biomasa. [3]. Para el tratamiento de esta biomasa se ha utilizado la hidrólisis que es realizada por bacterias anaerobias. Los productos de este tratamiento son utilizados como insumos o materia prima en la producción de biodiesel [4], metano [5], [6], hidrógeno [7], fertilizantes [8], productos cosméticos y farmacológicos [9]. En la actualidad, hay una tendencia mundial en la búsqueda de combustibles diferentes a los fósiles mediante la implementación de biorrefinería, donde se lleven a cabo estos procesos fisicoquímicos. La base principal de la biorrefinería es un biorreactor, entre los más usados está el que utiliza lodo anaerobio de flujo ascendente (UASB), (BOX 1) [10] las microalgas como biomasa en la producción de metano son prometedoras, puesto que en los biorreactores anaeróbicos tiene una eficiencia entre el 17 y el 76%, dependiendo de las especies de microalgas [11], [12], la composición química de las células [13] y las condiciones del proceso [14], que es básicamente vía digestión anaerobia. (BOX 2) [15].

Las fuentes de energía renovables deben ser exploradas y explotadas para superar los problemas energéticos y medioambientales en términos de sostenibilidad. En el mundo se da un gradual agotamiento de los recursos fósiles, lo que ha estimulado la búsqueda de fuentes que suplan esta pérdida. La utilización de la biomasa es importante en términos de mejoras en el medio ambiente, bajar la contaminación y producir de energía limpia. [16]. Mejorar las formas y procesos para obtener la energía acumulada en la biomasa es transcendental en la generación de energía a partir de recursos energéticos renovables, la biomasa algar es quizás uno de los más importantes recursos a ser utilizado en la generación continua de energía, ayudando de paso con procesos de biorremediación [17], entre las fuentes de energías renovables.

La tecnología de la biomasa ha recibido un intenso interés en los últimos años, puesto que mediante tecnologías apropiadas se puede aumentar la obtención de biogás. Uno de los procesos de conversión de biomasa más significativo es la digestión anaerobia, que es la conversión bioquímica de la materia orgánica en metano [18]. La digestión de residuos reduce sustancialmente la emisión de (GEI) [19]. Adicionalmente, los subproductos de esta digestión, pueden ser utilizados en la agricultura, industrias farmacéuticas o en industrias agrícolas [20] [21]. Se ha registrado una atención considerable en la utilización de *Chlorella* tanto para la generación de energía como para el procedimiento de aguas residuales provenientes de la industria y/o los hogares, vertederos industriales que producen grandes concentraciones de materia orgánica y en proceso de depuración de contaminantes ambientales [22]. En esta revisión analizaremos las implicaciones, las variaciones y la relación que tiene el modelo de digestión

En el mundo se da un gradual agotamiento de los recursos fósiles, lo que ha estimulado la búsqueda de fuentes que suplan esta pérdida.



anaerobia frente a la generación de metano, dependiendo de las condiciones ambientales, el consorcio bacteriano y el biorreactor utilizado. Además, analizamos los datos bibliométricos del estado actual de este tema.

Sistemas de reacción y pretratamiento: El agotamiento de las energías fósiles, y sus consecuencias funestas para el ambiente ha generado que el consumo de energías renovables se incrementa. El biogás (BOX 3) [23] que generalmente se refiere al gas producido por digestión anaeróbica (DA), es un producto prometedor para atender las necesidades energéticas del mundo, además que proporciona múltiples beneficios ambientales extras. Los siguientes valores hablan por sí solos, las políticas en los Estados Unidos van encaminadas a que al menos el 25% de su energía renovable provenga de biogás [24]; en Italia, 3405 GW h de electricidad fue producida por biogás en el 2011 [25]; en Alemania por lo menos 4000 unidades agrícolas para producción de biogás están operando, en China para 2007 se generaron 10.5 billones de m³, y se fue incrementando a 248 millones de m³ [26]. Este



biogás producto de la DA representa un sistema integrado de procesos fisiológicos microbianos y de metabolismo energético producido bajo condiciones específicas; sin embargo estos microorganismos son susceptibles de variaciones ambientales o variaciones en los materiales a ser degradados o a los biorreactores utilizados; para la óptima operación de un biorreactor es necesario tener en cuenta varios elementos como la estructura del biorreactor, la degradación previa de la biomasa con enzimas o radicales libres y la implementación de consorcios bacterianos de acuerdo con el material a ser digerido [27]; todos los anteriores parámetros requieren de modelos matemáticos que nos permitan optimizar los

procesos, bajar costos y nos ayudan a tomar la mejor decisión frente a una determinada fuente de biomasa y/o biorreactor.

Modelos Matemáticos. Los modelos son fundamentales en todas las disciplinas científicas; su importancia radica en su utilidad frente a la toma de decisiones, algo de vital importancia en un mundo que cambia rápidamente y cuya información es exponencial. Sin embargo, la comprensión, precisión y exactitud de los modelos es esencial porque de ellos dependen las variables que se utilizan en el proceso; en este caso particular los procesos de degradación anaerobia son fundamentales en la producción de biogás o biocombustibles. Es de gran importancia la identificación de los beneficios y desventajas del modelo, el conjunto de ecuaciones que maneja junto con las herramientas apropiadas para cuantificar los datos. En esta revisión nos centraremos en el modelo de digestión anaerobia, que es un modelo cinético estructurado (figura 1) (BOX 4) [28] [29]. Los modelos matemáticos son de gran utilidad para efectuar los análisis pertinentes, pues ayudan con el cálculo exacto del tiempo en que avanza un sistema con este tipo de interacciones, haciendo posible la comparación de los datos medidos con aquellos generados con el modelo, constituyendo una prueba indirecta de las hipótesis formuladas acerca de tales mecanismos [30]. Como los modelos matemáticos aplicados en hábitats naturales demandan de reducciones del proceso real, entonces se les adicionan o basan en parámetros empíricos que se determinan a partir de datos experimentales. Todo lo anterior asociado con el perfeccionamiento de la simulación de procesos, provocó el diseño de programas de computación con la capacidad de realizar la simulación propiamente dicha a partir de los datos medidos [31].

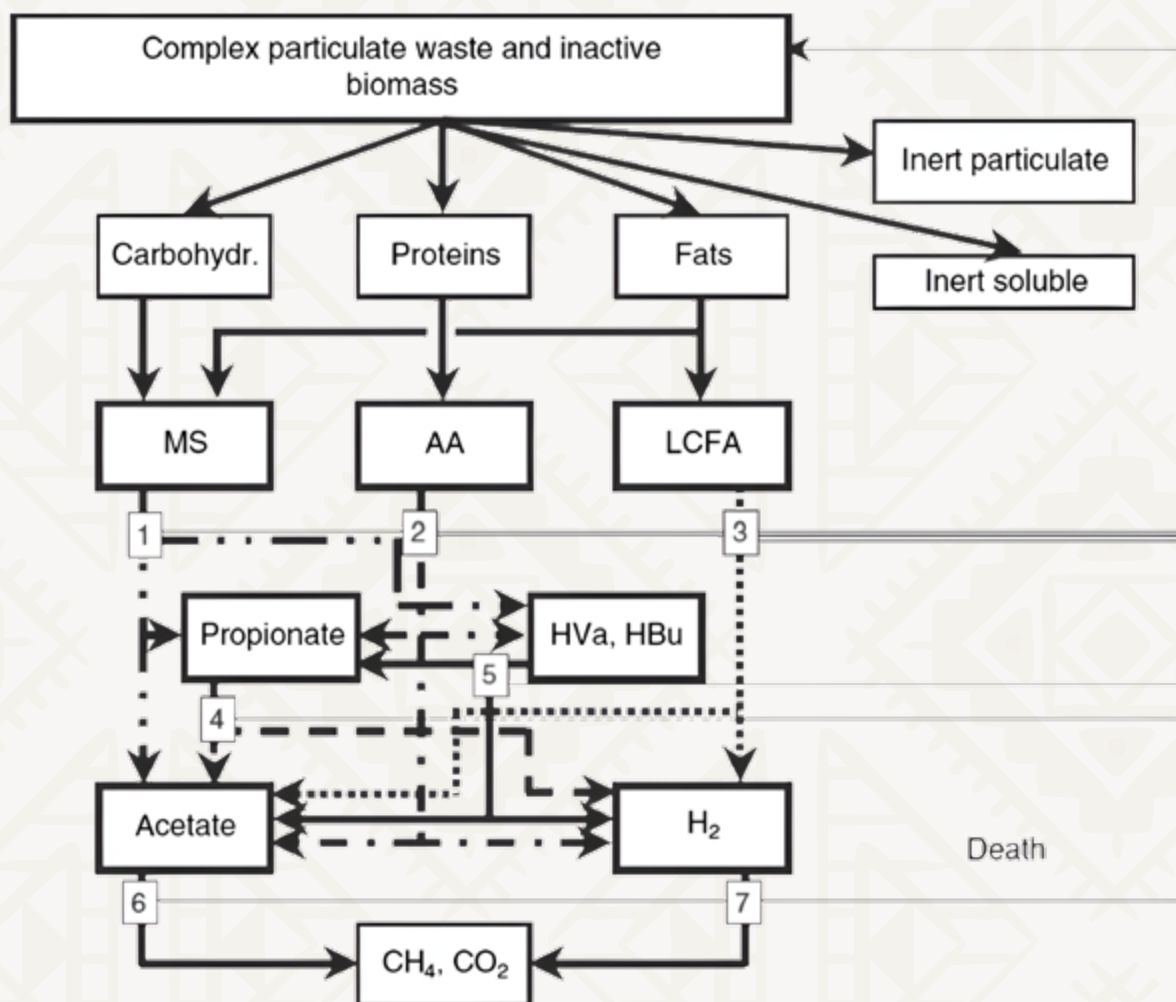


Figura 1. El modelo anaeróbico estructurado incluye procesos bioquímicos como: (1) Ácido génesis de azúcares, (2) Ácido génesis a partir de aminoácidos, (3) Acetogénesis a partir de LCFA, (4) Acetogénesis a partir de propionato, (5) Acetogénesis a partir de butirato y valerato, (6) Metanogénesis acetático y (7) Hidrogeno trófica Metanogénesis.

Fuente: Tomada de Batstone (2002).

En el modelo ADM las ecuaciones fisicoquímicas describen la asociación de iones y disociación y transferencia gas-líquido, implementado como un conjunto de ecuaciones diferenciales y algebraicas (DAE). Son 26 variables de concentración de estado dinámico y 8 variables algebraicas implícitas por recipiente de reactor [30]. El ADM es un modelo cinético

empleado universalmente que permite la representación matemática de la digestión anaeróbica en distintos tipos de sustratos orgánicos [31]; la hidrólisis y la degradación microbiana se representan por cinéticas de primer orden, con la ecuación de Monod interpretamos el gasto de los compuestos solubles y la obtención de gas [32] [33] posee varias ventajas como son: la gene-

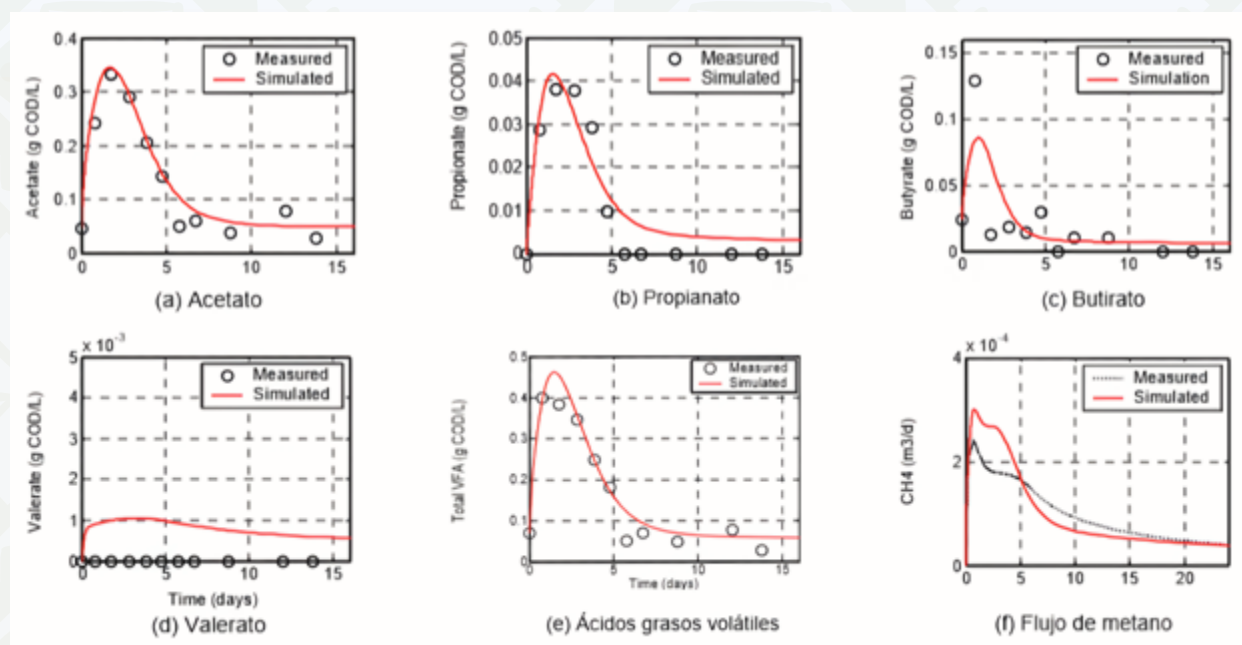


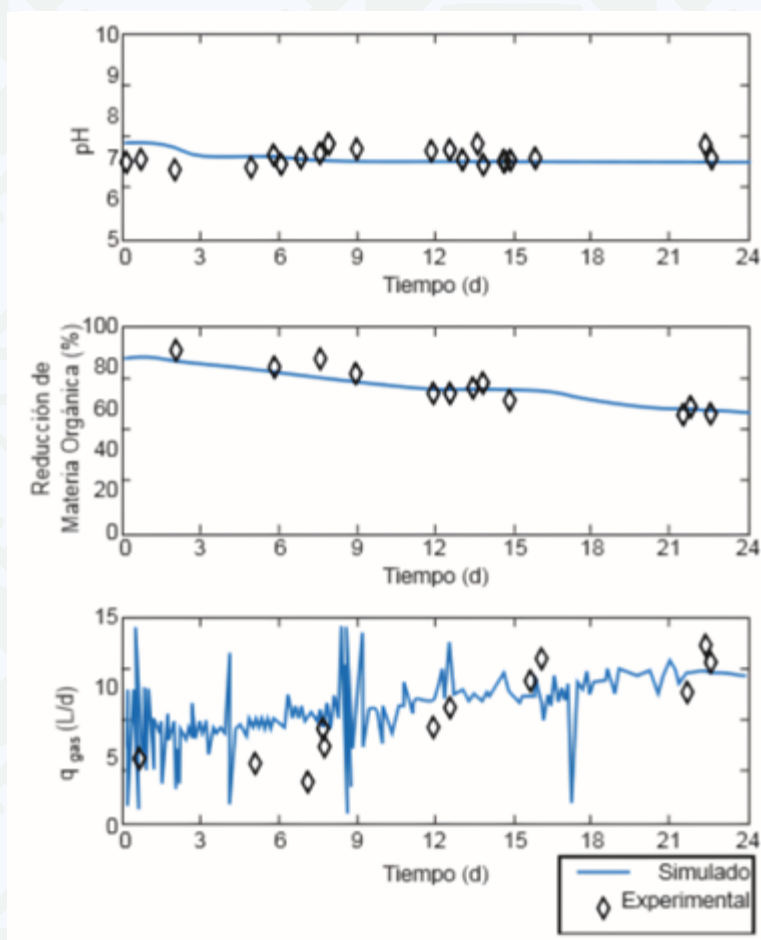
Figura 2. Comparación del modelo ADM y datos experimentales para desechos de papa.

Fuente: Tomado de Hernández (2011).

ración de lodos estabilizados en abundancia es pequeña y fácilmente reducidos hasta un 30 a 40 % con esto se logra que los costos de tratamiento y su transporte sean bajos, además se pueden aplicar una cargas hidráulicas altas y orgánicas con eficacias aceptables; el reactor no requiere mucho espacio, los lodos anaerobios acondicionados pueden conservarse sin alimentación por períodos largos de tiempo, haciendo que el proceso sea sumamente adecuado para las industrias que trabajan de forma cíclica. Los costos de operación y mantenimiento son relativamente bajos. Ya que la construcción no es compleja. Sin embargo, también posee desventajas como: en una etapa inicial el proceso es lento, requiriendo un período de dos a tres meses; otra desventaja es que el proceso puede ser alterado por compuestos tóxicos recurrentes en medios contaminados, la disminución de bacterias patógenas es baja. Y por último el proceso es realizado por más de 100 microorganismos distintos, muchos de los cuales

no se han clasificado en su totalidad. [34] [35] [36]. Sin embargo, el modelo se ha venido utilizando y mejorando, puesto que los resultados permiten sostener que el modelo si permite predecir el comportamiento de la digestión. Un ejemplo es el trabajo presentado por Hernández en el 2011 [36] donde prueba el modelo con datos experimentales utilizando residuos de papa, café, arroz y pasta (figura 2)

El trabajo de Sossa 2016, donde realiza nuevas aplicaciones matemáticas al ADM y prueba la correlación del modelo con los datos experimentales utilizó efluentes industriales de mataderos, tratados en un reactor UASB. El estudio de sensibilidad reveló que la hidrólisis de proteínas y la desintegración de los ácidos grasos de cadena larga son las etapas controlantes del proceso anaerobio de las aguas residuales industriales como pueden ser los desechos y desperdicios derivados de mataderos. (figura 3) [37].

**Figura 3.**

Datos experimentales y de simulaciones de materia orgánica para la producción de biogás, derivados de la industria de carnes y procesados en un reactor tipo UASB. En el modelo se analizaron el pH, la retención de materia orgánica y la concentración de gas.

Fuente: Tomado de Sossa (2016).

Los primeros trabajos realizados con el modelo indican algunas características innatas de este como que los procesos son dependientes por la competencia por el sustrato, son afectados negativamente por los sulfuros y además todos los métodos microbianos mediados por la transformación del sustrato están sujetos a ser bloqueados por pH extremo [29]. Ramírez reporta que se puede dar la inhibición por sulfuros debido a la reducción del sulfato, además de las posibles inhibiciones por ácidos grasos de cadena larga [38]. Son muchas y variadas las aplicaciones del modelo ADM1 desde su implementación en el 2002; una de las primeras aplicaciones en sustratos diferentes es el trabajo de Fezzani en el 2009 donde utiliza el ADM1 para mani-

pular y simular la degradación anaeróbica de compuestos de fenol y homólogos en aguas residuales de olivares (OMW) y los desechos sólidos de un cultivo de olivos (OMSW). Las transformaciones se relacionaron con la inserción de los procesos de degradación de compuestos fenólicos en acetato, en metano y CO_2 . El efecto de los compuestos fenólicos solubles sobre el pH se tuvo en cuenta en las ecuaciones de simulación de pH.

Los parámetros fenólicos más sensibles y nuevos, se calibraron y validaron utilizando datos experimentales realizados en estudios anteriores; la simulación arrojó que el ADM1 extendido es capaz de predecir con una precisión razonable las

concentraciones de fenol en el efluente y las tasas de flujo de gas y el pH del efluente de diversas concentraciones de afluente digeridas en lo que se conoce como tiempos de retención hidráulica (TRH) de 24 y 36 días [39]; también se ha utilizado el ADM1 en numerosos trabajos para parámetros cinéticos en la degradación de ácidos grasos volátiles (AGV). Un trabajo representativo es el de Boltes donde presenta un análisis cinético de la degradación anaeróbica de AGV realizado en un reactor de tanque agitado continuo y por lotes. Se utilizaron como sustratos: ácido propiónico, butírico y ácido acético (mezclados en una relación 2: 1: 1). La biomasa para los ensayos de cinética se produjo previamente en un proceso de codigestión utilizando estiércol de cerdo mezclado con lodos obtenidos a partir de digestores municipales anaerobios. En el estudio, se obtuvo un buen número de parámetros cinéticos introduciendo un proceso de inhibición en ácido acético y degradación del ácido propiónico, encontrando como principal limitación la composición del consorcio de microorganismos los cuales deben ser similares, así como sus potenciales metanogénicos. [40]. También se utilizó con éxito en el procesamiento de los residuos condensados de un molino de pulpa de papel que contienen sulfito y ácido acético lo que lo hace un buen candidato para la digestión anaerobia, demostrando que no se requieren todas las predicciones del modelo para que la simulación tenga éxito, se requiere más tener los parámetros relevantes del proceso [41]. Batstone y Keller lo utilizaron para valorar dos digestores industriales. En uno se evaluó la adición de ácido para reducir el pH e impedir la precipitación de carbonato de calcio (CaCO_3) en un reactor UASB de una industria papelera, la simulación demostró que la adición de ácido encarece el proceso, además de no presentar efectos significativos en los niveles de CaCO_3

presentes en el reactor. En el segundo estudio, se establecieron los beneficios de la acción termofílica en oposición a la acción mesofílica con el fin de disminuir la inhibición por amonio y optimizar la estabilidad y generación de gas en un digestor de sólidos; en ambos casos se determinó que no tienen relevancia en el funcionamiento del reactor [42].

En un trabajo maravilloso sobre la evolución del ADM1 realizado por varios investigadores como Víctor Rivera-Salvador, Juan S. Aranda-Barradas, Teodoro Espinosa-Solares, Fabián Robles-Martínez y Ulises Toledo se presentan los datos de las publicaciones sobre el modelo, desde su aparición en el 2002 hasta el 2010, donde se demuestra su aumento paulatino con un máximo de publicaciones en el 2009 (figura 4). Además generaron una tabla con los nombres de los investigadores más destacados y su aportación al modelo, (cuadro 1) [43].

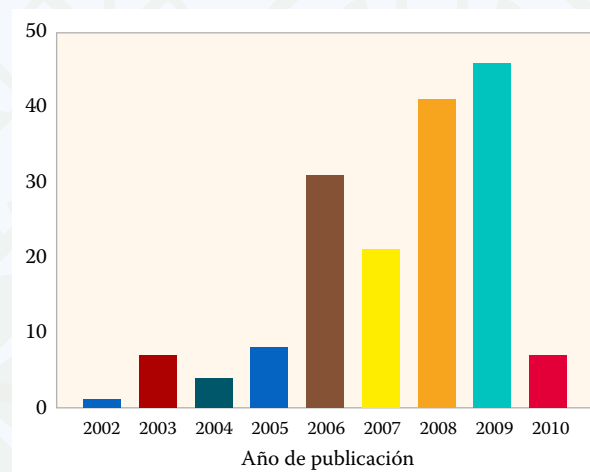


Figura 4. Publicaciones relacionadas al ADM1, desde su publicación en el 2002 hasta enero de 2010. Se tomaron las publicaciones de las bases de datos de ELSEVIER, PUBMED y SPRINGER.

Fuente: tomado de Rivera-Salvador, et al. (2009).

En este cuadro vemos los diferentes aportes como son la inclusión de moléculas diferentes a las originales como los valerato, o carbonatos, inclusión de ecuaciones que permiten modelar cambios de pH, inclusión en el modelo de la variedad microbiana con diez especies en cada conjunto

de biomasa funcional; se incluyeron plantas acuáticas y el modelamiento de biorreactores entre otros. Algo muy importante en estos reportes es que no aparecen trabajos con algas, las cuales son la especie más promisoría en la producción de biogás mediante procesos anaerobios.

Cuadro 1. Algunas modificaciones al modelo ADM1 reportadas en la literatura.

<i>Aportación</i>	
Batstone <i>et al.</i> (2002):	Estructura genérica del proceso de digestión anaeróbica. Como un sistema de ecuaciones diferenciales y algebraicas hay 26 variables de estado dinámicas de concentración, 19 procesos bioquímicos y 3 procesos de transferencia de gas y 8 variables algebraicas implícitas. Como un sistema de ecuaciones diferenciales hay 32 variables de estado dinámicas de concentración y 6 procesos ácido-base.
Batstone <i>et al.</i> (2003):	Modificaciones para la degradación de i-valerato. El modelo se modificó para permitir la inclusión de n-valerato con una ecuación cinética de consumo competitivo. Adición de una variable de estado dinámica (i-valerato total) y una variable algebraica (ion i-valerato).
Jeong <i>et al.</i> (2005):	Se analizó la sensibilidad de los parámetros cinéticos y estequiométricos en la degradación anaeróbica de glucosa. Se utilizaron solo 5 procesos: consumo de azúcares, consumo de butirato, consumo de propionato, consumo de acetato y consumo de hidrógeno.
Straub <i>et al.</i> (2006):	El ADM1 se empleó para evaluar el efecto de las variaciones en la hidrólisis de sólidos y en la estabilidad en procesos metanogénicos acetoclásticos en un exceso de acetato utilizado. Se incorporaron estructuras hidrolíticas, rutas simples y duales, así como estructuras de población acetoclástica simple y competitiva.
Batstone y Keller (2003):	Se incluye una ecuación adicional para describir la precipitación de CaCO_3 en un reactor UASB alimentado con efluentes de una fábrica de papel.
Batstone (2006):	Menciona el uso de los modelos anaeróbicos en general y aplicación a sistemas domésticos de aguas sucias. Requerimientos para análisis operacional, desarrollo de tecnología y diseño con base en el modelo. Propone una ecuación adicional para situaciones donde se necesite representar la reducción del sulfato.
Fuentes <i>et al.</i> (2008):	Un reactor anaeróbico de lecho fluidizado se representa por medio de cuatro modelos: un modelo de digestión anaeróbica, un modelo de biopelícula, un modelo de partícula y un modelo hidrodinámico.
Fuentes <i>et al.</i> (2008):	Un reactor anaeróbico de lecho fluidizado se representa por medio de cuatro modelos: un modelo de digestión anaeróbica, un modelo de biopelícula, un modelo de partícula y un modelo hidrodinámico.
Campos y Flotats (2003):	Se desarrolló un algoritmo para la simulación dinámica del pH. Incrementa el número de variables de estado a 33 y el número de procesos a 22.
Shimada <i>et al.</i> (2007):	ADM1 se modificó para incluir la acumulación y degradación de trealosa. La hidrólisis de polímeros complejos y la fermentación de productos de la hidrólisis no se incluyen. La biomasa muerta resulta en la producción de partículas inertes. Los productos microbianos solubles y la producción de butirato se desprecian. Un proceso adicional describe la conversión de glucosa a un carbohidrato de reserva y la subsecuente hidrólisis de este polímero.

Aportación	
Gali <i>et al.</i> (2009):	La modificación en este caso utiliza ecuaciones de energía en lugar de ecuaciones algebraicas. 32 procesos (19 procesos biológicos, 10 procesos de equilibrio y 4 procesos de transferencia de gas). 41 componentes divididos en 24 compuestos solubles, 13 compuestos en forma de partícula y 4 compuestos gaseosos.
Ramírez <i>et al.</i> (2009):	El modelo se modificó para considerar una mayor diversidad microbiana (10 especies en cada grupo de biomasa funcional). El modelo extendido (ADM1_10) incluye 70 diferentes especies de biomasa, 87 variables de estado en total y 154 reacciones asociadas.
Zhao <i>et al.</i> (2009):	ADM1 se desarrolló para describir la conversión anaeróbica de plantas acuáticas ricas en ligno-celulosa. El modelo cinético describe las relaciones entre tres especies: sustrato, productos y microorganismos. Once bioprocesos y cuatro clases de microorganismos.
Batstone <i>et al.</i> (2004):	Se examinó la estructura de cuatro tipos de gránulos y su relación con la cinética de degradación de sustrato. Los gránulos se representaron usando un modelo de parámetros distribuidos. Además de un modelo de parámetros de biopelícula usando una aproximación de primer orden en las ecuaciones diferenciales parciales que representa la profundidad de la biopelícula.
Tartakovsky <i>et al.</i> (2008) y Mun <i>et al.</i> (2008):	El modelo, nombrado ADM1d, combina cinéticas de crecimiento de biomasa del ADM1 con transformación del sustrato con balances de masa de dispersión axial. El modelo de parámetros distribuidos consta de 36 ecuaciones diferenciales parciales (12 ecuaciones de balance para materiales solubles, 12 para material en partículas, 9 iones y 3 gases). 72 ecuaciones diferenciales ordinarias (dos condiciones de frontera para 36 componentes) y 3 ecuaciones algebraicas para los balances de masa completos de los 33 componentes del líquido.
Batstone <i>et al.</i> (2006):	Desarrollo de un modelo de biopelícula usando modelado multidimensional. El enmallado de alta resolución tiene 315 x 513 elementos con 12 componentes químicos y 7 ácido bases iónicos (aproximadamente 5×10^4 ecuaciones algebraicas implícitas) para resolverse simultáneamente.
Fuentes <i>et al.</i> (2009):	Presenta un modelo heterogéneo de un sistema de reacciones biológicas y de comportamiento biológico e hidrodinámico de un reactor anaeróbico de lecho fluidizado con biomasa. Considera las ecuaciones de ADM1 y un modelo general de dispersión axial con base en ecuaciones de balance de masa, energía y momentum.

Fuente: tomado de Rivera-Salvador, *et al.* (2009).

Entre 2010 y 2018 la producción ha sido más baja, pero se ha mantenido constante con un promedio de entre 20 a 25 publicaciones por año (figura 5). Los temas centrales de estas publicaciones han sido: cómo se afecta la productividad y/o rendimiento de metano con la concentración de sólidos totales [44] y con gran auge, que grado de afectación tienen los procesos de codigestión utilizando varios sustratos; todo con el fin de mejorar el proceso de producción de gas a través del tratamiento conjunto. Se requiere escoger

mezclas que favorezcan sinergias positivas como nutrientes y evitar las negativas o las que inhiben el proceso como por ejemplo producción excesiva de amoníaco [45].

La producción de artículos utilizando el ADM1 en algas sigue siendo demasiado bajo. (figura 6).

Como podemos ver, es un modelo maduro bien estructurado y con múltiples aplicaciones, sin embargo, como lo demuestran las revisiones de Batstone & Puyol (2015), Batstone & Virdis

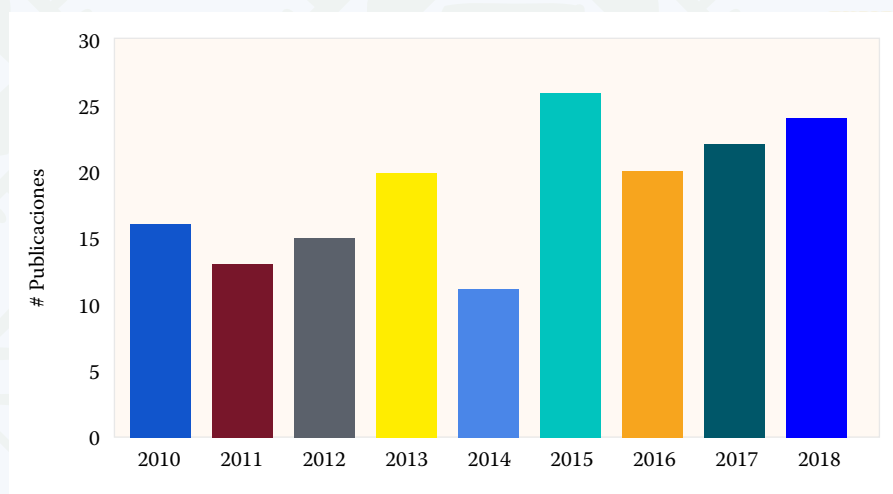


Figura 5.
Publicaciones relacionadas al ADM1, por año desde su publicación desde 2010 hasta 2018.
Fuente: Elaboración propia. Se realizó esta bibliometría con la base Web of Science.

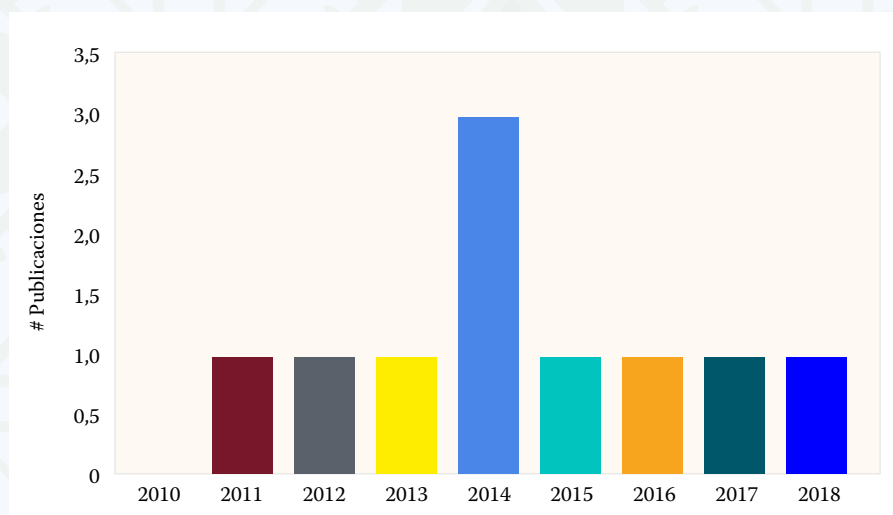


Figura 6.
Publicaciones relacionadas al ADM1 y algas por año desde su publicación en 2010 hasta 2018.
Fuente: Elaboración propia. Se realizó esta bibliometría con la base Web of Science.

(2014) el campo se está difundiendo rápidamente, fundamentalmente por la apropiación de nuevas y variadas tecnología y procesos; ahora se deben considerar los tratamientos anaeróbicos en un contexto y con objetivos más amplios que solo en el tratamiento de las aguas residuales. En el área de tecnologías, han estado surgiendo nuevos procesos como el denominado “plug-flow Digestión anaerobia” que consiste en un biodigestor que prefiere residuos orgánicos procedentes de ganado vacuno, la novedad está

en que contiene un gran porcentaje de sólidos que no están presentes en el biodigestor tipo UASB. También son importantes los biorreactores anaeróbicos de membrana que son capaces de tratar aguas residuales con alto contenido en sólidos, como son los residuos que tienen un origen doméstico. Por otra parte, los procesos microbianos emergentes están desafiando nuestra comprensión del papel del metabolismo del carbono central en la digestión anaeróbica, como es la importancia del fósforo, el azufre y

los metales como fuente y sumidero de electrones, tomando el hidrógeno y el metano como posibles fuentes de electrones, debido a que los aceptadores de electrones alternativos son otro tema clave [46].

Con las nuevas investigaciones el paradigma de la digestión anaeróbica es desafiado por el fototropismo anoxigénico donde los organismos producen energía química utilizando la luz, pero no oxígeno, esto hace que la energía sea barata, pero la transferencia de electrones sea costosa. [47]. Se hacen necesarias nuevas tecnologías que tengan un mayor impacto y un papel clave para los procesos vinculados al fósforo, azufre y hierro en todo el ciclo. La revisión general encuentra que el modelado anaeróbico está aumentando en su profundidad, generando más detalle y más datos con el fin de lograr un buen modelado; sin embargo, comprender con mayor precisión los principios centrales de los procesos bioquímicos y fisicoquímicos, así como la homeostasis metabólica dentro del biorreactor, que al final involucra mantener en equilibrio la concentración de diferentes grupos de bacterias que llevan a cabo estos procesos, es clave para los nuevos trabajos e implementaciones del ADM. [46]. Se requiere reestructurar el esquema clásico de la digestión anaerobia, integrando conceptos como flujo de electrones desde fuentes inorgánicas o los procesos metabólicos emergentes en la digestión anaerobia como son el proceso foto-anaeróbico, el ciclo de azufre (que interactúa con el ciclo del fósforo), el ciclo de oxidación-reducción de metales, ciclos alternativos de nitrógeno y la acción del metano e hidrógeno como donadores de electrones [48]. Como lo sugieren varios expertos se requiere un ADM 2.

Referencias

- [1] Manirafasha, E., Ndikubwimana, T., Zeng, X., Lu Y. and K. Jing, K. (2016). "Phycobili-protein: Potential microalgae derived pharmaceutical and biological reagent", *Biochem. Eng. J.*, vol. 109, pp. 282–296.
- [2] Coppens, J. et al. (2016): "Nitrification and microalgae cultivation for two-stage biological nutrient valorization from source separated urine." *Bioresource technology* 211 41-50.
- [3] Chen Z. et al., (2015) "A lytic bacterium's potential application in biofuel production through directly lysing the diatom *Phaeodactylum tricornutum* cell," *Algal Res.*, vol. 12, pp. 197–205.
- [4] Chinnasamy, S., Bhatnagar, A., Claxton, R., and Das, KC. (2010). "Biomass and bioenergy production potential of microalgae consortium in open and closed bioreactors using untreated carpet industry effluent as growth medium," *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 17, pp. 6751–6760.
- [5] Gao, F. et al., (2016). "Continuous microalgae cultivation in aquaculture wastewater by a membrane photobioreactor for biomass production and nutrients removal," *Ecol. Eng.*, vol. 92, pp. 55–61.
- [6] Kavitha, S., et al. (2017) "Enhancement of biogas production from microalgal biomass through cellulolytic bacterial pretreatment." *Bioresource technology* 233: 34-43.
- [7] Tijani, H., Abdullah, N. and Yuzir, A. (2015) "Integration of microalgae biomass in biome-thanation systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 52, pp. 1610–1622.
- [8] Sivagurunathan, P., Kumar, G., Pugazhendhi, A., Zhen, G., Kobayashi, T., & Xu, K.

- (2017). Biohydrogen Production from Wastewaters. In *Biological Wastewater Treatment and Resource Recovery*. InTech.
- [9] Renuka, N., Prasanna, R., Sood, A., Ahluwalia, A. S., Bansal, R., Babu, S., ... & Nain, L. (2016). Exploring the efficacy of wastewater-grown microalgal biomass as a biofertilizer for wheat. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(7), 6608–6620.
- [10] Arango Bedoya, O. and Sanches e Sousa L.. (2009) "Treatment of dairy industry wastewater using uasb anaerobic system." *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* 7.2: 24-31.
- [11] Yu J. and Chen, LXL (2008). "The Greenhouse Gas Emissions and Fossil Energy Requirement of Bioplastics from Cradle to Gate of a Biomass Refinery," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 42, no. 18, pp. 6961–6966.
- [12] Rittmann, BE (2008). "Opportunities for renewable bioenergy using microorganisms," *Biotechnol. Bioeng.*, vol. 100, no. 2, pp. 203–212.
- [13] Oldroyd, GE and Dixon, R. (2014) "Biotechnological solutions to the nitrogen problem," *Curr. Opin. Biotechnol.*, vol. 26, pp. 19–24.
- [14] Golueke, C G; and Oswald W J "Biological Conversion of Light Energy to the Chemical Energy of Methane," Jul-1959. [Online] Available: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov.proxy.library.cornell.edu/pmc/articles/PMC1057509/>. [Accessed: 12-Apr-2011].
- [15] Kotsyurbenko, OR. (2005): "Trophic interactions in the methanogenic microbial community of low-temperature terrestrial ecosystems." *FEMS microbiology ecology* 53.1 3-13.
- [16] Appels, L. et al. (2011): "Anaerobic digestion in global bio-energy production: potential and research challenges". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15.9 4295-4301.
- [17] Fanchi, JR, & Fanchi, CJ (2011). *Energy in the 21st century*. (2nd Edition), Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- [18] Nordberg, Å., Jarvis, Å., Stenberg, B., Mathiesen, B., & Svensson, BH. (2007). Anaerobic digestion of alfalfa silage with recirculation of process liquid, *Bioresource Technology*, 98(1), 104–111.
- [19] Kwietniewska, E., & Tys, J. (2014). Process characteristics, inhibition factors and methane yields of anaerobic digestion process, with particular focus on microalgal biomass fermentation, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 34, 491–500.
- [20] Doğan-Subaşı, E., and Göksel ND.. (2016): "Anaerobic digestion of microalgal (*Chlorella vulgaris*) biomass as a source of biogas and biofertilizer." *Environmental Progress & Sustainable Energy* 35.4 936-941.
- [21] Karagiannidis, A., & Perkoulidis, G. (2009). A multi-criteria ranking of different technologies for the anaerobic digestion for energy recovery of the organic fraction of municipal solid wastes, *Bioresource Technology*, 100(8), 2355–2360.
- [22] Liu, C., et al. (2016): "Diplosphaera sp. MM1–A microalga with phycoremediation and biomethane potential." *Bioresource technology* 218 1170-1177.
- [23] Khanal, SK. (2008). *Anaerobic biotechnology for bioenergy production: principles and applications*. John Wiley & Sons, 2011. Khanal, S.
- [24] Holm-Nielsen JB, Al Seadi T, Oleskowicz-Popiel P. (2009); The future of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresour Technol* 100:5478–84.

- [25] Bacenetti J, Negri M, Fiala M., Gonzalez-Garcia, S (2013). Anaerobic digestion of different feedstocks: impact on energetic and environmental balances of biogas process. *Sci Total Environ* 463–464:541–51.
- [26] Mao, C., Feng, Y., Wang, X., & Ren, G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 540-555.
- [27] Deng, Y., Xu, J., Liu, Y., & Mancl, K. (2014). Biogas as a sustainable energy source in China: regional development strategy application and decision making. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 35, 294-303.
- [28] Martín, AA., Soria, FGO., & Mazonra, VES. (2003). Desarrollo de modelos cinéticos para bioprocesos: aplicación a la producción de xantano. Universidad Complutense de Madrid, Servicio de Publicaciones.
- [29] Batstone, DJ., Keller, J., Angelidaki, I., Kalyuzhnyi, SV., Pavlostathis, SG., Rozzi, A. & Vavilin, VA. (2002). The IWA anaerobic digestion model no 1 (ADM1). *Water Science and technology*, 45(10), 65-73.
- [30] Lettinga, G. (1983). Anaerobic treatment of raw domestic sewage at ambient temperatures using a granular bed UASB reactor. pp. 50-54.
- [31] Schoen, MA., Sperl, D., Gadermaier, M., Goberna, M., Franke-Whittle, I., Insam, H., & Wett, B. (2009). Population dynamics at digester overload conditions. *Bioresource technology*, 100(23), 5648-5655.
- [32] Lübken, M., et al. (2007): "Modelling the energy balance of an anaerobic digester fed with cattle manure and renewable energy crops." *Water research* 41.18 4085-4096.
- [33] Zhao, B-H. et al. (2009): "Modeling anaerobic digestion of aquatic plants by rumen cultures: cattail as an example." *water research* 43.7 2047-2055.
- [34] Jeppsson U.; (1993). Department of Industrial Electrical Engineering and Automation (IEA), Lund Institute of Technology, Sweden
- [35] Reichert, P.; (1998). Aquasim 2.0. User Manual. Computer Program for the Identification and Simulation of Aquatic Systems. Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology (EAWAG), Dübendorf, Switzerland.
- [36] Hernández, MS., and Delgadillo, LRM. (2011): "Aplicación del modelo ADM1 en la digestión anaerobia de aguas residuales y desechos sólidos." *Tumbaga* 1.6 29-42.
- [37] Sossa, JJ. and Álvarez, R. (2016): "Implementación del modelo IWA ADM1 a la modelación y simulación del tratamiento anaerobio de los efluentes industriales de matadero en un reactor UASB." *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y de Recursos Naturales* 3.1 67-80.
- [38] Ramirez, I. et al. (2009): "Modeling microbial diversity in anaerobic digestion through an extended ADM1 model." *Water research* 43.11 2787-2800.
- [39] Fezzani, B., and Ridha Ben Cheikh. (2009): "Extension of the anaerobic digestion model No. 1 (ADM1) to include phenolic compounds biodegradation processes for the simulation of anaerobic co-digestion of olive mill wastes at thermophilic temperature." *Journal of hazardous Materials* 162.2-3 1563-1570.
- [40] Boltes, K., Leton P. and Garcia-Calvo E. (2008): "Volatile fatty acid anaerobic degradation: Kinetic modeling with an inoculum under controlled conditions." *Industrial & Engineering Chemistry Research* 47.15 5337-5345.

- [41] Silva, F., et al. (2009): "Modelling of anaerobic treatment of evaporator condensate (EC) from a sulphite pulp mill using the IWA anaerobic digestion model no. 1 (ADM1)." *Chemical Engineering Journal* 148.2-3 319-326.
- [42] Batstone, DJ., and Keller, J. (2003). "Industrial applications of the IWA anaerobic digestion model No. 1 (ADM1)." *Water science and technology* 47.12:199-206.
- [43] Rivera-Salvador, V. et al. "El Modelo de Digestión Anaeróbica IWA-ADM1: una revisión de su evolución." *Ingeniería Agrícola y Biosistemas* 1.2: 109-118.
- [44] Abbassi-Guendouz, A. et al. (2009)"Total solids content drives high solid anaerobic digestion via mass transfer limitation." *Biore-source technology* 111 (2012): 55-61.
- [45] Mata-Alvarez, J. et al. (2011)"Codigestion of solid wastes: a review of its uses and perspectives including modeling." *Critical reviews in biotechnology* 31.2: 99-111.
- [46] Batstone, Damien J., et al. (2015)"Mathematical modelling of anaerobic digestion processes: applications and future needs." *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* 14.4: 595-613.
- [47] Batstone, DJ., and Virdis, B. (2014)"The role of anaerobic digestion in the emerging energy economy." *Current opinion in biotechnology* 27: 142-149.
- [48] Rodriguez-Freire, L. et al. (2014)"Biomine-ralization of arsenate to arsenic sulfides is greatly enhanced at mildly acidic conditions." *Water research* 66: 242-253.
- [49] Tijani, H., Abdullah, N., & Yuzir, A. (2015). Integration of microalgae biomass in biome-
thanation systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 1610–1622.