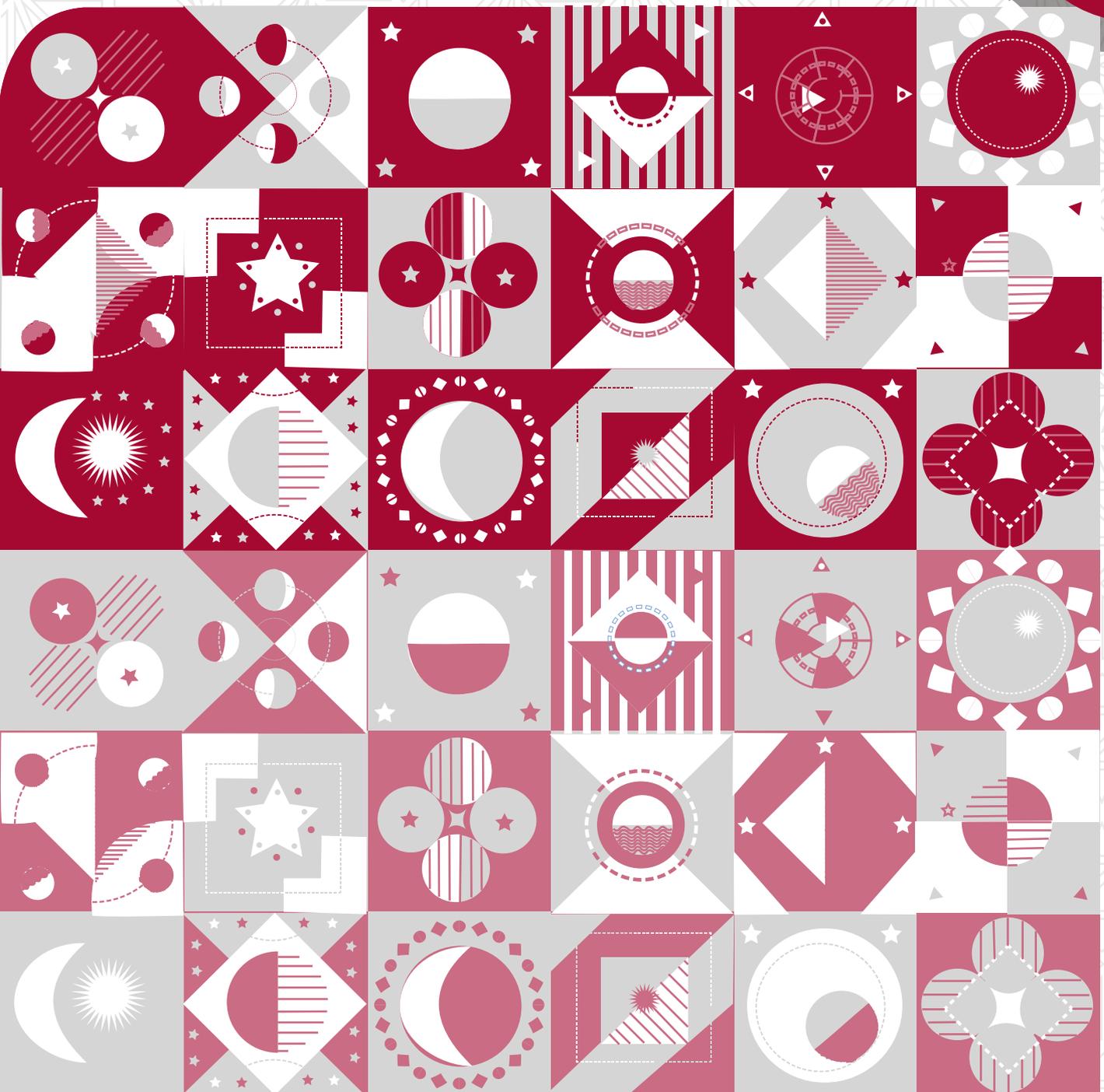


PERSPECTIVAS DE LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA

8



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA

VOLUMEN 5, NÚMERO 8

ENERO - JUNIO 2022



PERSPECTIVAS DE LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO



FACULTAD
DE INGENIERÍA



DIPFI
POSGRADO
INGENIERÍA

DIRECTORIO

Dra. Margarita Teresa de Jesús García Gasca
RECTORA

Dr. Javier Ávila Morales
SECRETARIO ACADÉMICO

M. Luis Alberto Fernández García
SECRETARIO PARTICULAR

Dr. Eduardo Núñez Rojas
SECRETARIO DE EXTENSIÓN Y CULTURA UNIVERSITARIA

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y POSGRADO

Dr. Manuel Toledano Ayala
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa
DIRECTOR DE LA DIVISIÓN DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Lic. Federico de la Vega Oviedo
DIRECTOR DEL FONDO EDITORIAL UNIVERSITARIO

M. Margarita Hernández Alvarado
COORDINADORA DE PUBLICACIONES PERIÓDICAS

Perspectivas de la Ciencia y la Tecnología, vol. 5, núm. 8, enero-junio, 2022, es una publicación semestral editada por la Universidad Autónoma de Querétaro, a través de la División de Investigación y Posgrado de la Facultad de Ingeniería. Centro Universitario, Cerro de las Campanas S/N, Las Campanas, Querétaro C. P. 76010, Querétaro. Tel. (442)1921200 ext. 6023. <http://revistas.uaq.mx/index.php/perspectivas>, perspectivasci@uaq.mx. Editor responsable: Juan Carlos Jáuregui Correa. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2021-081011485000-102, ISSN: en trámite, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número: Dirección del Fondo Editorial Universitario, Margarita Hernández Alvarado, Cerro de las Campanas S/N, Col. Las Campanas, C. P. 76010, Querétaro, Qro., fecha de última modificación: 28 de enero de 2022.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

QUEDA ESTRICTAMENTE PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DEL CONTENIDO E IMÁGENES DE LA PUBLICACIÓN SIN PLENA AUTORIZACIÓN DE LA UNIVERSIDAD.

DR. Manuel Toledano Ayala
DIRECCIÓN FACULTAD DE INGENIERÍA

DR. Juan Carlos Jáuregui Correa
DRA. Stephanie Virginia Camacho Gutiérrez
MC. Christopher Alexis Cedillo
MC. Alepth Hain Pacheco Estrada
EDITORES RESPONSABLES

MDI. Jorge Javier Cruz Florín
**COORDINADOR DEL DESPACHO DE PUBLICACIONES
FACULTAD DE INGENIERÍA**

Gabriel Jesús Tovar González
LAV. Cristian Emanuel Tovar Navarro
DISEÑO EDITORIAL

LEL. Daniela Pérez López
ING. Soid Lazlo Ruiz
CUIDADO DE LA EDICIÓN

LAV. Areli Arias Panchenko
DISEÑO DE PORTADA

COMITÉ EDITORIAL



CONTENIDO

10 **CONVERSIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS MEDIANTE UN ESQUEMA DE BIORREFINERÍA EN BIO-COMBUSTIBLES Y PRODUCTOS DE VALOR AGREGADO: PANORAMA Y PERSPECTIVAS**

Valeria Caltzontzin Rabell, Claudia Gutiérrez Antonio, Juan Fernando García Trejo, Ana Angélica Feregrino Pérez

18 **REVALORIZACIÓN DE RESIDUOS PARA LA GENERACIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS Y SÓLIDOS**

Luis Antonio Rodríguez Romero, Claudia Gutiérrez Antonio, Juan Fernando García Trejo, Ana Angélica Feregrino Pérez

30 **REVISIÓN: ALIMENTACIÓN NO TRADICIONAL PARA MEJORAR EL RENDIMIENTO DEL CRECIMIENTO DE PECES EN CONDICIÓN SUB Y SUPRA-ÓPTIMA DE TEMPERATURA**

Julieta Sánchez Velázquez, Guillermo Abraham Peña Herrejón, Jesús Josafat de León Ramírez y Juan Fernando García Trejo

44 **COMPARACIÓN DE MÉTODOS PARA LA PREDICCIÓN DE ESTRUCTURAS SECUNDARIAS DE ARN MINIMIZANDO LA ENERGÍA LIBRE**

Pedro Ayala Elizarraraz, Arturo González Gutiérrez, Rolando Tenoch Bárcenas Luna

56 **DIAGNÓSTICO DEL DESBALANCEO DE ROTOR SUJETO A FRICCIÓN CON GRÁFICOS DE RECURRENCIA**

Ignacio Torres Contreras, Juan Carlos Jáuregui Correa, Carlos Santiago López Cajún, Salvador Echeverría Villagómez

70 **ÁREAS DE OPORTUNIDAD PARA LA ACTUALIZACIÓN DE VALORES CATASTRALES DE SUELO HABITACIONAL EN ZONAS URBANAS.**

Pablo Jesús Bueno Villegas, José Luis Alcántara Obregón, Verónica Leyva Picazo, Sandra Hernández López

82 **DE LA ARQUITECTURA SOSTENIBLE A LA ARQUITECTURA REGENERATIVA, UN CAMBIO DE PARADIGMA EN EL CONTEXTO MEXICANO**

Mónica Liliana Rodríguez Arellano, Carlos Cobreros Rodríguez

94 **CHARACTERIZATION AND CATALYTIC PERFORMANCE OF CO-MO-W SULFIDE CATALYST SUPPORTED ON EMS-15**

Mariana Carolina Guerrero Rivera, Rufino Nava Mendoza, José Santos Cruz

CONVERSIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS MEDIANTE UN ESQUEMA DE BIORREFINERÍA EN BIOCOMBUSTIBLES Y PRODUCTOS DE VALOR AGREGADO: PANORAMA Y PERSPECTIVAS

Conversion of organic waste through a biorefinery scheme into biofuels and
value-added products: overview and perspectives

Valeria Caltzontzin Rabell¹, Claudia Gutiérrez Antonio^{1*}, Juan Fernando García Trejo¹,
Ana Angélica Feregrino Pérez¹

¹Universidad Autónoma de Querétaro, Campus Amazcala

*Correo electrónico: claugtez@gmail.com

RESUMEN

La cantidad de residuos orgánicos desechados a nivel mundial aumenta de manera considerable cada año, y el manejo de estos desechos no sólo requiere de recursos económicos, sino que genera gases de efecto invernadero que impactan el ambiente negativamente. Una tecnología emergente que permite la revalorización de estos residuos orgánicos es la biorrefinería, que se alinea con el concepto de economía circular y de la cual se obtienen biocombustibles y productos de valor agregado. En este trabajo se realiza una revisión de las biorrefinerías propuestas para la conversión de residuos orgánicos, además, se destacan la materia prima utilizada y los productos generados, así como la realización de diversos estudios de viabilidad. Como conclusión, se afirma que aún son necesarios estudios más detallados para evaluar los beneficios de su aplicación y que la selección de los procesos de conversión es de vital importancia para la obtención óptima de los productos

PALABRAS CLAVE: BIO, revalorización, residuos orgánicos, biorrefinería, biocombustibles, productos de valor agregado.

ABSTRACT

The amount of organic waste generated worldwide is increasing considerably every year, and not only does the disposal of this waste require economic resources, but also creates greenhouse gases that negatively impact the environment. An emerging technology that is aligned with the concept of circular economy and allows the revaluation of these organic wastes is the biorefinery, from which biofuels and value-added products are obtained. Thus, in this work a review of the proposed biorefineries for the conversion of organic waste is carried out, which highlights the feedstock used and the generated products, as well as conducting feasibility studies. It is concluded that more detailed studies are still required to evaluate the benefits of its application, and that the selection of conversion processes is important for the optimal obtaining of products.

KEYWORDS: BIO, revalorization, organic wastes, biorefinery, biofuels, value-added products.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con la Organización para la Alimentación y la Agricultura de las Naciones Unidas (FAO), un tercio de los alimentos que se producen a nivel mundial se

desechan anualmente [1]; esto representa aproximadamente 1300 millones de toneladas, por lo que su manejo resulta de gran interés social y ambiental, además de económico.

En el aspecto social, el manejo de estos residuos desde su traslado hasta su tratamiento posibilita la generación de empleos. En el aspecto ambiental, dos de las estrategias actuales para el manejo de residuos son su disposición en rellenos sanitarios e incineración. No obstante, cuando los residuos llegan a los rellenos sanitarios, comienzan a descomponerse y liberan gases de efecto invernadero, como el metano y dióxido de carbono. El interés económico surge de la cantidad de recursos que se emplean en el manejo de estos residuos, ya que, aunque hay estrategias para su tratamiento, cada vez hay una mayor cantidad de ellos.

Las pérdidas y los residuos alimenticios representan 680 000 millones de dólares en los países industrializados y 310 000 millones en países en desarrollo; dicha estimación proviene de la generación de residuos por habitante: en América del Norte y Europa oscila entre 95 y 115 kg/año, mientras que en África y Asia sólo se generan entre 6 y 11 kg/año [2]. Por ello, la revalorización de los residuos orgánicos se ha convertido en una estrategia interesante que posibilita resolver el problema del manejo de los residuos y, al mismo tiempo, generar nuevos productos, entre los cuales se encuentran algunos biocombustibles y químicos, así como productos de valor agregado. La gran demanda de tales mercancías está forzando a cambiar la actual economía lineal a una economía circular. La economía circular permitiría aprovechar los residuos que en una economía lineal se descartarían, para integrarlos nuevamente en la cadena de producción; así se disminuirá la brecha entre sustentabilidad ambiental y crecimiento económico [3].

En México se producen anualmente aproximadamente 76 millones de toneladas de residuos orgánicos, de las cuales el 79 % provienen de la agricultura y el otro 21 % de la agroindustria [4]. Estos datos evidencian la necesidad de impulsar la investigación que permita reducir la contaminación que estos residuos generan y obtener nuevos productos que brinden beneficios económicos. Es aquí donde el concepto de biorrefinería cobra relevancia, ya que se encuentra alineado con la economía circular.

Una biorrefinería se define como una instalación en la cual se puede obtener energía y diversos productos de valor agregado a partir de biomasa [5]. Las biorrefinerías pueden clasificarse según los productos que generen, los procesos que requieran o la materia prima que utilicen. Respecto a esta última clasificación,



la biomasa o materia prima se ordena por generaciones: la primera generación abarca biomásas agrícolas o alimenticias, las cuales consisten principalmente de semillas o granos con alto contenido de azúcares, almidones o aceites; estas biomásas pueden tratarse sin procesos especializados o costosos [6], [7]. Sin embargo, la principal desventaja es que esta rama compite directamente con la nutrición humana, lo cual genera otros problemas, como deforestación y uso de agua, e impacta en el ambiente y los costos de producción. Por otra parte, en la segunda generación se encuentra principalmente la biomasa lignocelulósica —residuos agroindustriales, alimenticios, agrícolas o maderas—. Esta biomasa no compite con la nutrición humana, pero su tratamiento para la obtención de residuos requiere más inversión [8]; algunos de los productos que pueden obtenerse incluyen biocombustibles y derivados de lignina [9]. Finalmente, la biomasa de tercera generación incluye organismos genéticamente modificados para obtener un mejor crecimiento, o bien una producción máxima de aceites o azúcares; también incluye microalgas, que no requieren tierra cultivable y de las cuales se pueden obtener nutraceuticos, fertilizantes orgánicos, alimentos y biocombustibles [3], [7], [8], [10].

Como se mencionó anteriormente, una biorrefinería puede utilizar diferentes tipos de biomasa y, aunque se han propuesto diferentes materias primas de primera generación, actualmente se busca el aprovechamiento de residuos orgánicos [11]. Entonces, una biorrefinería de residuos orgánicos promete lograr una ruta sostenible con bajo impacto ambiental [3]. Por lo tanto, en el presente trabajo se revisan las biorrefinerías que han sido propuestas para la conversión de residuos orgánicos, señalando los productos obtenidos; asimismo, se provee un panorama general del potencial de esta tecnología y sus beneficios, además de las perspectivas de la misma.

PRODUCTOS DE BIORREFINERÍAS DE RESIDUOS ORGÁNICOS

RESIDUOS DEL ACEITE DE OLIVA

El procesamiento de las aceitunas para obtener aceite de oliva genera agua residual que no puede ser reutilizada y debe tratarse previo a su desecho. Esta agua residual pasa por diferentes tratamientos que permiten disminuir su demanda biológica y química de oxígeno; mientras más alta sea esta demanda, menor será su biodegradabilidad. Se sabe que tan sólo en países mediterráneos se producen más de 3×10^{10}

litros de agua residual durante la temporada de cosecha y procesamiento, la cual tiene una duración de hasta 60 días. Por ello, se ha propuesto utilizar este residuo para obtener diversos productos como biogás, celulosa, microalgas, ácidos grasos volátiles, biohidrógeno, bioetanol, lipasas y polifenoles. Aunque se analizó el proceso de producción de estos productos, no se reporta un análisis económico [12].

De la misma manera, se aborda la posible revalorización de residuos agroindustriales derivados del procesamiento para obtener aceite de oliva. Anualmente se producen alrededor de 12 millones de toneladas de aceitunas, de las cuales 3.6 millones quedan como residuo sólido; a partir de éste se propone obtener productos como vapor, energía calorífica, resinas, polímeros, compuestos aromáticos, fibras de carbón, etanol, oligosacáridos, proteínas, azúcares, fenoles, fertilizante, biogás, entre otros. Los autores concluyen que mientras más materias primas se tengan, más productos pueden obtenerse. Además, se requiere una investigación que permita optimizar, escalar e integrar los procesos propuestos [13].

RESIDUOS DEL PROCESAMIENTO DE TAPIOCA

Los residuos generados por el proceso de conversión de la tapioca en harina y almidones no son aprovechados, lo que genera contaminación y malos olores cuando son desechados. Un promedio de 5.15 millones de toneladas de residuos de tapioca son generados anualmente, por lo que su manejo resulta complicado. Así, se plantea una solución a este problema mediante su aprovechamiento para la obtención de productos como bioetanol, biometano, biohidrógeno, ácidos grasos volátiles, ácido cítrico, láctico y succínico [14]. Los autores mencionan que la generación de bioetanol es factible desde el punto de vista técnico, pero no es rentable debido al alto costo de inversión en agua y tecnología requeridos.

Ahora bien, el biometano y biohidrógeno pueden proveer calor para la planta por medio de la digestión anaeróbica; sin embargo, se requiere disminuir los sólidos suspendidos para aumentar su producción. Es importante mencionar que el ácido succínico obtenido tendría un menor precio, debido al uso de residuos para su generación. Finalmente, los autores concluyen que aún se requiere un análisis económico más profundo para conocer si el proyecto sería o no viable.

Anualmente se generan hasta 20 metros cúbicos de agua residual por tonelada de tapioca procesada, lo que implica una oportunidad para su uso. En otro trabajo se aborda el uso de este mismo residuo además

de agua residual para la obtención de bioetanol, biogás, ácido succínico y jarabe de glucosa [15]. En dicho estudio se simularon escenarios con diferentes procesos, residuos y productos obtenidos. Asimismo, se realizó un análisis técnico y económico para observar su viabilidad; se concluyó que generar todos los productos demandaría el doble de energía que si sólo se obtuviera biogás, y esto sería suficiente para operar la biorrefinería.

RESIDUOS DEL PROCESAMIENTO DE JENGIBRE

En [16] se describe la revalorización de residuos de jengibre obtenidos después de su procesamiento para hacer bebidas o medicinas herbales. En 2016 se produjeron alrededor de 3.3 millones de toneladas de jengibre a nivel mundial, pero sólo se aprovecha el 10 % de su peso en seco, generando una gran cantidad de sólidos no aprovechables. El destino final de dichos residuos es la incineración y los vertederos, o son usados como alimento de bajo valor nutricional para animales, por lo que su uso dentro de un esquema de biorrefinería para explorar la recuperación de recursos resulta interesante. Los productos de dicha revalorización son bioaceite, carbón, almidón, celulosa e hidrolizados. El aceite extraído, además de su potencial para la obtención de biodiésel, contiene moléculas encontradas en el aceite de jengibre comercial, lo que genera una oportunidad inmediata de valorización. Los procesos se llevaron a cabo en escala laboratorio y se probó su viabilidad. Sin embargo, se requieren análisis económicos y ambientales para complementar los resultados obtenidos.

RESIDUOS DE PALMA

Los residuos lignocelulósicos, como las hojas de palma, podrían ser utilizados en un esquema de biorrefinería para la generación de productos de valor agregado como bioetanol, carbón activado, fertilizante o fibras naturales, utilizadas como sustituto de la fibra de vidrio actual. Se estima que se producen anualmente alrededor de 6 millones de toneladas de residuos de hoja de palma, las cuales son quemadas y/o desechadas, por lo que su aprovechamiento dentro de un esquema de biorrefinería contribuye a disminuir la contaminación que generan [17].

RESIDUOS AGRÍCOLAS Y GANADEROS

En [18] se examinó la idea de una biorrefinería de diferentes materias primas, con la finalidad de ser sustentable y evitar problemas de abastecimiento. A ni-

vel mundial se producen anualmente alrededor de 140 mil millones de toneladas de biomasa proveniente del sector agrícola, las cuales pueden ser utilizadas como materia prima para así dar una solución al problema de abastecimiento. Como materias primas se propusieron cultivos de algodón, arroz, caña de azúcar, tabaco, naranja, soya, maíz, trigo y estiércol de pollo, bovinos y cerdos, ya que, tan sólo en China, se generan al año 3 190 millones de toneladas de estiércol, lo cual puede representar otra oportunidad de aprovechamiento.

Como productos a generar por los cultivos se sugirieron: bioetanol, biogás, electricidad, calor, biodiésel y fertilizantes. Por otra parte, los autores concluyeron que se podían hidrolizar y obtener aminoácidos, ácidos grasos insaturados, aceites, polisacáridos, hidrógeno y metano del estiércol.

Finalmente, se evaluó de manera teórica la biorrefinería, y se sugiere que se haga un análisis técnico, económico y social para corroborar su viabilidad.

En otro artículo, ver [19], mencionan que solamente el 20 % de los residuos agrícolas y ganaderos se tratan, lo que genera problemas de contaminación.

Por ello, se propone que se utilicen en un esquema de biorrefinerías para producir metano y polímeros. Sin embargo, se requieren más investigaciones sobre el tema, además de apoyos gubernamentales para que los productores accedan a estas tecnologías y puedan utilizarlas.

Otra propuesta reportada, ver [20], describe el problema de los residuos agrícolas y ganaderos, y plantea su conversión en biogás y fertilizante, lo cual podría beneficiar a los productores según lo calculado.

RESIDUOS DEL PROCESAMIENTO DE MANGO

India es el principal productor de mango a nivel mundial, y exporta la fruta completa o procesada. El procesamiento del mango genera diferentes residuos, como cáscaras y semillas, las cuales ascienden hasta entre 43 000 y 86 000 toneladas. El interés para que estos residuos sean utilizados como materia prima en una biorrefinería surge de la necesidad de recursos disponibles que se generen en una gran cantidad. El mango es una fruta que se produce en cantidades industriales y que origina una gran cantidad de residuos, ya que sólo se aprovecha de un 60 a 75 %, por lo que cumple con este requisito. Estos residuos pueden ser aprovechados para extraer productos como polifenoles, pectina, aceite (que puede utilizarse para obtener biodiésel), proteínas y almidón, en vez de ser utilizados en composta. Cada uno de los procesos necesarios para la obtención de estos productos fueron probados a escala laboratorio, ver [21]. Con base en



estos datos se hicieron simulaciones para encontrar la recuperación óptima de producto.

14 RESIDUOS DE FIDEOS

Respecto a alimentos como los fideos, se generan anualmente 30 000 toneladas de residuos sólo en la India (ya sean efluentes o productos desechados). Dichos residuos contaminan el medio ambiente debido a su actual tratamiento, que consiste en desecho o incineración. En [22] se propone utilizarlos para generar productos como biodiésel, bioetanol o microalgas. Asimismo, se sugiere realizar más investigaciones para poder desarrollar la tecnología necesaria, así como la logística de la recolección de la materia prima.

RESIDUOS DEL PROCESAMIENTO DEL AGAVE

Después del procesamiento del agave para obtener el ixtle se genera un residuo llamado "guishe", el cual se incinera o tira sin otro tratamiento. En México se producen anualmente 147 178 toneladas de este residuo. Así, en un estudio se propone el aprovechamiento del "guishe" para obtener saponinas, fitoquímicos, syngas, biocarbón, bioetanol, biogás y enriquecedores de suelo; cabe mencionar que estos productos fueron obtenidos en escala laboratorio. Aunque los resultados muestran que su uso dentro de una biorrefinería puede ser viable, es importante realizar estudios económicos para determinar si es posible recuperar una mayor cantidad de productos [23].

RESIDUOS LÁCTEOS

En un trabajo reportado, ver [24], se propuso la conversión de los residuos lácteos mediante un esquema de biorrefinería para revalorizarlos; éstos representan un problema, ya que, contando únicamente en Europa, anualmente se generan aproximadamente 29 millones de toneladas de residuos.

Entre los productos propuestos se encuentran el ácido láctico, galactooligosacáridos, bioetanol, biohidrógeno, biometano y bioplásticos. No obstante, se sugiere realizar más análisis para mejorar esta tecnología, ya que permite crear un ciclo donde no existan residuos.

RESIDUOS DEL PROCESAMIENTO DE NARANJA

Diversos autores abordan el tema de los residuos del procesamiento de las naranjas. La naranja es una de las frutas más cultivadas a nivel mundial, con aproxi-

madamente 70.2 millones de toneladas y, de la producción total, el 50 % se utiliza para extraer jugo de naranja, lo que genera una gran cantidad de residuos que consisten principalmente en cáscaras, de las cuales pueden obtenerse productos como la pectina, biogás y ácido mícico. Se evaluaron a escala laboratorio los procesos de conversión de estos residuos a los productos previamente mencionados, bajo un esquema de biorrefinería y se simularon después para evaluarlos. Aunque se lograron obtener los productos, aún se requieren propuestas para aumentar su rendimiento; especialmente, si se logran escalar, se podrían obtener beneficios económicos y ambientales [25].

Otra propuesta plantea obtener productos como aceites esenciales, pectina, ácido succínico y fertilizante bajo el concepto de una biorrefinería de cáscaras de naranja. Los procesos de obtención de dichos productos se probaron a escala laboratorio y, aunque dichos procesos parecen viables, aún se requiere hacer más investigación al respecto, principalmente del fertilizante y su aplicación en plantas [26]. En otro artículo [27] se describe el desarrollo de una biorrefinería con residuos del procesamiento de la naranja para producir azúcares, antioxidantes, aceites esenciales, pectina y celulosa bacteriana. Los autores concluyen que se requieren más estudios para evaluar la biorrefinería propuesta, enfocándose en su optimización para extraer los compuestos de valor agregado. Se requiere además un análisis económico y de la técnica para asegurar su viabilidad.

RESIDUOS LÁCTEOS Y DEL PROCESAMIENTO DEL TEQUILA

Un artículo, ver [28], propone el uso de los desechos de la producción de quesos y tequila para ser usados como materias primas en un esquema de biorrefinería. En esta región del oeste de México, se generan por día alrededor de 100 toneladas de residuos lácteos y 3 900 toneladas de bagazo. Entonces, se propone una biorrefinería que utilice una mezcla de ambos residuos, así como paja de trigo para producir bioetanol, biohidrógeno, ácidos acético y butírico y biogás. Gracias a simulaciones realizadas, se observa que la energía producida podría cubrir la demanda. Se concluye que la mezcla de biomásas aumenta la productividad y los beneficios económicos y ambientales.

RESIDUOS MUNICIPALES Y ALIMENTICIOS

Respecto a los residuos municipales, se desechan en la Unión Europea alrededor de 89 y 100 millones de toneladas anuales, es por ello que su revalorización se

ha abordado en diversos estudios [29]. En una nueva propuesta, ver [29], se explica que se pueden obtener nuevas materias si utilizamos insectos para el tratamiento de residuos. Así, sería posible obtener productos como proteína, biodiésel y quitina; sin embargo, se requieren más estudios y legislación para el uso de esta novedosa tecnología.

En cuanto a los residuos alimenticios, existen diversos autores que han revisado la obtención de productos de valor agregado a partir de ellos, ya que, como se mencionó previamente, esto representa aproximadamente 1 300 millones de toneladas. Es importante recordar que, dependiendo de la composición de los residuos y procesos utilizados, serán los productos generados. Sin embargo, se ha reportado de manera general que pueden obtenerse los siguientes productos: azúcares, biohidrógeno, biometano, ácidos grasos volátiles, ácidos grasos de cadena media, bioetanol, biobutanol, biodiésel, biopolímeros y fertilizantes [3].

[30] describe una propuesta para la generación de ácido láctico, fertilizante y bioetanol. En dicho estudio se realizaron simulaciones basadas en datos experimentales, y se concluyó que, además de obtener los productos, se reducen los residuos y se tiene un beneficio económico. Un nuevo acercamiento propuesto, ver [31], menciona el uso de insectos para tratar los residuos orgánicos generados en los mercados; dichos residuos incluyen aquellos de frutas y vegetales, ya que generan beneficios ambientales además de productos. Los autores mencionan que aún falta información respecto a seguridad humana y ética para el bienestar animal para ayudar a complementar los resultados obtenidos.

BENEFICIOS ECONÓMICOS Y AMBIENTALES DE LAS BIORREFINERÍAS DE RESIDUOS ORGÁNICOS

Desde el punto de vista técnico, la obtención de productos de valor agregado a partir de residuos orgánicos en un esquema de biorrefinería es posible. Sin embargo, es importante saber si los beneficios económicos y ambientales compensan la tecnología propuesta.

El uso de las biorrefinerías podría reducir el negativo impacto ambiental que los residuos tienen, ya que se aprovechan los efluentes generados al integrar diferentes procesos para obtener una recuperación máxima de productos [3]. Además, las biorrefinerías permiten reutilizar la biomasa y disminuir así la huella de carbono que, de otra manera, terminaría generándose por la quema o entierro de ésta, disminuyendo a su vez su tiempo de degradación. Asimismo, posibilitan generar biocombustibles que sustituyan parcialmen-

te a los combustibles fósiles. Por último, se crearían empleos que permitirían integrar cadenas agrícolas e industriales, lo que promovería una economía de tipo-circular [11], [32].

Así, una economía circular promete ser una economía sustentable que se basa en reciclar o reutilizar los residuos de manera integral; lo anterior con el objetivo de minimizarlos, eliminando también el concepto de "vida útil" de un producto. Las biorrefinerías reflejan los objetivos de esta economía, produciendo nuevos químicos y biocombustibles, reduciendo la generación de gases de efecto invernadero y creando nuevas oportunidades de negocio [11]. Es importante resaltar que el potencial económico dependerá de la eficiencia de las estrategias de conversión utilizadas, la materia prima y los productos a generarse.

Respecto a la producción de biocombustibles, se considera necesaria la integración de procesos dentro de una biorrefinería para hacerla rentable; de esta manera se reducen costos al escalar el proceso. Sin embargo, los obstáculos que aún existen se relacionan con el incremento de la conversión y selectividad de los procesos de producción [4].

Entonces, la investigación respecto al uso de residuos en biorrefinerías debería enfocarse en el análisis de la composición de residuos específicos, así como el aislamiento de compuestos por medio del pretratamiento; lo anterior con el objetivo de que se aumente la productividad y se simplifiquen los procesos utilizados. Finalmente, se sugiere realizar una evaluación de la viabilidad a escala laboratorio como primer paso para poder escalar el proceso, además de estudios adicionales sobre el desarrollo de procesos, su optimización y la calidad de los productos obtenidos [8].

Cabe añadir que un proceso que no se ha evaluado en un esquema de biorrefinería de manera técnica, ambiental o económica es el tratamiento con insectos. Este tratamiento promete una alta eficiencia de conversión, así como una amplia variedad de los productos que se podrían generar.

Con base en lo anterior, se sugiere el uso y análisis detallado de insectos como tratamiento biológico en un esquema de biorrefinería con el objetivo de optimizarla y acercarla aún más al concepto de economía circular por medio de la reevaluación revalorización de residuos orgánicos.

CONCLUSIONES

En el presente artículo se revisaron los productos generados o propuestos en diferentes biorrefinerías. La mayoría de los artículos reportados hacen análisis de



viabilidad con datos experimentales; sin embargo, hacen falta análisis económicos y ambientales de las propuestas para determinar si una biorrefinería será sustentable en todos los aspectos. Existen beneficios ambientales al hacer uso de esta tecnología: la reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero y la revalorización de los residuos. Además, en las biorrefinerías es posible generar biocombustibles, productos de valor agregado y bioenergía. En el aspecto económico, los beneficios se basan en el aprovechamiento de la energía obtenida en los procesos de conversión, además de la venta de los otros productos. El objetivo en este caso es el desarrollo de mejores procesos de conversión, ya que los productos generados y su calidad dependen de la biomasa y los procesos de conversión seleccionados. Por lo que se requiere de análisis más detallados que permitan evaluar cada biorrefinería propuesta.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y a la Universidad Autónoma de Querétaro por su apoyo durante la investigación.

REFERENCIAS

[1] FAO. (2011) Global food losses and food waste – Extent, causes and prevention. [Online]. Available: <http://www.fao.org/3/a-i2697e.pdf>

[2] CCA. Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal. "Caracterización y gestión de los residuos orgánicos en América del Norte, informe sintético", 52 pp. 2017.

[3] S. Dahiya, A. N. Kumar, J. Shanthi Sravan, S. Chatterjee, O. Sarkar and S.V. Mohan, "Food waste biorefinery: Sustainable strategy for circular bioeconomy". *Bioresource Technology*, vol. 248, pp. 2–12, 2018.

[4] D. Carrillo-Nieves, M.J. Rostro Alaní, R. de la Cruz Quiroz, H.A. Ruiz, H.M.N. Iqbal and R. Parra-Saldívar, "Current status and future trends of bioethanol production from agro-industrial wastes in Mexico". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 102, pp. 63–74, 2019.

[5] G. B. Sperandio and E. X. Ferreira Filho, "Fungal co-cultures in the lignocellulosic biorefinery context: A review". *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol.142, pp. 109–123, 2019.

[6] M. Demirbas Fatih M, "Biorefineries for biofuel upgrading: a critical review". *Applied Energy*, vol. 86, pp. S151–61, 2009.

[7] C. Gutierrez-Antonio, F. I. Gómez-Castro, J.A. de Lira-Flores and S. Hernández, "A review on the produc-

tion processes of renewable jet fuel". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 79, pp. 709-729, 2017.

[8] X. Yang, H.S. Choi, C. Park and S. W. Kim, "Current states and prospects of organic waste utilization for biorefineries". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 49, pp. 335–349, 2015.

[9] Ghatak Himadri-Roy, "Chemical Biorefineries from the perspective of sustainability: Feedstocks, products, and processes". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 4042–4052, 2011.

[10] C. G. Khoo, Y. K. Dasan, M. K. Lam and K. T. Lee, "Algae biorefinery: Review on a broad spectrum of downstream processes and products". *Bioresource Technology*, vol. 292, 121964, 2019.

[11] S. Venkata Mohan, S. Dahiya, K. Amulya, R. Katakajwala and T.K. Vanitha, "Can circular bioeconomy be fueled by waste biorefineries — A closer look". *Bioresource Technology Reports*, vol. 7, 100277, 2019.

[12] A. ElMekawy, L. Diels, L. Bertin, H. De Wever and D. Pant, "Potential biovalorization techniques for olive mill biorefinery wastewater". *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, vol. 8, pp. 283–293, 2014.

[13] M.J. Negro, P. Manzanares, E. Ruiz, E. Castro, M. Ballesteros, "The biorefinery concept for the industrial valorization of residues from olive oil industry" *Olive Mill Waste: Recent Advances for Sustainable Management*: Elsevier Inc., 2017.

[14] M. Zhang, L. Xie, Z. Yin, S.K. Khanal and Q. Zhou, "Biorefinery approach for cassava-based industrial wastes: Current status and opportunities". *Bioresource Technology*, vol. 215, pp. 50–62, 2016.

[15] R. K. Padi and A. Chimphango, "Feasibility of commercial waste biorefineries for cassava starch industries: Techno-economic assessment". *Bioresource Technology*, vol. 297, 122461, 2020.

[16] Y. Gao, M.Z. Ozel, T. Dugmore, A. Sulaeman and A.S. Matharu, "A biorefinery strategy for spent industrial ginger waste". *Journal of Hazardous Materials*, vol. 401, 123400, 2021.

[17] J. R. Bastidas-Oyanedel, C. Fang, S. Almardeai, U. Javid, A. Yousuf and J.E. Schmidt, "Waste biorefinery in arid/semi-arid regions". *Bioresource Technology*, vol. 215, pp. 21-28, 2016.

[18] T. Forster-Carneiro, M.D. Berni, I.L. Dorileo and M.A. Rostagno, "Biorefinery study of availability of agriculture residues and wastes for integrated biorefineries in Brazil". *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 77, pp. 78–88, 2013.

[19] M. K. Awasthi, S. Sarsaiya, S. Wainaina, K. Rajendran, S. Kumar and W. Quan, "A critical review of organic manure biorefinery models toward sustainable circular bioeconomy: Technological challenges, advan-

cements, innovations, and future perspectives". *Renewable and Sustainable Energy*, vol. 111, pp. 115–131, 2019.

[20] O. Silván-Hernández, F. De la Cruz-Burelo, M. Macías-Valadez and L. Pampillón-González, "Theoretical and technical biomass resource assessment from swine and cattle manure in Tabasco: A case study in southeast Mexico". *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 23, pp. 83–92, 2017.

[21] A. Arora, J. Banerjee, R. Vijayaraghavan, D. MacFarlane and A. F. Patti, "Process design and techno-economic analysis of an integrated mango processing waste biorefinery". *Industrial Crops and Products*, vol. 116, pp. 24–34, 2018.

[22] S.K. Karmee, "Noodle waste based biorefinery: an approach to address fuel, waste management and sustainability". *Biofuels*, vol. 9, pp. 395–404, 2018.

[23] L. Díaz-Jiménez, S. Carlos-Hernandez, D. Jasso de Rodríguez and R. Rodríguez-García, "Conceptualization of a biorefinery for guishe revalorization". *Industrial Crops and Products*, vol. 138, 111441., 2019.

[24] R. Chandra, C. Castillo-Zacarias, P. Delgado and R. Parra-Saldívar, "A biorefinery approach for dairy wastewater treatment and product recovery towards establishing a biorefinery complexity index". *Journal of Cleaner Production*, vol. 183, pp. 1184–1196, 2018.

[25] M. Ortiz-Sanchez, J.C. Solarte-Toro, J. A. González-Aguirre, K.E. Peltonen, P. Richard and C.A. Cardona Alzate, "Pre-feasibility analysis of the production of mucic acid from orange peel waste under the biorefinery concept". *Biochemical Engineering Journal*, vol. 161, 2020.

[26] M. Patsalou, A. Chrysargyris, N. Tzortzakis and M. A. Koutinas, "A biorefinery for conversion of citrus peel waste into essential oils, pectin, fertilizer and succinic acid via different fermentation strategies". *Waste Management*, vol. 113, pp. 469–477, 2020.

[27] E. Tsouko, S. Maina, D. Ladakis, I.K. Kookos and A. Koutinas, "Integrated biorefinery development for the extraction of value-added components and bacterial cellulose production from orange peel waste streams". *Renewable Energy*, vol. 160, pp. 944–954, 2020.

[28] A. Sanchez, G. Magaña, M.I. Partida and S. Sanchez, "Bi-dimensional sustainability analysis of a multifeed biorefinery design for biofuels co-production from lignocellulosic residues and agro-industrial wastes". *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 107, pp. 195–217, 2016.

[29] F. Giroto and R. Cossu, "Role of animals in waste management with a focus on invertebrates' biorefinery: An overview". *Environmental Development*, vol. 32, 2019.

[30] F. Demichelis, S. Fiore, D. Pleissner and J. Venus,

"Technical and economic assessment of food waste valorization through a biorefinery chain". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 94, pp. 38–48, 2018.

[31] S. Cappellozza, M. G. Leonardi, S. Savoldelli, D. Carminati, A. Rizzolo and G. Cortellino G, "A first attempt to produce proteins from insects by means of a circular economy". *Animals*, vol. 9, pp.1–24, 2019.

[32] A. S. Nizami, M. Rehan, M. Waqas, M. Naqvi, O. K. M. Ouda and K. Shahzad K, "Waste biorefineries: Enabling circular economies in developing countries". *Bioresource Technology*, vol. 241, pp. 1101–1117, 2017

REVALORIZACIÓN DE RESIDUOS PARA LA GENERACIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS Y SÓLIDOS

Revaluation of waste for the generation of liquid and solid biofuels

Luis Antonio Rodríguez Romero¹, Claudia Gutiérrez Antonio^{1*},
Juan Fernando García Trejo¹, Ana Angélica Feregrino Pérez¹

¹Universidad Autónoma de Querétaro

*Correo electrónico: claugtez@gmail.com

RESUMEN

El declive en la producción de los pozos petroleros, así como el problema del cambio climático han impulsado la búsqueda de fuentes alternas de energía como la biomasa, que tiene gran potencial, ya que puede convertirse en energía (eléctrica y calorífica) y biocombustibles (que pueden encontrarse en estado gaseoso, líquido y sólido). Usualmente diferentes fracciones de la biomasa son transformadas en un biocombustible específico; por ejemplo, los aceites se transforman en biodiésel y bioturbosina, mientras que la biomasa lignocelulósica se emplea para elaborar pellets combustibles. No obstante, tanto los líquidos como los sólidos pueden obtenerse del aprovechamiento integral de una materia prima, lo que permite incrementar la rentabilidad de los procesos y reducir los residuos derivados de la producción de biocombustibles. En el presente trabajo, se realiza una revisión de los procesos de producción de biocombustibles líquidos y sólidos con el objetivo de identificar oportunidades para el aprovechamiento integral de las biomásas.

PALABRAS CLAVE: ENE, biomasa, energía renovable, biocombustible, pellets, poder calorífico.

ABSTRACT

The decline in the production of oil wells, as well as the problem of climate change has driven the search for alternative sources of energy; among them, biomass has great potential as it can be converted into energy (electricity and heat) and biofuels. Biofuels can be found in a gaseous, liquid and solid state. Usually different fractions of biomass are transformed into a specific biofuel; for example, oils are transformed into biodiesel and bioturbosine, while lignocellulosic biomass is used to produce fuel pellets. However, liquid and solid biofuels can be obtained from the integral use of a raw material; this increases the profitability of the processes and reduces the waste derived from the production of biofuels. In the present work, a review of liquid and solid biofuel production processes is carried out with the objective of identifying opportunities for the integral use of biomasses.

KEYWORDS: ENE, biomass, renewable energy, biofuel, pellets, calorific value.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la generación de energía eléctrica y/o calorífica proviene de los combustibles fósiles, principalmente petróleo, carbón y gas natural. En 2019, el 81 % de la producción mundial de energía se generó a partir de la quema de combustibles fósiles, siendo el petróleo la fuente más usada [1]. En particular, en México, durante el primer semestre de 2018 el 75.88 % de la generación de energía eléctrica se derivó de la quema de combustibles fósiles [2]. Como resultado, el uso excesivo de tales combustibles ha originado problemas de contaminación y cambio climático; en especial, la liberación a la atmósfera de una gran cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero, en su mayoría dióxido de carbono (CO_2). Por ejemplo, en el año 2016 se produjeron 33 963 millones de toneladas de CO_2 derivadas de la quema de carbón (44 %), petróleo (33 %), y gas natural (23 %) [3]. La acumulación de las emisiones de CO_2 ha generado un incremento de la temperatura terrestre, la cual está asociada con los cambios climáticos. Por ello, uno de los grandes retos en materia energética es encontrar fuentes de energías alternativas de menor impacto ambiental que los combustibles fósiles; cabe mencionar que la producción de dichos combustibles fósiles se encuentra en declive, por lo que las nuevas fuentes de energía deben ser tanto renovables como competitivas económicamente.

La Ley de Transición Energética en México define a las energías renovables como aquellas cuya fuente reside en fenómenos de la naturaleza, en procesos o materiales susceptibles de ser transformados en energía aprovechable por el ser humano; dichas fuentes se regeneran naturalmente, por lo que se encuentran disponibles de forma continua o periódica, y no liberan emisiones contaminantes al ser empleadas [2]. Entre tales fuentes se encuentran la radiación solar (para generar energía calorífica o eléctrica), el flujo de viento (para generar energía eléctrica o mecánica), las corrientes de agua (para generar energía eléctrica), o el calor del subsuelo (para generar energía eléctrica o calorífica). Otro tipo de recurso natural es la biomasa, que se define como la materia orgánica que se origina y se acumula durante procesos biológicos, como la fotosíntesis [4]. A partir de la biomasa pueden producirse energía eléctrica, calorífica y biocombustibles. Existen diferentes tipos de biomasa, como la agrícola, forestal, de cultivos energéticos, industrial y residual (Fig. 1) y, en general, su composición será lo que definirá los productos que pueden obtenerse de ella.

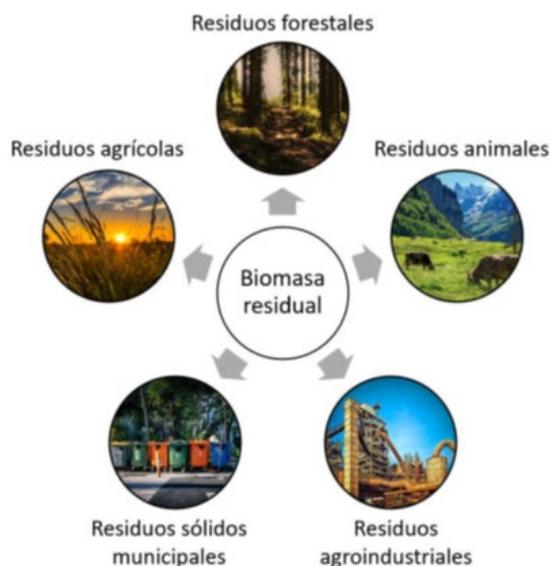


Figura 1. Tipos de biomasa residual

Como se mencionó anteriormente, los biocombustibles se pueden generar a partir de la conversión de la biomasa mediante diferentes procesos de conversión, y se pueden clasificar con base en la materia prima empleada y el proceso de producción en aquellos de primera, segunda, tercera y cuarta generación; a continuación, se proporciona información al respecto de dichas generaciones.

Los biocombustibles de primera generación son todos aquellos producidos a partir de biomasa comestible, como trigo, cebada, maíz y caña de azúcar, así como remolacha azucarera. Estos se generan mediante procesos tanto bioquímicos como químicos, y cumplen con las especificaciones técnicas para su uso; sin embargo, el uso de materias primas comestibles para su producción causó preocupación sobre la seguridad alimentaria, así como los potenciales efectos en la biodiversidad y el uso de las tierras [4]. Por otra parte, en la segunda generación, los biocombustibles se producen a partir de cultivos energéticos y residuos mediante procesos termoquímicos, bioquímicos y químicos. Los cultivos energéticos son especies que se siembran especialmente para generar biocombustibles; aunque éstos no compiten con la alimentación humana, sí lo hacen por tierras de cultivo. Algunos cultivos energéticos incluyen *Jatropha curcas*, higuera y salicornia, entre otros. Por otra parte, los residuos son aquellos materiales que ya no son de utilidad para el proceso que los generó, y usualmente representan problemas de contaminación por los elevados volúmenes en los que se generan. Entre los residuos se encuentran aquellos provenientes de los cultivos y forestales, así como del procesamiento de alimentos.

Ahora bien, los biocombustibles de tercera generación se producen a partir de diferentes microorga-

nismos, tales como las microalgas. En particular, la producción de biocombustibles a partir de biomasa microalgal puede realizarse mediante procesos bioquímicos o termoquímicos. Las microalgas poseen múltiples ventajas, tales como su alta tasa de crecimiento, elevado contenido de aceite y baja complejidad estructural; éstas potencian sus numerosas aplicaciones comerciales [5]. Finalmente, los biocombustibles de cuarta generación se elaboran a partir de microorganismos genéticamente modificados, tales como microalgas, levaduras, hongos y cianobacterias. En esta generación se utiliza la capacidad de los microorganismos para convertir el CO_2 en combustible a través de la fotosíntesis. Sin importar la generación a la cual pertenezcan, los biocombustibles pueden ser gaseosos, líquidos o sólidos.

De manera particular, los biocombustibles líquidos son obtenidos a partir de aceites vegetales, grasas animales, o cultivos con alto contenido de azúcares; los procesos de conversión incluyen la fermentación, la transesterificación, o procesos de hidrotreatmento. Por otro lado, los biocombustibles sólidos son materia orgánica densificada, de origen vegetal o animal, susceptibles de utilizarse en aplicaciones energéticas; éstos son obtenidos mediante procesos físicos, tales como compactación, astillado o trituración. Un aspecto interesante de los biocombustibles líquidos y sólidos es que ambos pueden producirse mediante el aprovechamiento integral de una materia prima. Por ejemplo, si se considera como materia prima a la higuera, su aceite puede emplearse para producir un biocombustible líquido (biodiésel, bioturbosina o diésel verde), y el resto de la biomasa puede transformarse en un biocombustible sólido (pellets, briquetas). Este aprovechamiento integral permite incrementar la rentabilidad de los procesos de conversión de biomasa, y al mismo tiempo reducir el número de residuos asociados a la producción de biocombustibles. Así, en el presente trabajo se realiza una revisión de la literatura científica en la que se estudia de manera separada la producción de biocombustibles líquidos y sólidos a partir de diferentes tipos de biomasa; esta información permitirá identificar aquellas oportunidades para el aprovechamiento integral de las biomasa para la producción de biocombustibles líquidos y sólidos.

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS

Entre los biocombustibles líquidos destacan el biodiésel y la bioturbosina, que se emplean para el transporte terrestre y aéreo, respectivamente. A continuación,

se presenta información sobre las materias primas y los procesos de conversión que pueden emplearse para la producción de estos biocombustibles líquidos.

en biomasa, y representan el insumo de tercera generación para producir biodiésel. Dada su eficiencia fotosintética para producir biomasa, altas tasas de crecimiento y gran contenido de aceite se consideran el único insumo

Tabla 1. Materias primas para la producción de biodiésel [9].

ACEITES VEGETALES COMESTIBLES	ACEITES VEGETALES NO COMESTIBLES	ACEITES DE SEMILLAS MODIFICADAS GENÉTICAMENTE	GRASAS ANIMALES	ACEITES DE OTRAS FUENTES (NO COMESTIBLES)
Colza Palma Girasol Canola Coco Ajonjolí Soya Cártamo Cacahuete	Brassica carinata Cynara cardunculus Camelia sativa Crambe abyssinica Pongamia Jatropha curcas Ricinus communis	Aceite de girasol de alto contenido de ácido oleico	Sebo de vaca Sebo de búfalo Grasa de pollo Grasa de pescado	Aceites de producciones microbianas Aceite de microalgas

BIODIÉSEL

De acuerdo con la ASTM (American Society for Testing and Materials), el biodiésel se define como ésteres monoalquílicos de cadena larga de ácidos grasos (FAME). El biodiésel se encuentra en estado líquido, y se obtiene mediante la transesterificación de materias primas con una alta cantidad de triglicéridos. Las materias primas más utilizadas para la fabricación de biodiésel incluyen aceite de girasol, colza, soja y palma, así como aceite usado de cocina, sebo y grasas animales [6]. En la Tabla 1 se muestran las principales materias primas usadas para la elaboración de biodiésel.

Los aceites comestibles como el de soya, palma, canola, girasol, cártamo, coco y cacahuete se consideran insumos de primera generación, por ser los primeros cultivos empleados en la producción del biodiésel [7]. Actualmente, la mayor cantidad del biodiésel se produce mediante aceites comestibles, como el de soya (Estados Unidos), canola (Europa) y palma (Malasia) [8].

Por otra parte, los aceites no comestibles representan una solución para disminuir el uso de aceites comestibles en la producción de biodiésel. Los aceites no comestibles se consideran insumos sostenibles siempre y cuando se cultiven en páramos no aptos para cultivos alimenticios; asimismo, deben eliminar la competencia por alimentos, reducir la deforestación, ser ambientalmente responsables y más económicos que los aceites comestibles. Aunque existen varios cultivos de aceites no comestibles para producir biodiésel, algunos destacados son la jatrofa (*Jatropha curcas*), la higuera (*Ricinus communis*) y la camelina (*Camelina sativa*) [10].

Las microalgas son organismos fotosintéticos que convierten la luz del sol, agua y dióxido de carbono

capaz de cumplir la demanda de combustibles y desarrollarse sustentablemente en el futuro [7], [10]. Actualmente existen numerosas investigaciones para obtener biodiésel mediante la transesterificación de aceites de algas.

El proceso de producción del biodiésel incluye operaciones de reacción y de separación; inclusive, podría involucrar operaciones de pretratamiento dependiendo del tipo de insumo empleado. La transesterificación es la reacción mediante la cual el aceite vegetal o grasa animal reacciona con un alcohol (metanol) en presencia de un catalizador líquido para producir una mezcla de ésteres metílicos (biodiésel), y glicerol como subproducto [11], [12]. Existen tres tipos de reacciones de transesterificación: catálisis homogénea, catálisis heterogénea y reacción no catalítica. A continuación, se proporciona información sobre cada una de ellas.

El proceso de catálisis homogénea implica que el catalizador se encuentra en estado líquido al igual que los reactivos, éste puede ser un catalizador ácido o básico [11]. Por otro lado, la transesterificación de aceites vegetales con metanol supercrítico (SCM, por sus siglas en inglés) se realiza sin usar ningún catalizador. El fundamento de la conversión mediante un fluido supercrítico es aprovechar las propiedades del alcohol en tales condiciones, que ocasionan que éste además de ser reactivo actúe como catalizador ácido de la reacción [13]. El proceso no catalítico, o supercrítico, fue propuesto en 2001 y permite manejar altos contenidos de agua y ácidos grasos [14]. Por último, la catálisis heterogénea es un método alternativo de producción de biodiésel que consiste en utilizar catalizadores sólidos para la reacción de transesterificación; así, las desventajas de usar catalizadores líquidos se superan [15]. Los catalizadores heterogéneos poseen una gran cantidad de sitios básicos en su superficie para la reacción de



transesterificación; por lo que se han evaluado diversos catalizadores depositados en materiales soporte como alúminas, hidrocalcitas, zeolitas y sílicas.

BIOTURBOSINA

La bioturbosina, también conocida como bioqueroseno parafínico sintético, es un combustible de aviación producido a partir de cualquier tipo de biomasa. Está conformada por una mezcla de hidrocarburos lineales y ramificados; su densidad energética y sus propiedades físicas se apegan a las características de la turbosina convencional que es producida a partir de combustibles fósiles [16]. Una de las diferencias entre la bioturbosina respecto a la turbosina convencional es que la primera puede o no contener compuestos aromáticos; esto puede provocar fugas en los tanques de almacenamiento de combustibles, por lo que la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) establece en la norma D7566 [17] su uso en mezclas con turbosina de origen fósil hasta un 50 % en volumen.

Los insumos usados para producir bioturbosina son de origen biológico y, por lo tanto, renovable. Precisamente, una de las claves para implementar con éxito la bioturbosina radica en la disponibilidad de insumos sustentables en gran escala.

La mayoría de las investigaciones respecto a la producción de bioturbosina se han encaminado a considerar los cultivos energéticos como materia prima (biomasa de segunda generación). Estos cultivos energéticos deben cumplir con criterios específicos, de modo que la producción del biocombustible minimice sus impactos ambientales y socioeconómicos. Tales criterios incluyen que la materia prima utilizada no debe competir con el sector alimenticio, ser sumidero de fuentes de agua potable, ni causar deforestación. En la Tabla 2 se muestran las principales materias primas usadas para la producción de bioturbosina.

Los procesos de producción de la bioturbosina deben tener menor impacto ambiental que la producida por parte de los combustibles fósiles. Existen diferentes procesos para la obtención de la bioturbosina según la naturaleza de la biomasa, entre los cuales se pueden mencionar los siguientes:

- Fischer-Tropsch (FT)
- Hidrotratamiento (HEFA)
- Isoparafinas sintéticas (SIP)
- Alcohol a turbosina (ATJ)

El proceso Fischer-Tropsch (FT), desarrollado por los alemanes Franz Fischer y Hans Tropsch en 1920, fue uno

de los primeros procesos certificados por la ASTM en 2009 para la fabricación de combustible de aviación [19]. El proceso FT consiste en la conversión de la biomasa mediante un proceso de gasificación a alta temperatura para la obtención de una mezcla gaseosa rica en hidrógeno y monóxido de carbono, conocida como gas de síntesis o syngas. Posteriormente se realiza la síntesis de Fischer-Tropsch para convertir catalíticamente el gas de síntesis a productos líquidos que puedan ser refinados en querosenos parafínico sintéticos, gasolina y lubricantes [19].

Por otra parte, también se cuenta con el proceso de hidrotratamiento de ácidos grasos y ésteres (HEFA, por sus siglas en inglés); al producto de este proceso se le denomina turbosina renovable hidroprocesada (HRJ). El proceso incluye hidrogenación catalítica, desoxigenación, hidroisomerización e hidrocrackeo para convertir triglicéridos en un producto que contiene cadenas de carbón C8-C15.

La turbosina renovable hidrotratada (HRJ o SPK) es equivalente a la del petróleo convencional con la ventaja de tener un número de cetano alto, menores emisiones de gases de efecto invernadero, y contenidos más bajos de azufre y compuestos aromáticos [20].

En el proceso de isoparafinas sintéticas (SIP, por sus siglas en inglés) se realiza la manipulación genética de las rutas metabólicas celulares, por lo que es posible diseñar microorganismos que convierten los azúcares de origen vegetal, a partir de cultivos como caña de azúcar o el sorgo, en moléculas específicas. Dichas moléculas pueden ser hidrocarburos que sustituyan a los productos petroquímicos, incluidos los biocombustibles para el transporte terrestre y aéreo.

El proceso alcohol a turbosina (ATJ, por sus siglas en inglés) transforma el alcohol derivado de la fermentación de azúcares de diversas fuentes (maíz, caña, biomasa celulósica) en un biocombustible mediante su deshidratación, oligomerización e hidrogenación [20]. En el proceso ATJ, los alcoholes de cadena corta (etanol, metanol, butanol), y larga (pentanol en adelante) son producidos convencionalmente mediante fermentación de azúcares o almidón; posteriormente, estos alcoholes son convertidos químicamente en alcanos de cadena más larga, como por ejemplo los constituyentes de la bioturbosina.

Cabe mencionar que en los procesos de obtención de biodiésel y bioturbosina a partir de aceites —comestibles o no—, mencionados en las Tablas 1 y 2, se genera una gran cantidad de residuos, por lo que es posible utilizar dichos residuos para la fabricación de pellets combustibles. En la sección siguiente se brindará información sobre los biocombustibles sólidos.

BIOCOMBUSTIBLES SÓLIDOS

Entre los biocombustibles sólidos destacan los pellets combustibles, debido a su facilidad de manejo y transporte. Los pellets combustibles pueden emplearse para la generación de energía eléctrica y térmica, e inclusive como materia prima para producir otros biocombustibles. A continuación, se presenta información sobre las materias primas y los procesos de conversión que pueden emplearse para la producción de estos biocombustibles sólidos.

PELLETS COMBUSTIBLES

La norma ISO 17225-6 define a los pellets como un biocombustible densificado hecho de biomasa molida con o sin aditivos y unificado en forma de cilindros; generalmente, los pellets tienen diámetros < 25 mm, de longitud entre 3.15 mm y 40 mm con extremos rotos, y son obtenidos por compresión mecánica [21].

En el proceso de producción de pellets se consideran varias etapas, las cuales se muestran en la Fig. 2: acondicionamiento de humedad, molienda, densificado, y enfriado. La primera etapa consiste en el acondicionamiento de la humedad del residuo, que podría implicar una operación de secado o de humidificación; esta etapa puede o no ser necesaria dependiendo de los valores de humedad del residuo. Una vez que la humedad ha sido ajustada, se debe reducir el tamaño de partícula. Para ello puede ser necesario una trituración o una molienda; la condición óptima depende de la morfología de la biomasa y de cómo ésta afecta la resistencia mecánica y densidad del pellet. Posteriormente, la biomasa es densificada mediante una peletizadora, donde la presión tiene un efecto clave. Después se lleva a cabo el proceso de enfriado, el cual es fundamental, ya que el pellet adquiere dureza cuando se enfría.



Figura 2. Etapas de la producción de pellets combustibles

En comparación con la biomasa de la cual provienen, los pellets ocupan poco espacio debido a su alta densidad; asimismo, son de fácil manejo y los costos de

transportación son menores [22]. Cabe mencionar que la combustión mejora significativamente cuando la biomasa se encuentra densificada en forma de pellets, que cuando se encuentra en su estado natural [23], [24], [25], por lo que se aprovecha de una manera que resulta más eficiente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

PRODUCCIÓN DE BIODIÉSEL Y PELLETS A PARTIR DE DIFERENTES MATERIAS PRIMAS

En esta sección se presentan las diferentes materias primas que han sido reportadas en la literatura para la producción de biocombustibles líquidos y sólidos; cabe mencionar que dichos reportes se han realizado de manera separada, pero se compilan en el presente trabajo con el objetivo de incentivar su aprovechamiento integral.

PALMA Y SUS RESIDUOS

Kansedo *et al.* [26] realizaron la conversión de aceite de palma con un catalizador montmorillonite K_{SF} (en polvo), mediante transesterificación heterogénea para obtener biodiésel. Para ello realizaron un diseño central compuesto de cuatro factores con cinco niveles cada uno: temperatura de reacción (50, 80, 120, 155 y 190 °C), tiempo de reacción (60, 120, 180, 240 y 300 min), relación metanol/aceite (1:4, 1:6, 1:8, 1:10 y 1:12 mol mol⁻¹), y la cantidad del catalizador (1, 2, 3, 4 y 5 wt%). Los resultados muestran que se alcanzó una conversión del 79.6 % utilizando las siguientes condiciones: temperatura de 190 °C, tiempo de reacción de 180 min, relación metanol/aceite a 1:8 mol mol⁻¹ y catalizador al 3 %.

Por otro lado, Chaiyaomporn *et al.* [27] estudiaron la producción de biodiésel a partir del aceite de la fibra de palma y la cáscara de la palma, y utilizaron los residuos sobrantes para producir pellets junto con residuos de glicerol. La biomasa se secó mediante energía solar durante 24 h. Luego, se molió la fibra y la cáscara y se seleccionaron las partículas con tamaños más pequeños de 0.5 mm, 0.5 a 1.0 mm, y más pequeños de 2.0 mm (tamaño de partículas mezcladas).

El combustible peletizado se produjo con fibra de palma con residuos de glicerol como adhesivo; posteriormente, se variaron los porcentajes de fibra de palma (50 %, 60 %, 70 % y 80 %), la cantidad de agua caliente (0 %, 10 % y 20 %), y la cantidad de glicerina (10 %, 20 %, 30 %, 40 % y 50 %) con tres diferentes tamaños de partículas.



La proporción óptima de combustible peletizado fue de 50:10:40 (fibra de palma, agua y desechos de glicerina) con tamaño de partícula menor de 2 mm.

En estas condiciones óptimas, los pellets tuvieron una densidad específica de 982.2 kg/m³, y un poder calorífico de 22.5 MJ/kg; asimismo, el contenido de humedad fue del 5.91 %, la materia volátil fue del 88.25 %, el contenido de carbono fijo fue del 1.58 %, y el contenido de cenizas fue del 4.23 %, lo cual fue superior a la norma.

El contenido de cenizas se logró reducir mediante el mezclado de la cáscara de la palma con la materia prima de fibra de palma, siendo la proporción óptima de 80:20 (fibras de palma:cáscara de palma). Con esta relación de materia prima, los pellets presentaron una densidad específica de 774.8 kg/m³, y un valor calorífico de 19.71 MJ/kg. La producción de pellets a partir de residuos de la industria del aceite de palma crudo y de la producción de biodiésel es factible, y el poder calorífico es competitivo.

ALGAS MARINAS Y SUS RESIDUOS

Maceiras *et al.* [28] estudiaron las macroalgas marinas como materia prima alternativa para la producción de biodiésel. Las especies de algas marinas estudiadas incluyen *Fucus spiralis*, *Saccorhiza polyschides*, *Sargassum muticum*, *Codium tomentosum*, *Ulva rigida*, *Enteromorpha intestinalis*, *Ascophyllum nodosum*, *Pelvetia canaliculata*; estas especies se lavaron con agua y se secaron al sol durante unos días, ya que el agua inhibe la transesterificación.

Con el fin de determinar el contenido de aceite de las algas, se utilizó la técnica Soxhlet con hexano como solvente durante 4 h según la norma UNE-EN ISO 734-1. Todos los experimentos se llevaron a cabo utilizando un frasco de vidrio de fondo redondo de 0.5 l. El disolvente se separó del aceite por destilación, y fue reutilizado en el siguiente lote de extracción.

El proceso de transesterificación se llevó a cabo simultáneamente con la extracción del aceite para evitar el paso de la purificación del aceite obtenido.

La reacción se llevó a cabo al mezclarse 1000 g de algas secas con 2.5 l de hexano, y se introdujeron en un reactor termostático. La mezcla se calentó a 60 °C y después se añadió al reactor metanol, en el que se había disuelto previamente hidróxido de sodio (NaOH); en la parte superior del reactor se acopló una columna de refrigeración para condensar los reactivos evaporados. Los productos de la reacción fueron separados mediante decantación; cabe mencionar que para obtener el biodiésel crudo era necesario eliminar el disolvente por destilación. Las condiciones óptimas de operación fueron temperatura de 60 °C, tiempo de reacción de 11 h, 2.5 l de n-hexano por cada 1000 g de algas, una relación molar entre el metanol y el aceite de 300:1 y 1 % de masa (g NaOH/g macroalgas), obteniendo un rendimiento de 11.42 %.

Los residuos de las macroalgas obtenidos después de la transesterificación se sometieron a análisis para la determinación de su contenido en humedad y su poder calorífico. El contenido de humedad se determinó con la norma UNE-CEN/TS 14774-2 EX y su poder calorífico con la norma UNE 164001EX.

Tabla 3. Contenido de humedad y poder calorífico de los residuos de macroalgas

MUESTRA	HUMEDAD (%)	PCS A H= 17.303 (KCAL/KG)	PCI A H= 17.303 (KCAL/KG)
1	17.50	2900.32	2537.65
2	17.16	2855.64	2492.98
3	17.16	2900.81	2538.15

Nota: pcs: Poder calorífico superior; pci: Poder calorífico inferior

Tabla 2. Materias primas para la producción de bioturbosina [18].

ACEITES DE CULTIVOS ALIMENTICIOS	ACEITES DE CULTIVOS NO ALIMENTICIOS	ACEITES/GRASA RESIDUALES	ACEITES DE MICROORGANISMOS	ACEITES DE HALÓFITAS	MATERIAL LIGNOCELULÓSICOS
Soya Palma Girasol Cártamo Canola	Camelia sativa Jatropha curcas Ricinus communis Salicornia	Sebo de res Grasa de aves Manteca de cerdo Aceites residuales de cocina Residuos municipales	Aceite de microalgas	Kosteletzkya pentacarpos Salicornia bigelovii	Biomasa residual de pastos Residuos agroindustriales Residuos forestales y madereros

El resultado promedio de contenido de humedad obtenido de este trabajo fue del 17.3 %, por lo que es similar al hueso de aceituna (12-20 %) y cáscara de nuez (8-15 %). El poder calorífico inferior (PCI) de la biomasa para su uso como combustible suele estar entre 1.8 y 4.5 kWh/kg, siendo la potencia de calentamiento inferior de los residuos de macroalgas de 2.932 kWh/kg en promedio; por lo que su uso es factible como combustible. Por tanto, las macroalgas pueden ser utilizadas para la producción de biodiésel (a partir del aceite de macroalgas) y de pellets (con la biomasa residual de las macroalgas).

En investigaciones más recientes se utilizaron la microalga *Scenedesmus* para generar biodiesel y biogás, y los residuos sobrantes fueron utilizados para ser densificados [29]. Antes de las pruebas de peletización, se realizó un tratamiento de secado con el objetivo de reducir la alta humedad de los residuos originales hasta un valor de 10 %. La caracterización de los pellets de microalgas se muestra en la Tabla 4, y se comparan con las especificaciones de la norma ISO 17225-6. En general, los pellets no cumplen con las especificaciones de la norma, en particular aquellas relacionadas con la durabilidad, contenido de nitrógeno, azufre y cenizas.

Tabla 4. Resultados de la caracterización de los pellets de microalga.

PARÁMETRO	RESULTADO	A	B
Humedad (%)	6.10	Cumple	Cumple
Densidad a granel (kg/m ³)	788.00	Cumple	Cumple
Durabilidad (%)	96.56	No cumple	Cumple
Longitud (mm)	23.41	Cumple	Cumple
diámetro (mm)	6.07	Cumple	Cumple
N (%)	6.55	No cumple	No cumple
S (%)	0.48	No cumple	No cumple
Cenizas (%)	18.02	No cumple	No cumple
LHV (MJ/kg)	17.98	Cumple	Cumple
Densidad de energía (MJ/m ³)	14,165.91	No requerido	No requerido

Por otro lado, Álvarez *et al.* [30] investigaron la pro-

ducción de biodiésel y pellets a partir del aceite de cepas de microalgas verdes de *Chlorella vulgaris*; en estos procesos se alcanzaron conversiones de biodiésel entre el 12 y el 27 % respecto al peso seco.

Los residuos de la producción del biodiésel se densificaron y caracterizaron; los resultados obtenidos se compararon con las "Normas europeas para pellets no leñosos graduados" a fin de evaluar su posible uso como combustible en calderas. Los parámetros físicos y químicos analizados, tales como potencia calorífica, contenido de cenizas o porcentaje de humedad, se compararon con los valores marcados en la ISO 17225-6:2014 [21].

Se observa que el Valor Calorífico Superior (HHV) de los pellets de algas, 20 681 kJ/kg, es superior al valor mínimo exigido por la normativa, 14 500 kJ/kg. El contenido de cenizas, que debería ser inferior al 10 % según la norma, resulta 9.78 %. Además, se obtuvo un contenido de humedad cero, verificando los límites legales. Con base en estos datos, se concluyó que los pellets de residuos de algas cumplen los requisitos establecidos para ser considerados un biocombustible comercial

ACEITE DE COLZA Y SUS RESIDUOS

Yuan *et al.* [31] utilizaron el aceite de colza como materia prima para la producción de biodiésel. Para ello realizaron un diseño de experimentos de cuatro factores, cada uno con cinco niveles: relación metanol/aceite (4:1, 5:1, 6:1, 7:1 y 8:1 mol mol⁻¹), concentración del catalizador (0.4, 0.8, 1.0, 1.2 y 1.6 %), el tiempo de reacción (45, 55, 65, 75 y 85 min), y la temperatura de reacción (25, 35, 45, 55 y 65 °C). La máxima conversión a biodiésel obtenida fue de 84.05 %, con condiciones de operación de relación metanol/aceite de 6:1, concentración de catalizador 1.0 %, un tiempo de reacción de 65 min y 45 °C de temperatura.

Klugmann-Radziemska *et al.* [32] realizaron el proceso de producción de pellets a partir de los residuos de semillas trituradas procedentes de la extracción de

PRODUCCIÓN DE BIOTURBOSINA Y PELLETS A PARTIR DE DIFERENTES MATERIAS PRIMAS

MATERIAL LIGNOCELULÓSICO

Olcay *et al.* [33] estudiaron la conversión de los azúcares C5 derivados de la materia prima lignocelulósica para producir hidrocarburos. El rendimiento fue del 55 %; los hidrocarburos incluían la gasolina, bioturbosina y combustible diésel. Las condiciones de operación



fueron 80-140 °C, 5.5-8.27 MPa y un catalizador de Ru/Al₂O₃ para la etapa de hidrocicloadición, y para la etapa de hidrodeshidrogenación se emplearon NaOH y Pt/SiO₂-Al₂O₃.

Simacek *et al.* [34] estudiaron el hidroprocesamiento del aceite de colza a temperaturas entre 310 °C y 360 °C a una presión de hidrógeno de entre 70 y 150 bar; el proceso se llevó a cabo en un reactor de laboratorio con flujo de pistón. El catalizador utilizado fue el Ni-Mo/alúmina. Los productos de la reacción contenían principalmente n-C₁₇ y n-C₁₈, con una baja concentración de otros n-alcanos e isoalcanos; el n-C₁₇ y el n-C₁₈ representaban aproximadamente el 75 % del peso de todos los productos.

Liu *et al.* [35] realizaron la producción de pellets a partir de biomasa leñosa (aserrín de pino (PS)), residuos agrícolas (cáscara de arroz (RH), fibra de coco (CF) y cáscara de coco (CS)), e hidrocarbón (HC), que se preparó a partir de materiales típicos de carbonización hidrotermica (HTC) de biomasa.

Tabla 5. Resultados de los pellets producidos a partir de biomasa leñosa y residuos agrícolas.

PELLET	HUMEDAD (%)	PODER CALORÍFICO (HHV) (MJ/KG)	DENSIDAD (KG/M ³)	CENIZAS (%)
CF pellet	10.07	17.64	984	4.45
RH pellet	8.03	13.90	1093	15.01
CS pellet	4.61	17.59	1101	1.14
PS pellet	5.46	16.13	1141	0.75
CF-HC	3.92	21.55	1153	1.24
RH-HC	5.02	15.08	1334	23.28
CS-HC	4.86	21.49	1153	0.41
PS-HC	1.86	21.74	1191	0.36

La Tabla 5 muestra que los pellets obtenidos cumplen con la humedad final; en particular, los pellets producidos con hidrocarbón, exceptuando el RH-HC, son los que presentan el mayor poder calorífico, además de tener una densidad óptima.

ACEITE/GRASAS RESIDUALES

Bezergianni *et al.* [36] reportaron la conversión de residuos de aceite de cocina para producir bioturbosina usando tres catalizadores: un catalizador de hidrotreatment, un catalizador de hidrocrackeo suave y un catalizador de hidrocrackeo severo. Utilizaron

condiciones de alta temperatura (330–390 °C) y presión (8.27–13.79 MPa). Como productos se obtuvieron hidrocarburos en el rango de la gasolina y el diésel. El rendimiento más alto fue del 80 % para el diésel a 370 °C y 8.27MPa, con un catalizador de hidrotreatment.

Hanafi *et al.* [37] utilizaron como materia prima los residuos de grasas de pollo para producir bioturbosina, naftas y gases ligeros. En su trabajo reportan las condiciones óptimas de operación y la energía de activación, obteniendo un rendimiento del 53 % en la fracción queroseno/diésel. Las condiciones de operación fueron una temperatura de 400 °C, una presión 6 MPa, una alimentación de H₂/aceite de 450 v/v y tiempo de reacción de 4 h.

Por otro lado, Wang *et al.* [38] hicieron la evaluación del potencial de la biomasa peletizada de diferentes residuos sólidos municipales para su uso como combustible sólido. Los residuos incluyeron estiércol de perro, estiércol de caballo, residuos de orujo de manzana y residuos de té. Después de combinar los residuos, el aglutinante y el agua, la mezcla obtenida se sometió a un proceso de peletización.

Los pellets se produjeron en una peletizadora de partículas de biomasa de molde plano, con una capacidad de producción media de 300-500 kg/h. Los diámetros de los pellets variaban entre 4 y 5 mm, y la longitud media era de 20 mm. Los resultados obtenidos se muestran la Tabla 6.

Tabla 6. Resultados del análisis de proximidad de los pellets producidos a partir de residuos municipales.

PELLET	HUMEDAD (%)	CENIZAS (%)	HHV (MJ/KG)	LHV (MJ/KG)
Estiércol de perro (DN)	11.7	20.24	17.41	12.98
Estiércol de caballo (HN)	12.6	17.81	16.55	12.51
Residuos de orujo de manzana (AN)	18.9	5.31	16.02	11.77
Residuos de Té (TN)	10.3	8.74	19.52	15.99

Los resultados de las propiedades mecánicas y térmicas muestran que los pellets DN, HN y TN exhibieron excelentes propiedades mecánicas y térmicas; asimismo, estos pellets presentaron altos valores caloríficos (HHV

> 16.30 MJ/kg), alta resistencia a los choques mecánicos (> 99 %), alto contenido de materias volátiles, y óptimos contenidos de cenizas y temperaturas de reblandecimiento .

ACEITE DE JATROFA Y SUS RESIDUOS

Rizo-Acosta *et al.* [39] estudiaron el coprocesamiento de una mezcla de aceite de jatrofa no comestible, n-hexadecano y 4,6-dimetildibenzotiofeno; la reacción se llevó a cabo sobre NiMo/Al₂O₃ a 339.85-359.85 °C y 8 MPa. También se realizó el hidrocraqueo del n-C₁₆ y las n-parafinas generadas a partir de los ácidos carboxílicos; las conversiones más altas fueron entre 81.04-99.60 %.

Por otro lado, Sinha *et al.* [40] convirtieron el aceite de la jatrofa a 8 MPa, 380-440 °C, una relación de H₂/ volumen de alimentación de 2500, un catalizador Ni-Mo/γ-Al₂O₃; la conversión se llevó a cabo en dos reactores a escala laboratorio tipo microcanal y monolítico. Los resultados muestran una proporción rendimiento aceite/bioturbosina en peso de 46 % para el microcanal y 36.2 % para el monolítico.

Ramírez *et al.* [41] analizaron y determinaron las características óptimas de combustión y la durabilidad mecánica de pellets elaborados a partir de la cáscara (Jsh) y el biocarbón de torta de semilla (SCB) de *Jatropha curcas*. Con el fin de evaluar el comportamiento de los pellets se utilizaron mezclas SCB-Jsh (100, 75, 50, 25 y 0 % cada una), dos tamaños de partícula (2 y 4 mm), y agua añadida antes del proceso de peletización (15 % y 25 %). Los pellets compuestos de 50 % Jsh y 50 % SCB, con 25 % de agua adicional y un tamaño de partícula de 4 mm presentaron la mayor durabilidad mecánica (96.83 %) y un mayor poder calorífico (22.14 MJ/kg). La combustión de los pellets obtenidos a estas condiciones de operación en un quemador industrial mostró temperaturas medias que oscilan entre 300 y 350 °C, con una temperatura máxima de 460 °C. La mezcla estudiada se recomienda para uso industrial en grandes quemadores, ya que se genera un bajo porcentaje de cenizas, y su costo energético [USD/MJ] es 60 % menor que el del GLP.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se revisaron diferentes alternativas para la producción de biocombustibles líquidos y sólidos a partir de diferentes biomásas. La revisión de literatura muestra que diferentes fracciones de la misma biomasa pueden emplearse para generar biodiésel, bioturbosina, así como pellets combustibles. Ade-

más, los estudios muestran que el aprovechamiento de las fracciones se ha propuesto por separado, por lo que un área interesante es el uso integral de la biomasa para la producción de biocombustibles líquidos y sólidos.

Se puede esperar que desde el punto de vista económico y ambiental el aprovechamiento integral de la biomasa permita que los biocombustibles obtenidos tengan precios más competitivos y un menor impacto ambiental.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo financiero brindado por Conacyt mediante la beca de manutención de L.A. Rodríguez Romero.

REFERENCIAS

- [1] International Energy Agency. (2019). [Online]. Available: <http://www.iea.org/fuels-and-technologies/oil>
- [2] Secretaria de Energía, "Reporte de avances de energías limpias," 2018.
- [3] International Renewable Energy Agency. (2018). [Online]. Available: <https://www.irena.org/Statistics>
- [4] M. Guo, W. Song and J. Buhain, "Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, pp. 712-725, 2015.
- [5] H. A. Alalwan, A. H. Alminshid and H. A. S. Aljaafari, "Promising evolution of biofuel generations," *Renewable Energy Focus*, pp. 127-139, 2019.
- [6] S. M Garrido, "Tecnología, territorio y sociedad, producción de biodiesel a partir de aceites usados," *Revista de Ciencias Sociales*, vol. 37, pp. 75-86, 2010.
- [7] A.E. Atabani, A. S. Silitonga, I. A. Badruddin, T. M. Mahlia, H. H. Masjuki and S.A. Mekhilef, "A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 2070-2093, 2012.
- [8] M. Stoytcheva and G. Montero, "Biodiesel, Feedstocks and Processing Technologies," *CROACIA IN TECHNOLOGIES*, 2011.
- [9] Secretaria de Energía, "Reporte de Inteligencia Tecnológica, Biodiésel," Instituto Mexicano del petróleo, 2018.
- [10] M. Tabayabaei, K. Karimi, I. S. Horvatáh and R. Kumar, "Recent trends in biodiesel production," *Biofuel Research Journal*, pp. 258-267, 2015.
- [11] S. N. Naik, V. V. Goud, P. K. Rout and A. K. Dalai, "Production first and second-generation biofuels: A comprehensive review," *Renewable and Sustainable*



Energy Reviews, vol. 14, pp. 578-597, 2010.

[12] G. Knothe, J. Krahl and J. Van Gerpen, *The Biodiesel Handbook*, Urbana, Illinois: AOCS Press, 2010.

[13] Y. Warabi, D. Kusdiana and S. Saka, "Biodiesel fuel from vegetable oil by various supercritical alcohols," *App. biochem. biotech.* pp. 793-801, 2004.

[14] S. Saka and D. Kusdiana, "Biodiesel fuel from rapeseed oil as prepared in supercritical methanol," *Fuel*, vol. 80, pp. 225-231, 2011.

[15] J. P. Da Costa Evangelista, A. D. Gondim, L. D. Souza and A. S. Araujo, "Alumina-supported potassium compounds as heterogeneous catalysts for biodiesel production: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59, pp. 887-894, 2016.

[16] E. Nygren, K. Aleklett and M. Hook, "Aviation fuel and future oil production scenarios," *Energy Policy*, vol. 37, pp. 4003-4010, 2009.

[17] ASTM International, "ASTM D7566-16, Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons," West Conshohocken, PA, 2016.

[18] Secretaria de Energía, "Reporte de Inteligencia Tecnológica, Bioturbosina," Instituto Mexicano del petróleo, 2018.

[19] J. C. Vigiú, N. Ullrich, P. Porot, L. Bournay, M. Hecquet and J. Rousseaus, "Biofuel project: Targeting the development of second-generation biodiesel and biojet fuels," *Oil and Gas Science and Technology*, vol. 68, pp. 935-946, 2013.

[20] W. C. Wang and L. Tao, "Bio-jet fuel conversion technologies," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 53, 2016.

[21] ISO, 17225-6:2014, Solid Biofuels-Fuel specifications and classes-Part 6: Graded non-woody pellets, 2014.

[22] C. Mock, H. Park, C. Ryu, V. Manovic and S. C. Choi, "Particle temperature and flue gas emission of a burning single pellet in air and oxy-fuel combustion," *Combustion and Flame*, vol. 213, pp. 156-171, 2020.

[23] T. Zeng, N. Weller, A. Pollex and V. Lenz, "Blended biomass pellets as fuel for small scale combustion appliances: Influence on gaseous and total particulate matter emissions and applicability of fuel indices," *Fuel*, vol. 184, pp. 689-700, 2016.

[24] T. Zeng, A. Pollex, N. Eller, V. Lenz and M. Nelles, "Blended biomass pellets as fuel for small scale combustion appliances: Effect of blending on slag formation in the bottom ash and pre-evaluation options," *Fuel*, vol. 212, pp. 108-116, 2018.

[25] P. Pradhan, A. Arora and S. M. Mahajani, "Pilot scale evaluation of fuel pellets production from garden waste biomass," *Energy Sustain. Dev.*, vol. 43, pp. 1-14, 2018.

[26] J. Kansedo, K. Teong Lee and S. Bhatia, "Bio-

diesel production from palm oil via heterogeneous transesterification," *Biomass and Bioenergy*, vol. 33, pp. 271-276, 2009.

[27] K. Chaiaomporn and O. Chavalorit, "Fuel pellets production from biodiesel waste," *Environment Asia*, vol. 3, pp. 103-110, 2010.

[28] R. Maceiras, M. Rodríguez, A. Cancela, S. Urréjola and A. Sánchez, "Macroalgae: Raw material for biodiesel production," *Applied Energy*, vol. 88, pp. 3318-3323, 2011.

[29] M. T. Miranda, F. J. Sepúlveda, J. I. Arranz, I. Montero and C. V. Rojas, "Physical-energy characterization of microalgae *Scenedesmus* and experimental pellets," *Fuel*, vol. 226, pp. 121-126, 2018.

[30] P. Álvarez, J. L. Salgueiro, L. Pérez, A. Cancela, A. Sánchez and L. Ortiz, "Total use of Microalgae as feedstock for biodiesel and pellet production," *Int. J. .Env. Res.*, vol. 10, pp. 637-644, 2016.

[31] X. Yuan, J. Liu, G. Zeng, J. Shi, J. Tong and G. Huang, "Optimization of conversion of waste rapeseed oil with high FFA to biodiesel using response surface methodology," *Renewable Energy*, vol. 33, pp. 1678-1684, 2008.

[32] E. Klugmann-Radziemska and K. Ciunel, "Rapeseed Pellet- A byproduct of Biodiesel production- As an excellent Renewable Energy Source," *Chem. Didact Ecol Metrol.*, vol. 18, pp. 109-119, 2013.

[33] H. Olcay, A. V. Subrahmanyam and R. Xing, "Production of renewable petroleum refinery diesel and jet fuel feedstocks from hemicellulose sugar streams," *Energy and Environmental Science*, vol. 6, pp. 205-216, 2013.

[34] P. Simacek, D. Kubicka, G. Sebor and M. Pospisil, "Properties of hydroprocessed rapeseed oil," *Fuel*, vol. 89, pp. 611-615, 2010.

[35] Z. Liu, A. Quek and R. Balasunramanian, "Preparation and characterization of fuel pellets from woody biomass, agro-residues and their corresponding hydrochars," *Applied Energy*, vol. 113, pp. 1315-1322, 2014.

[36] S. Bezergianni, A. Kalogianni and A. Dimitriadis, "Catalyst evaluation for waste cooking oil hydroprocessing," *Fuel*, vol. 93, pp. 638-641, 2012.

[37] S. A. Hanafi, M. S. Elmelawy and N. H. Shalaby, "Hydrocracking of waste chicken fat as a cost-effective feedstock for renewable fuel production: a kinetic study," *Egyptian Journal of Petroleum*, vol. 25, pp. 531-537, 2016.

[38] T. Wang, Y. Li, J. Zhang, J. Zhao, Y. Liu, L. Sun, B. Liu, H. Mao, Y. Lin, W. Li, M. Ju and F. Zhu, "Evaluation of the potential of pelletized biomass from different municipal solid wastes for use as solid fuel," *Waste Management*, vol. 74, pp. 260-266, 2018.

[39] P. Rizo-Acosta, M.T. Linares-Vallejo and J.A.

Muñoz-Arroyo, "Co-hydroprocessing of a mixture: Vegetable oil/n-hexadecane/4,6-dimethyldibenzothio-pene for the production of sustainable hydrocarbons. A kinetic modeling," *Catal Today*, vol. 234, pp. 192-199, 2014.

[40] A.K. Sinha, M.G. Sibi, N. Naidu, S.A. Farooqui, M. Anand and R. Kumar, "Process intensification for hydro-processing of vegetable oils: experimental study," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 53, pp. 19062-70, 2014.

[41] V. Ramírez, J. Martí-Herrero, M. Romero and D. Rivadeneira, "Energy use of Jatropha oil extraction wastes: Pellets from biochar and Jatropha shell blends," *Journal of Cleaner Production*, vol. 215, pp. 1095-1102, 2019.

REVISIÓN: ALIMENTACIÓN NO TRADICIONAL PARA MEJORAR EL RENDIMIENTO DEL CRECIMIENTO DE PECES EN CONDICIÓN SUB- Y SUPRA-ÓPTIMA DE TEMPERATURA

Review: Non-traditional feed to improve growth performance of fish in sub and
supra-optimal temperature conditions

Julieta Sánchez Velázquez¹, Guillermo Abraham Peña Herrejón¹,
Jesús Josafat de León Ramírez¹ y Juan Fernando García Trejo^{1*}

¹Universidad Autónoma de Querétaro

*Correo electrónico:juanfernando77@gmail.com

RESUMEN

La harina y el aceite de pescado son los principales ingredientes de los alimentos tradicionales para peces, pero el costo de dichas materias primas ha incrementado debido a la alta demanda generada por el abastecimiento de los sistemas de producción acuícola. Por ello resulta verdaderamente necesario reemplazarlos de forma parcial o total con nuevos recursos, denominados alternativos o no tradicionales, con los cuales puedan ser elaborados nuevos alimentos. Generalmente se pretende que los alimentos no tradicionales incrementen el rendimiento del crecimiento en los peces, pero se ha observado que dichas dietas también aportan beneficios a su salud. En este sentido, los alimentos no tradicionales derivados de las nuevas fuentes de proteína y de ácidos grasos proporcionan compuestos químicos que soportan la respuesta fisiológica de los peces ante situaciones de estrés; por ejemplo, les permite enfrentar una temperatura ambiental considerablemente diferente a la óptima, sin afectar el rendimiento de su tasa de crecimiento.

Por lo tanto, el presente trabajo realiza una revisión de aquellos estudios en los que se hayan utilizado alimentos no tradicionales con la finalidad de obtener una respuesta positiva en el rendimiento del crecimiento, y donde haya sido posible observar efectos positivos en la salud de los peces. Se concluye que los resultados no poseen ninguna diferencia significativa con los alimentos no tradicionales cuya composición en aminoácidos y ácidos grasos es similar a la de FM y FO, ya que también confieren a los peces los nutrientes que les permiten no sólo aumentar su crecimiento en términos de tasa instantánea de crecimiento y tasa específica de crecimiento, sino que también promueve su crecimiento en condiciones ambientales adversas. Los aminoácidos que resultaron favorables para el crecimiento y la salud del pez son la histidina, arginina, leucina, lisina, fenilalanina y valina.

PALABRAS CLAVE: Acuicultura, condición ambiental, desempeño del crecimiento, fuente de lípidos, fuente de proteína.

ABSTRACT

Fishmeal and fish oil are the main ingredients in traditional fish feeds, but the cost of these raw materials has increased due to the high demand generated by the aquaculture production systems supply. Therefore, it is necessary to replace fishmeal and fish oil partially or totally with new resources, with which new foods can be made and that are named non-traditional or

alternative. Alternative feeds are generally intended to increase growth performance in fish, but such diets have been found to provide health benefits as well. In this sense, non-traditional foods from new sources of protein and fatty acids provide chemical compounds that support the physiological response of fish to stress situations; that is, it allows the fish to face an environmental temperature different from optimum, while growth performance is not affected by said environmental variation. Therefore, in the present work the objective was to review those works in which non-traditional foods were used, with which they obtained a response in growth performance, and in turn a positive effect on the health of the fish. It is concluded that the results obtained lack significant difference with the non-traditional feeds that have a composition in amino acids and fatty acids similar to FM and FO, since they give the fish the nutrients that allow them not only to increase their growth in terms instantaneous growth rate or specific growth rate, but also allow growth under adverse environmental conditions. The amino acids that worked better for the growth and health of the fish are histidine, arginine, leucine, lysine, phenylalanine and valine.

KEYWORDS: Aquaculture, environmental condition, growth performance, lipid source, protein source.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años la producción acuícola ha incrementado, lo cual se debe al aumento de la demanda de peces (y crustáceos) para consumo humano, principalmente [1]. Por esta razón las granjas productoras se ven en la necesidad de promover el crecimiento de los organismos acuáticos para que alcancen la talla comercial deseada [2], y para ello son utilizados alimentos balanceados. En la elaboración de los alimentos para peces son necesarios dos tipos de sustancias como fuente de proteína y ácidos grasos [3], éstas son la harina (fish meal, por sus siglas en inglés, FM) y el aceite (fish oil, por sus siglas en inglés, FO) obtenidos a partir del pescado [1].

El uso de FM y del FO impacta negativamente el ambiente, ya que es necesario utilizar productos del mar que podrían ser parte de las redes alimentarias en el medio acuático natural para la obtención de dichas fuentes de materia prima [4].

Además, el costo de producción de peces se encarece, debido al precio tan alto de dichos insumos [5], puesto que también son altamente valorados en los alimentos para animales terrestres y, por consecuencia, la demanda de FM y FO se incrementa aún más [6].



Los investigadores dedicados a la nutrición acuícola están desarrollando estrategias para reducir el uso de FM y FO en el alimento para peces [7]. Sus trabajos están encaminados al desarrollo de alimentos a partir de fuentes de proteína y ácidos grasos alternas a la de pescado, mejor conocidas como fuentes no tradicionales o fuentes alternativas [7].

Existe una gran diversidad de posibilidades para la obtención de proteínas y ácidos grasos, de las más prometedoras son aquellas que provienen de insectos [8] y de organismos unicelulares [9].

Los alimentos no tradicionales deben poseer en su composición aminoácidos y ácidos grasos necesarios para el crecimiento de algunos peces de interés comercial [10]. Los ácidos grasos, además de ser la principal fuente de energía, confieren al pez la capacidad de modificar la membrana de sus células [11], lo que le permitiría tolerar diferentes niveles de temperatura; mientras que los aminoácidos servirán para el crecimiento [12] y, en ocasiones, para demanda energética [13]. Por otra parte, se ha demostrado que la temperatura elevada del medio que rodea al pez acelera las reacciones químicas del metabolismo, la demanda de energía y el consumo de alimento, dando como resultado el crecimiento [14]. Pero existe un nivel de temperatura en el que el pez deja de crecer, porque la demanda de energía y el consumo del alimento ahora se dirigirán hacia la sobrevivencia y no al crecimiento [14].

De hecho, existe evidencia científica donde se demuestra que la composición de un alimento otorga a los organismos que lo consumen la capacidad de crecer a ciertos niveles de temperatura diferentes a los óptimos para su crecimiento [15],[16],[17],[18].

Sin embargo, los alimentos no tradicionales con mayor oportunidad para sustituir a FM y FO generalmente se estudian en la temperatura óptima de crecimiento para la especie en cuestión [19]. Por consecuencia, se pierde información de interés, como el saber si el alimento le podría o no otorgar a los peces la capacidad de enfrentar condiciones ambientales adversas; es decir, mantener su crecimiento aún en condiciones de temperatura por debajo o por arriba del óptimo [20].

Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo es revisar aquellos estudios en los que son evaluadas diferentes fuentes de proteína y ácidos grasos alternativos al FM y FO en la elaboración de alimentos para peces que fueron probados a diferentes temperaturas de cultivo, con el propósito de analizar si los resultados encontrados tuvieron efecto positivo o negativo sobre el rendimiento del crecimiento y ofrecieron beneficios a la salud de los peces en condiciones fuera del óptimo.

CRECIMIENTO Y TEMPERATURA

Unas de las medidas que utilizan los expertos en la acuicultura para reportar el crecimiento son las siguientes: tasa de crecimiento, tasa de crecimiento relativa y tasa específica de crecimiento (SGR por sus siglas en inglés), o tasa de crecimiento instantánea [21].

Cada una de estas representaciones de crecimiento son utilizadas para varios propósitos: 1) evaluación estadística del efecto de varios tratamientos sobre el crecimiento; 2) presentación de datos de crecimiento en un formato estándar que permite comparar el crecimiento entre diferentes tratamientos; y 3) provisión de las bases para el manejo de decisiones; por ejemplo, estimar el peso de los peces bajo condiciones cambiantes [21],[22].

Cada medida de crecimiento asume una relación particular entre el tiempo y el tamaño del pez, por ejemplo, lineal, exponencial o sigmoide [22].

La tasa de crecimiento instantánea (G) (1) es particularmente útil para reportar el crecimiento de peces pequeños, y se muestra en una relación de crecimiento exponencial. Por otra parte, G puede ser transformada a la tasa de crecimiento específico

$$G = [\text{Ln}(W_t) - \text{Ln}(W_i)]/t \quad (1)$$

Donde Ln (Wt) es el logaritmo natural del peso a un tiempo t, y Ln (Wi) es el logaritmo natural del peso inicial. Los acuicultores multiplican G por 100 y expresan el resultado como tasa de crecimiento específico (SGR) en %/d, la cual es válida para peces más jóvenes cultivados en periodos cortos de tiempo, pero no para periodos cultivo tan extensos, para ellos se utilizaría G (1).

Por lo tanto, el crecimiento de los peces se puede determinar mediante expresiones matemáticas como G y SGR, y a partir de dichas expresiones se obtiene el rendimiento; es decir, la proporción del peso entre el tiempo de acuerdo con los medios o tratamientos utilizados. Por esta razón, el crecimiento se expresa también como el rendimiento del crecimiento de los peces.

Por otra parte, el crecimiento de los peces es afectado por factores abióticos, como la temperatura. Los peces poseen un mecanismo de regulación corporal denominado ectotermia [23]. Si un animal ectotérmico se expone a un medio térmico uniforme, la velocidad de sus funciones dependerán de la temperatura a la que se encuentra [24]. Si la temperatura de un animal afecta tanto a la tasa metabólica como a la demanda energética, el pez consumirá más alimento, lo que resulta en el incremento de la tasa de crecimiento.

Los nutrientes del alimento son usados por los organismos acuáticos para obtener energía, construir nuevas estructuras celulares y cumplir funciones celulares, a esto se le llama metabolismo (anabolismo y catabolismo) [25]. No obstante, conforme aumenta la temperatura la tasa metabólica y el consumo de alimento seguirán incrementándose, pero la tasa de crecimiento comenzará a disminuir, ya que, aunque el organismo consuma una mayor cantidad de energía, ésta no será utilizada para el crecimiento sino para satisfacer las necesidades de un metabolismo acelerado.

Por ejemplo, en la mayoría de los estudios que relacionan la tilapia y su tolerancia a la temperatura, se sugieren el rango de temperatura óptima en los que se obtiene el máximo rendimiento del crecimiento de este pez; este rango va de 24 °C a 32 °C. Sin embargo, cuando el rendimiento del crecimiento de la tilapia (SGR) se evalúa en cada grado del rango de temperatura óptima, resulta que el mejor rendimiento se obtiene a 28 °C, ya que es cuando se alcanza el mejor crecimiento, conversión alimenticia y supervivencia [26] (Tabla 1).

Tabla 1. Efecto de la temperatura del agua sobre el rendimiento del crecimiento, tasa de conversión alimenticia, supervivencia de la tilapia [26].

T (°C)	IW*	FWX	% GANADO	SGR*	FCR*	SUPERVIVENCIA (%)
24	0.023	0.55±0.01 ^a	2306±75 ^a	6.36±0.06 ^a	3.18±0.11 ^a	83±0.67 ^a
26	0.023	0.87±0.11 ^b	3682±63 ^b	7.26±0.18 ^b	2.66±0.16 ^b	88±5.33 ^a
28	0.023	1.16±0.17 ^c	4944±74 ^c	7.80±0.29 ^c	2.52±0.06 ^b	84±2.89 ^a
30	0.023	0.81±0.03 ^b	3422±133 ^b	7.12±0.08 ^b	2.76±0.05 ^b	83±1.77 ^a
32	0.023	0.68±0.04 ^a	2842±178 ^a	6.75±0.10 ^a	3.35±0.09 ^a	74±5.04 ^b

Los valores en la misma columna con diferente superíndice son diferencias significativas ($P < 0.005$)

*IW (Initial Weight por sus siglas en inglés IW) peso inicial

×FW (Final Weight por sus siglas en inglés FW) peso final

*Peso inicial promedio (g fish⁻¹)

×Peso final promedio (g fish⁻¹)

SGR (Specific growth ratio por sus siglas en inglés) tasa de crecimiento específico (expresado en % día⁻¹)

FCR (Feed convertio ratio por sus siglas en inglés FCR) g de alimento seco consumido/g de peso húmedo ganado

NUTRICIÓN Y PROMOCIÓN DEL RENDIMIENTO DE CRECIMIENTO

AMINOÁCIDOS

Las proteínas son nutrientes indispensables para la estructura y función de los peces. Estos requieren una mezcla balanceada de aminoácidos esenciales (AAE) y no esenciales (AANE) [27]. Los aminoácidos (AA) son precursores de muchas vías para síntesis de componentes biológicos, formando proteínas que pueden usarse como sustratos para energía [14]. La deficiencia de uno o más AA altera la síntesis de proteínas y por lo tanto el crecimiento [28].

La temperatura es un factor estresante para los peces y, bajo esta situación, se incrementa el requerimiento de los aminoácidos, lo cual podría estar relacionado con la síntesis o degradación de proteínas y otros compuestos referentes a la respuesta al estrés [29]. Ya se ha revisado el rol de ciertos aminoácidos y sus metabolitos sobre las rutas metabólicas que son necesarias para crecimiento [30] y resistencia a estresores ambientales en peces [31]; a continuación se describen algunos.

Los aminoácidos de cadena ramificada —la leucina, isoleucina y valina— juegan un papel importante en la regulación de síntesis de proteínas en el músculo esquelético [32]. La leucina activa directamente la proteína mTOR en músculo esquelético y estimula la fosforilación de p70S6 y 4E-BP1 para señalar la traducción y la síntesis de proteína [33].

Se ha observado que disminuyen los niveles de los aminoácidos de cadena ramificada en el plasma sanguíneo de los peces [34], resultando de importancia su inclusión en el alimento para mitigar los efectos negativos del estrés.

En el salmón, los aminoácidos de cadena ramificada se vincularon al mantenimiento de la masa corporal que presentó durante el ejercicio forzado [35], un grupo de ciprínido (*Magalobrama amblycephala*) fue alimentado con una dieta alta en leucina, y mostró una tasa específica de crecimiento más acelerado (SGR: 2.68 %/día) que el grupo con la dieta más baja en concentración de leucina (2.31 %/día). El experimento se hizo entre 28 y 30 °C [36].

Se ha observado que el triptófano exógeno disminuye el canibalismo, incrementa la supervivencia y mejora el crecimiento en varias especies [37], varios grupos de trucha arcoíris fueron alimentados con diferentes niveles de triptófano para saber cuál tendría mayor efecto sobre el crecimiento; el grupo que consumió mayor cantidad obtuvo un crecimiento específico de 1.60 %/día, con un peso de 53.02 g a 15°C, fue el tra-



tamiento con mayor crecimiento de las 6 harinas estudiadas [38].

La histidina es un aminoácido esencial para la síntesis de las células del ojo; de hecho, es el aminoácido que reduce la incidencia de cataratas en los salmones [39], y se ha descubierto que mientras mayor es la concentración de histidina en el alimento, menor probabilidad hay de que los peces padezcan cataratas [40]. Durante los primeros 24 días del desarrollo, los salmones no estériles alimentados con histidina en bajas y altas concentraciones tuvieron una tasa de crecimiento específico mayor (0.89 ± 0.04 y 0.94 ± 0.03 a 16°C) en comparación con aquellos no estériles y alimentados con histidina en bajas y altas concentraciones (0.70 ± 0.04 10°C) [41].

La tirosina es un precursor común para hormonas y neurotransmisores, es relacionada con el consumo de alimento, el crecimiento y la supervivencia del pez [31]. Se sabe que la tirosina se encuentra en niveles altos en plasma sanguíneo de la tilapia cuando está en estrés agudo [42], la tirosina es sintetizada a partir de la fenilalanina, y se ha visto que, en una dieta con una proporción baja en fenilalanina y alta en tirosina, el crecimiento se ve afectado en comparación con una dieta en la que la fenilalanina es mayor que la tirosina, (fen:tir 30:70 23.5 g, 70:30 37:7 g a 27°C) [43].

[44] realizaron un experimento para determinar los requerimientos de lisina para el crecimiento rápido del salmón, por lo que fue alimentado con dietas con concentración gradual de lisina (2.85 a 9 g de Lisina), estos alimentos no afectaron el crecimiento, pero la acreción proteica (formación de tejido muscular) sugiere un suministro de lisina de 5.04 g por 16 de nitrógeno [45]. La lisina no solo afecta la tasa de deposición proteica en el cuerpo de la trucha, sino que también la concentración de aminoácidos que se utiliza para la proteína del cuerpo, lo que indica que los peces pueden depositar diferentes tipos de proteínas con diferentes perfiles de aminoácidos en el alimento, pero dependerán de la concentración de lisina [46]; además, la lisina es el principal componente del tejido conectivo [46].

La arginina es un aminoácido esencial en los peces, y puede sintetizarse a partir de glutamato en bagres de canal (*Ictalurus punctatus*) [47], ya que la suplementación de arginina en el alimento provoca el incremento de citrulina, glutamato y glutamina en el plasma sanguíneo, mientras que la suplementación de glutamato reduce la necesidad de arginina [48]. La arginina potencializa la ganancia en peso diaria, la ingesta, la síntesis de proteína en músculo, y es un aminoácido dedicado a soportar el crecimiento rápido. En el salmón atlántico se observó cómo aumentó el crecimiento con la suplementación de glutamato en el alimento

[49]. [48] registraron que el incremento de arginina en el alimento mejoraba la ganancia en peso y la eficiencia proteica. La mayor cantidad de arginina en 4 % alcanzó una ganancia en peso de 134.5 %, mientras que con la menor concentración de arginina sólo se logró el 51% de ganancia en peso con respecto a la inicial [48].

En la fase de agua salada, el salmón Atlántico sufre condiciones ambientales variables que afectan la fisiología y metabolismo del pez [41]. Por esta razón se evaluó la suplementación en la alimentación para ayudar a aumentar la tasa de crecimiento en estos periodos tan particulares [49]. La suplementación de arginina y el glutamato en las dietas aumentaron significativamente la tasa de ingesta y el crecimiento en condiciones invernales, alcanzado un incremento en peso de 1.39 ± 0.05 %/día en comparación con el obtenido en verano, que fue menor 0.91 %/día [49].

La metionina es un aminoácido esencial y puede usarse para sintetizar cisteína [50]. La metionina está involucrada en la síntesis de proteína [44]. El salmón Atlántico en etapa juvenil alimentado con baja cantidad de metionina obtuvo menor ganancia en peso en comparación con salmones en los que el crecimiento no se afectó debido a la ingesta de metionina [51]. En la trucha arcoíris se observó que la deficiencia de metionina afectó la síntesis de proteína a través de la desactivación de las cascadas de señalización de mTOR [52]. De forma contraria, la suplementación de metionina en la alimentación de juveniles de trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) no tuvo efecto en la conversión a proteína [13].

LÍPIDOS O ÁCIDOS GRASOS

Los ácidos grasos esenciales se definen como aquellos que los animales deben obtener a través de la ingestión porque son incapaces de producirlos por sí solos. Por esta razón deben proveerse a través de la alimentación; de lo contrario, si existe una deficiencia de ácidos grasos, los efectos serían negativos, por ejemplo, la reducción del crecimiento [53].

Los peces de interés comercial tienen diferentes requerimientos de ácidos grasos esenciales, pero en general los peces de agua salada son incapaces de sintetizar ácidos grasos de cadena muy larga (*very long chain polyunsaturated fatty acids*, VLCPUFAS, por sus siglas en inglés), tales como el ácido araquidónico (20:4n-6, ARA), ácido eicosapentanoico (20:5n-3, EPA) y el ácido docosahexaenoico (22:6n-3DHA) [54].

En contraste, los peces de agua dulce generalmente son capaces de sintetizar VLCPUFAS, pero lo hacen a partir del ácido linoleico (18:2n-6, LA) o ácido linolénico (18:3n-3, LNA) [55]. En estudios con alimentos que con-

tienen gran cantidad de LA proveniente del aceite de soya, se ha generado mayor crecimiento ($3.8 \pm 0.2\%$ /día con un peso final de 14.8 ± 1.5 g) de la tilapia (*Oreochromis niloticus*) comparada con tilapia alimentada únicamente con aceite de pescado ($3.7 \pm 0.2\%$ /día con un peso final 14.5 ± 1.4 g) [56].

Por otra parte, los ácidos desarrollan la función estructural a través de la membrana celular, ya que las deficiencias de ácidos grasos esenciales producen fragilidad en las membranas celulares [14] [57]. La fluidez de la membrana y el grado de insaturación de los ácidos grasos están en relación, ya que el aumento de la insaturación implica mayor fluidez en la membrana, lo cual está vinculado con la adaptación homeoviscosa, la causa por la cual los animales poiquiloterms, como los peces, se adaptan a los cambios de la temperatura [14].

ALIMENTACIÓN NO TRADICIONAL EN LOS PECES BAJO DIFERENTE CONDICIÓN DE TEMPERATURA

La incorporación de ingredientes a partir de fuentes vegetales en los alimentos para peces es una práctica usada debido a la gran abundancia y bajo costo en comparación con FM. No obstante, existe otra amplia variedad de componentes que no son de origen vegetal, los cuales tienen un importante potencial para ser considerados en la composición de alimentos para peces; entre ellos resaltan fuentes no tradicionales que incluyen insectos, sangre, piel, subproductos de la producción de aves, y microorganismos como levaduras y microalgas.

Cada uno de los recursos no tradicionales poseen en su composición AAE que les confieren a los peces la capacidad de mantener el rendimiento de crecimiento, pero al mismo tiempo les permite enfrentar condiciones ambientales en niveles que pueden considerarse agentes estresantes. Uno de ellos es la temperatura, la cual afecta tanto el crecimiento como la salud del pez.

En la tabla 2 se muestran los artículos en los que se describe el efecto de alimentos sobre el crecimiento de los peces bajo condiciones de temperatura diferentes a la óptima, y en dichos alimentos se reemplaza parcial o totalmente FM y FO con alguna fuente no tradicional, o el alimento es suplementado con aminoácidos o ácidos grasos. Los trabajos obtienen como resultado que los compuestos de los alimentos alternativos o novedosos confieren a los peces los nutrientes que les permiten no sólo aumentar su crecimiento [41] en términos de tasa instantánea de crecimiento (G) o la tasa específica de crecimiento (SGR), sino también crecer en condiciones ambientales adversas.

Tabla 2. Estudios enfocados a la evaluación del alimento a diferentes temperaturas

ESPECIE	FUENTE DE ALIMENTO	TEMPERATURA	REFERENCIA
<i>Dicentrarchus labrax</i>	Bioimin AquaStar Growout	17, 20 y 23 °C	Cross effects of dietary probiotic supplementation and rearing temperature on growth performance, digestive enzyme activities, cumulative mortality, and innate immune response in seabass (<i>Dicentrarchus labrax</i>) [59]
<i>Dicentrarchus labrax</i>	<i>Bacillus</i> sp <i>Enterococcus</i> sp <i>Pediococcus</i> sp	17, 20 y 23 °C	Cross effects of dietary probiotic supplementation and rearing temperature on antioxidant responses in European seabass (<i>Dicentrarchus labrax</i> (Linnaeus, 1758)) juveniles [60]
<i>Oreochromis niloticus</i>	<i>Musca domestica</i>	26°C	A comprehensive evaluation of replacing fishmeal with housefly (<i>Musca domestica</i>) maggot meal in the diet of Nile tilapia (<i>Oreochromis niloticus</i>): growth performance, flesh quality, innate immunity, and water environment [61]
<i>Oreochromis niloticus</i>	Aceite de linaza, girasol, oliva y cacahuete	22 y 28 °C	Dietary lipid sources affect the performance of Nile tilapia at optimal and cold, suboptimal temperatures [62]
<i>Apostichopus japonicus</i>	Niveles de carbohidratos	30 °C	Effect of dietary carbohydrate levels on growth performance, non specific immune enzymes and acute response to low salinity and high temperature of juvenile sea cucumber (<i>Apostichopus japonicus</i>) [63]
<i>Carpa común</i>	Maíz procesado	20 y 30 °C	Effect of temperature on digestibility, growth performance and nutrient utilization of corn distiller's dried grains with soluble (DDGS) in Common carp juveniles [64]



ESPECIE	FUENTE DE ALIMENTO	TEMPERATURA	REFERENCIA
<i>Apostichopus japonicus</i>	Niveles de carbohidratos	30 °C	Effect of dietary carbohydrate levels on growth performance, non specific immune enzymes and acute response to low salinity and high temperature of juvenile sea cucumber (<i>Apostichopus japonicus</i>) [63]
Carpa común	Maíz procesado	20 y 30 °C	Effect of temperature on digestibility, growth performance and nutrient utilization of corn distiller's dried grains with soluble (DDGS) in Common carp juveniles [64]

ESPECIE	FUENTE DE ALIMENTO	TEMPERATURA	REFERENCIA
<i>Siniperca chuatsi Ctenopharyngodon idellus</i>	Dieta experimental	19, 24 y 29 °C	Ammonia nitrogen excretion in Mandarin Fish (<i>Siniperca chuatsi</i>) and Grass Carp (<i>Ctenopharyngodon idellus</i>) fed practical diets: the effects of water temperature [65]
<i>Tinca tinca (L.)</i>	Larva de Chironomidae	20, 23 y 26 °C	Diet and water temperature affect growth and body deformities in juvenile tench (<i>Tinca tinca L.</i>) reared under controlled conditions [66]
<i>Acipenser oxyrinchus Mitchill, 1815</i>	Artemia enriquecida con omega-3		Influence of temperature and (Artemia) enriched with 3 PUFAS on the early ontogenesis of Atlantic sturgeon (<i>Acipenser oxyrinchus Mitchill, 1815</i>) [67]
<i>Panopea zelandica</i>	Tisochrysis lutea Chaetoceros muelleri	7.5, 11.5 y 16.5 °C	Biochemical composition of New Zealand gooduck clam broodstock (<i>Panopea zelandica</i>) conditioned under different temperature and feeding regimes [68]

ESPECIE	FUENTE DE ALIMENTO	TEMPERATURA	REFERENCIA
<i>Oreochromis niloticus</i>	PUFA'S Proporción n-3/n-6	22 y 28 °C	Dietary ratios of n3/n6 fatty acids do not affect growth of Nile tilapia (<i>Oreochromis niloticus</i>) at optimal temperatures (28 °C) nor at temperatures that simulate the onset of winter (22 °C) [69]
<i>Acipenser baerii</i>	No fed	16,19 y 22 °C	Effect of temperature on fatty acid composition and development of unfed Siberian sturgeon (<i>Acipenser baerii</i>) larvae [70]
<i>Dosinia ponderosa</i>	Microalgae	20, 25 y 30 °C	Gonadic conditioning and maturation of the queen conch (<i>Dosinia ponderosa</i>) fed three microalgae at three temperatures [71]
<i>Scophthalmus macimus</i>	Fructooligosacáridos	15 y 20 °C	Effects of rearing temperature and dietary short&chain fructooligosaccharides supplementation on allochthonous gut microbiota, digestive enzymes activities and intestine health of turbot (<i>Scophthalmus maximus L.</i>) juveniles [72]

MICROORGANISMOS

LEVADURAS

Algunos estudios con levadura (*Saccharomyces cerevisiae*) describen que cerca de un 40 % de FM puede ser reemplazado sin tener efectos negativos en el rendimiento del crecimiento de la trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) [73]. En salmón atlántico (*Salmo salar*) no hubo diferencia significativa para SGR 1.36 ± 0.03 y 1.32 ± 0.01 % g día⁻¹ al comparar el alimento FM con levadura *Candida utilis*, aunque la temperatura se mantuvo en un rango de 8.8 °C a 14.5 °C [74]. Trucha alpina (*Salvelinus alpinus*) se alimentó con levadura *Saccharomyces cerevisiae* a 7.1 ± 1.8 °C y no hubo diferencia estadística en SGR con 1.08 y 1.02 % g día⁻¹ respectivamente en comparación con una dieta de referencia [75].

La trucha arcoíris y algunos salmones se cultivan en estanques o jaulas, donde son vulnerables al incremento de la temperatura del agua a causa de las estaciones y el cambio climático; es decir, a temperaturas arriba de la óptima para crecimiento (> 17 °C), lo que

puede inducir estrés y reducir el crecimiento [58]. Por esta razón, se evaluaron dos alimentos en la trucha arcoíris con reemplazo del 40 % de FM con levadura viva *Saccharomyces cerevisiae*, con tratamientos bajo dos temperaturas 11 °C y 18 °C. Al comparar ambos experimentos, no se encontró diferencia significativa para la SGR 0.91 ± 0.10 y 1.16 ± 0.10 % g día⁻¹ para 11°C y 1.07 ± 0.03 y 1.18 ± 0.03 % g día⁻¹ para 18°C. Por otra parte, la levadura viva consumida por los peces cultivados a temperatura por encima de la óptima puede poner en peligro su vida, ya que induce la pérdida de bacterias benéficas en el intestino [58].

Las fuentes de proteína como las levaduras *Candida utilis* y *Saccharomyces cerevisiae* han mostrado que contienen AAE en concentración similar a FM en su composición química. Por ejemplo, la levadura *Candida utilis* posee a la histidina y arginina en la misma concentración que FM, mientras que leucina, lisina, fenilalanina, treonina, valina y triptófano se encuentran en mayor cantidad [74]. La levadura *Saccharomyces cerevisiae*, en cuanto a los AAE, contiene en misma cantidad histidina, y en mayor cantidad isoleucina, leucina, lisina, metionina, fenilalanina y valina, dichos aminoácidos son comparados con el alimento de referencia utilizado en el experimento [73]. Los AAE mencionados en dichas fuentes de proteína están involucrados en el mejoramiento del rendimiento del crecimiento. Cabe mencionar que el salmón creció igual con FM que con la levadura *Candida utilis* en un gradiente de temperatura decreciente a lo largo del tiempo.

MICROALGAS

Las microalgas tienen gran potencial como ingrediente en alimentos para la acuicultura; ellas han mostrado un perfil nutricional similar a FM. Entre las especies de microalga con interés para la acuicultura se encuentran *Chlorella sp.*, *Scenedesmus sp.*, *Spirulina sp.*, *Dunaliella sp.*, *Nannochloropsis sp.* En revisiones anteriores de las 7 principales clases de microalga se ha visto que no existe variación en la composición de aminoácidos [76], lo mismo sucede con la composición de lípidos, que incluye ácidos grasos poliinsaturados, ácido eicosapentanoico y ácido graso docosahexaenoico [76].

Por su parte, los estudios con microalgas han mostrado efectos positivos en el crecimiento, supervivencia, pigmentación y respuesta inmune en peces y crustáceos. El grupo de microalga *Nannochloropsis sp.* son organismos con alto potencial para la preparación de alimentos para la acuicultura [77] que ha mostrado ser un buen sustituto de harina de pez para mejorar el alimento, ya que con 2.5 % a 10 % se pueden obtener resultados positivos en el crecimiento y supervivencia

de los peces [78].

La tilapia macho en etapa juvenil alimentada con microalga *Nannochloropsis salina* (35 % proteína) a 27 °C alcanzó un peso de 39.8 g en 36 días [9]. Al reemplazar el 33 % de harina de pescado por microalga *Nannochloropsis oculata* en la tilapia a 27.7 °C, se observó un crecimiento de 28.6 g en 84 días [79].

INSECTOS

Los insectos son parte de la dieta natural de peces marinos y de agua dulce; además, dentro de los organismos que son aptos para consumo, son posibles alternativas de fuente de macronutrientes y micronutrientes [5] de gran importancia. Uno de los insectos con mayor potencial es la mosca soldado (*Hermetia illucens*), de la cual se pueden aprovechar dos etapas de su desarrollo, la forma larval y la adulta [80].

Estudios hechos por [80] utilizaron a la mosca soldado como sustituto de la harina de pescado en el salmón atlántico, y obtuvieron un incremento en la eficiencia de conversión de alimentos en dietas de 25, 50 y 100 % de mosca soldado (*Hermetia illucens*) y ninguna diferencia entre los grupos de dietas de 25, 50 y 100 % en las pruebas sensoriales de los filetes [80]. Para la trucha arcoíris, el alimento con 50 % de mosca soldado negra (*Hermetia illucens*) mostró menor ganancia en peso en los peces alimentados con harina de pescado que aquellos alimentados con insecto como sustituto de la harina de pescado. Tampoco hubo diferencia significativa entre las dietas con fuente de insecto, con harina de pescado y la dieta control para los parámetros de ganancia de peso, tasa de conversión de alimentos, lo que se traduce en la alternativa de un alimento de bajo costo y que cumple los requisitos nutricionales para el crecimiento normal [81]. El bagre amarillo fue alimentado con el 25 % de larva de mosca soldado, y no hubo diferencia significativa en el índice de crecimiento y de inmunidad cuando se comparó con el grupo control con dieta sin ninguna fuente nutricional de insecto [80].

Los trabajos realizados con alimentos a base de larva de mosca soldado (*Hermetia illucens*) han reportado que la tilapia con un nivel de proteína del 50 % alcanzó la mayor ganancia en peso de 8.74, con una tasa de crecimiento específica de 2.43 % [19]; sin embargo, no se mencionan las condiciones de cultivo de la prueba. En comparación con el alimento a base de otros animales, como la lombriz (*Eisenia foetida*) y el helecho acuático (*Azolla filiculoides*), en alevines de tilapia (*Oreochromis niloticus*) en condiciones de 27 °C y 5.42 mg/l de oxígeno disuelto, para el día 60 alcanzaron un peso de 11 g con una tasa de crecimiento específica de



1.25, pero encontraron exceso de lisina [82].

PERSPECTIVAS Y CONCLUSIONES

De acuerdo con la información revisada a lo largo del trabajo, tanto la larva de mosca soldado como la microalga ofrecen los nutrientes que conferirán a los organismos acuáticos la capacidad de acelerar su tasa de crecimiento en condiciones óptimas de temperatura y soportar temperaturas diferentes a la de preferencia.

Pero los esfuerzos aún son muy pocos y aislados; escasos son los trabajos en los que se han realizado pruebas para conocer los indicadores productivos con alimentos en los que se ha reemplazado parcial o totalmente el FM y FO, y muestran la posibilidad de crecer en condiciones ambientales adversas.

Conocer cómo se comportan los valores de los indicadores productivos de los peces alimentados con microalga y larva de mosca soldado permitirá ampliar su uso, no sólo para sistemas productivos intensivos, sino que también en los extensivos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo durante toda esta investigación, de la misma manera al Laboratorio de Bioingeniería Campus Amazcala y Laboratorio de Bioingeniería Acuícola Campus Concá pertenecientes a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro.

REFERENCIAS

- [1] FAO, *The State of World Fisheries and Aquaculture*, vol. 367. Rome, Italy, 2018.
- [2] A. Flores, "Contexto, perspectivas y retos para incrementar la contribución de la pesca y la acuicultura a la seguridad alimentaria y nutricional y las economías territoriales en América Latina y el Caribe". - Alimentación, agricultura y desarrollo rural en América Latina. Santiago de Chile, 2019.
- [3] A.R. Hodar y R. Vasava, "Fish meal and fish oil replacement for aquafeed formulation by using alternative sources: A review", *Journal of Experimental Zoology India*, vol. 23, núm. 1, pp. 13–21, 2020.
- [4] M.A. O. Dawood y K. Shunsuke, "Application of fermentation strategy in aquafeed for sustainable aquaculture", *Aquaculture*, pp. 1–16, 2019.
- [5] F.G. Barroso, C. de Haro, M. J. Sánchez-Muros, E. Venegas, A. Martínez-Sánchez, y C. Pérez-Bañón, "The potential of various insect species for use as food

for fish", *Aquaculture*, vol. 422–423, pp. 193–201, 2014.

[6] K.R. Salin, V.V. Arun, C.M. Nair, y J.H. Tidwell, *Sustainable Aquaculture*. Springer Int. Publishing, 2018.

[7] G. M. Turchini, J.T. Trushenski, y B.D. Glen-cross, "Thoughts for the Future of Aquaculture Nutrition: Realigning Perspectives to Reflect Contemporary Issues Related to Judicious Use of Marine Resources in Aquafeeds", *North American Journal of Aquaculture*, vol. 81, núm. 1, pp. 13–39, 2019.

[8] V. C. Cummins Jr, S.D. Rawles, K.R. Thompson, A. Velasquez, Y. Kobayashi, J. Hager, C.D. Webster, "Evaluation of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae meal as partial or total replacement of marine fish meal in practical diets for Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*)", *Aquaculture*, vol. 473, pp. 337–344, 2017.

[9] I. Lupatsch y O.K. Gbadamosi, "Evaluating *Nannochloropsis*-based feeds for tilapia", *Global Aquaculture Advocate*, 2018.

[10] E. Devic, W. Leschen, F. Murray, y D.C. Little, "Growth performance, feed utilization and body composition of advanced nursing Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fed diets containing Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) larvae meal", *Aquaculture Nutrition*, vol. 24, núm. 1, pp. 416–423, 2017.

[11] S.R. Shaikh, J. J. Kinnun, X. Leng, J.A. Williams, y S.R. Wassall, "How polyunsaturated fatty acids modify molecular organization in membranes: Insight from NMR studies of model systems", *Biochimica et Biophysica Acta*, vol. 1848, núm. 1, pp. 211–219, ene. 2015.

[12] B. Sadoul y M. Mathilakath, "Stress and Growth", en *Biology of stress in fish*, vol. 35, Elsevier Inc., 2016, pp. 167–205.

[13] I. Seilliez, J.C. Garillard, M. Riffade, B. Sadoul, K. Dias, J. Avérous, "Amino acids downregulate the expression of several autophagy-related genes in rainbow trout myoblasts", *Autophagy*, vol. 8, núm. 3, pp. 364–375, mar. 2012.

[14] D. Montero y M.S. Izquierdo, "Efecto de los Lípidos Dietéticos en la Salud y Resistencia al Estrés", *Nutrición Acuicola UANL* p. 282–297, 2000.

[15] K.T. Stiller, K.H. Vanselow, D. Moran, G. Riesen, W. Koppe, C. Dietz, C. Schulz, "The effect of diet, temperature and intermittent low oxygen on the metabolism of rainbow trout", *The British Journal of Nutrition*, vol. 117, núm. 6, pp. 784–795, 2017.

[16] T.S. Aas, B.F. Terjesen, T. Sigholt, M. Hillestad, J. Holm, S. Refstie, G. Baevefjord, K.A. Rorvik, M. Sorensen, M. Oehme, T. Asgard, "Nutritional responses in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed diets with different physical qualities at stable or variable environmental conditions", *Aquaculture Nutrition*, vol. 17, núm. 6, pp. 657–670, 2011.

[17] G.A. Peña Herrejón, J. Sanchez Velazquez, H.

Aguirre Becerra, y F. García Trejo, "Thermal feasibility of tilapia production under greenhouse conditions in a semi-desert region of Mexico", 2016 12th Congreso Internacional de Ingeniería CONIIN 2016, pp. 1–5, 2016.

[18] M. Herrera, J.M. Mancera, y B. Costas, "The use of dietary additives in fish stress mitigation: Comparative endocrine and physiological responses", *Frontiers in Endocrinology*, vol. 10, núm. , pp. 1–22, 2019.

[19] H. Muin, N. M. Taufek, M.S. Kamarudin, y S.A. Razak, "Growth performance, feed utilization and body composition of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) (Linnaeus, 1758) fed with different levels of black soldier fly (*Hermetia illucens*) (Linnaeus, 1758) maggot meal diet", *Iranian Journal of Fisheries Science*, vol. 16, núm. 2, pp. 567–577, 2017.

[20] A.M. El Asely, R.M. Reda, A.S. Salah, M.A. Mahmoud, y M.A.O. Dawood, "Overall performances of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) associated with using vegetable oil sources under suboptimal temperature", *Aquaculture Nutrition*, vol. 26, núm. 4, pp. 1154–1163, ago. 2020.

[21] K.D. Hopkins, "Reporting Fish Growth: A Review of the Basics", *Journal of the World Aquaculture Society*, vol. 23, núm. 3, pp. 173–179, 1992.

[22] V. Lugert, G. Thaller, J. Tetens, C. Schulz, y J. Krieter, "A review on fish growth calculation: multiple functions in fish production and their specific application", *Reviews in Aquaculture*, vol. 8, núm. 1, pp. 30–42, mar. 2016.

[23] E. Larios Soriano, "Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada , Baja California Maestría en Ciencias de la Vida con orientación en Biomedicina y Biotecnología Metástasis en hueso e inmunoterapia", CICESE, 2018.

[24] M.L. Fanjul, "Temperatura", en *Biología funcional de los animales*, M. L. Fanjul, M. Hiriart, y F. Fernández de Miguel, Eds. México: Siglo XXI editores, 1998, pp. 440–471.

[25] M. Martínez Porchas, M.C.L. Rafael, y R. Ramos-Enríquez, "Dinámica del crecimiento de peces y crustáceos", *Rev. Elec. Vet.*, vol. 10, núm. 10, pp. 1–16, 2009.

[26] A.F.M. El-Sayed y M. Kawanna, "Optimum water temperature boosts the growth performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fry reared in a recycling system", *Aquaculture Research*, vol. 39, núm. 6, pp. 670–672, abr. 2008.

[27] A. Ibarz, J. Blanco, y J. Fernández, "Bases metabólicas de la nutrición.", en *Piscicultura marina en Latinoamérica*, Barcelona: Universitat de Barcelona, 2011, pp. 96–111.

[28] L. Conceição, R. Ozorio, E. Surud, y J. Verreth, "Amino acids profiles and amino acid utilization in larval African catfish (*Clarias gariepinus*): effects of

ontogeny and temperature", *Fish Physiology and Biochemistry*, vol. 19, pp. 43–57, 1998.

[29] L. Conceição, C. Aragão, J. Dias, B. Costas, G. Terova, y C. Martins, "Dietary nitrogen and fish welfare", *Fish Physiology and Biochemistry*, vol. 38, pp. 119–141, 2012.

[30] S. Hoseini, A. Perez, B. Costas, R. Azeredo, y M. Gesto, "Physiological roles of tryptophan in teleosts: current knowledge and perspectives for future studies", *Review Aquaculture*, vol. 11, pp. 3–24, 2019.

[31] P. Li, K. Mai, J. Trushenski, y G. Wu, "New developments in fish amino acid nutrition: towards functional and environmentally oriented aquafeeds" *Amino Acids*, pp. 43–53, 2009.

[32] F. Yoshizawa, "Regulation of protein synthesis by branched-chain amino acids in vivo.", *Biochemical Biophysical Research Communications*, vol. 313, pp. 417–422, 2004.

[33] R. Manders, J. Little, S. Forbes, y D. Candow, "Insulinotropic and Muscle Protein Synthetic Effects of Branched-Chain Amino Acids: Potential Therapy for Type 2 Diabetes and Sarcopenia", *Nutrients*, vol. 4, núm. 11, pp. 1664–1678, nov. 2012.

[34] B. Costas, C. Aragão, J. M. Mancera, M. T. Dinis, y L. E. C. Conceição, "High stocking density induces crowding stress and affects amino acid metabolism in Senegalese sole (*Solea senegalensis*) (Kaup 1858) juveniles", *Aquaculture Research*, vol. 39, núm. 1, pp. 1–9, dic. 2007.

[35] B. Grisdale-Helland, H. Takle, y S. J. Helland, "Aerobic exercise increases the utilization efficiency of energy and protein for growth in Atlantic salmon post-smolts", *Aquaculture*, vol. 406–407, pp. 43–51, ago. 2013.

[36] M. Ren, H.M. Michael, H. Tsion, B. Liu, L. Miao, X. Ge, J. Xie, H. Liang, Q. Zhou, L. Pan, "Dietary leucine level affects growth performance, whole body composition, plasma parameters and relative expression of TOR and TNF- in juvenile blunt snout bream, (*Megalobrama amblycephala*)", *Aquaculture*, vol. 448, pp. 162–168, nov. 2015.

[37] J. Hseu, F. Lu, H. Su, L. Wang, C. Tsai, y P. Hwang, "Effect of exogenous tryptophan on cannibalism, survival and growth in juvenil gruper, (*Epinephelus coioides*).", *Aquaculture*, vol. 218, pp. 251–263, 2003.

[38] M. J. Walton, R. M. Coloso, C. B. Cowey, J. W. Adron, y D. Knox, "The effects of dietary tryptophan levels on growth and metabolism of rainbow trout (*Salmo gairdneri*)", *British Journal of Nutrition*, vol. 51, núm. 02, p. 279, 1984.

[39] O. Breck, E. Bjerkas, J. Sanderson, R. Waagbo, y P. Campbell, "Dietary histidine affects lens protein turnover and synthesis of N-acetylhistidine in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) undergoing parr-smolt trans-



formation", *Aquaculture Nutrition*, vol. 11, núm. 5, pp. 321–332, oct. 2005.

[40] R. Waagbo, C. Tröbe, W. Koppe, R. Fontanillas, y O. Breck, "Dietary histidine supplementation prevents cataract development in adult Atlantic salmon, (*Salmo salar* L.), in seawater", *British Journal of Nutrition*, vol. 104, núm. 10, pp. 1460–1470, nov. 2010.

[41] F. Sambras, P.G. Fjellidal, S.C. Remo, E.M. Hevroy, T.O. Nilsen, A. Thorsen, T.J. Hansen, R. Waagbo, "Water temperature and dietary histidine affect cataract formation in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) diploid and triploid yearling smolt", *Journal of Fish Diseases*, vol. 40, núm. 9, pp. 1195–1212, sep. 2017.

[42] M.M. Vijayan, C. Pereira, E.G. Grau, y G.K. Iwama, "Metabolic Responses Associated with Confinement Stress in Tilapia: The Role of Cortisol", *Comparative Biochemistry Physiology Part C Pharmacology Toxicology Endocrinology*, vol. 116, núm. 1, pp. 89–95, ene. 1997.

[43] S. Castillo, S. Halligan, y D. M. Gatlin, "Growth Responses of Juvenile Red Drum *Sciaenops ocellatus* to Dietary Phenylalanine and Tyrosine Can Be Used to Calculate the Total Aromatic Amino Acid Requirement", *Journal of Nutrition*, vol. 145, núm. 10, pp. 2341–2346, oct. 2015.

[44] M. Espe, E. Veiseth-Kent, J.-E. Zerrahn, I. Ronnestad, y A. Aksnes, "Juvenile Atlantic salmon decrease white trunk muscle IGF-1 expression and reduce muscle and plasma free sulphur amino acids when methionine availability is low while liver sulphur metabolites mostly is unaffected by treatment", *Aquaculture Nutrition*, vol. 22, núm. 4, pp. 801–812, ago. 2016.

[45] M. Espe, A. Lemme, A. Petri, y A. El-Mowafi, "Assessment of lysine requirement for maximal protein accretion in Atlantic salmon using plant protein diets", *Aquaculture*, vol. 263, núm. 1–4, pp. 168–178, mar. 2007.

[46] P. Encarnação, C. de Lange, M. Rodehutscord, D. Hoehler, W. Bureau, y D. P. Bureau, "Diet digestible energy content affects lysine utilization, but not dietary lysine requirements of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) for maximum growth", *Aquaculture*, vol. 235, núm. 1–4, pp. 569–586, jun. 2004.

[47] J.A. Buentello y D.M. Gatlin, "The dietary arginine requirement of channel catfish (*Ictalurus punctatus*) is influenced by endogenous synthesis of arginine from glutamic acid", *Aquaculture*, vol. 188, núm. 3–4, pp. 311–321, sep. 2000.

[48] C. Pohlenz, A. Buentello, S. le J Helland, y D. M. Gatlin, "Effects of dietary arginine supplementation on growth, protein optimization and innate immune response of channel catfish (*Ictalurus punctatus*) (Rafinesque 1818)", *Aquaculture Research*, vol. 45, núm. 3, pp. 491–500, feb. 2014.

[49] M. Oehme, F. Grammes, H. Takle, J.L. Zambonino, S. Refstie, M.S Thomassen, K.A. Rovik, B.F. Terjesen, "Dietary supplementation of glutamate and arginine to Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) increases growth during the first autumn in sea", *Aquaculture*, vol. 310, núm. 1–2, pp. 156–163, dic. 2010.

[50] M. Espe, S.M. Andersen, E. Holen, I. Ronnestad, E.V. Kent, J.E. Zerrahn, A. Aksnes, "Methionine deficiency does not increase polyamine turnover through depletion of hepatic S-adenosylmethionine in juvenile Atlantic salmon", *British Journal of Nutrition*, vol. 112, núm. 8, pp. 1274–1285, oct. 2014.

[51] M. Espe, E.M. Hevroy, B. Liaset, A. Lemme, y A. El-Mowafi, "Methionine intake affect hepatic sulphur metabolism in Atlantic salmon, *Salmo salar*", *Aquaculture*, vol. 274, núm. 1, pp. 132–141, ene. 2008.

[52] I. Belghit, S. Skiba-Cassy, I. Geurden, K. Dias, A. Surget, S. Kaushik, S. Panserat, I. Seiliez, "Dietary methionine availability affects the main factors involved in muscle protein turnover in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)", *British Journal of Nutrition*, vol. 112, núm. 4, pp. 493–503, ago. 2014.

[53] B.D. Glencross, "Exploring the nutritional demand for essential fatty acids by aquaculture species", *Review Aquaculture*, vol. 1, núm. 2, pp. 71–124, jun. 2009.

[54] D.R. Tocher, "Fatty acid requirements in ontogeny of marine and freshwater fish", *Aquaculture Research*, vol. 41, núm. 5, pp. 717–732, abr. 2010.

[55] B. Glencross y N. Rutherford, "Dietary strategies to improve the growth and feed utilization of barramundi, *Lates calcarifer* under high water temperature conditions", *Aquaculture Nutrition*, vol. 16, núm. 4, pp. 343–350, jun. 2009.

[56] B. Mulligan y J. Trushenski, "Use of Standard or Modified Plant-Derived Lipids as Alternatives to Fish Oil in Feeds for Juvenile Nile Tilapia", *Journal of Aquatic Food Product Technology*, vol. 22, núm. 1, pp. 47–57, ene. 2013.

[57] M. Gurr y J. Harwood, *Lipid Biochemistry. An introduction*, 4a ed., Londres: Chapman & Hall.

[58] D. Huyben, L. Sun, R. Moccia, A. Kiessling, J. Dicksved, y T. Lundh, "Dietary live yeast and increased water temperature influence the gut microbiota of rainbow trout", *Journal of Applied Microbiology*, vol. 124, núm. 6, pp. 1377–1392, jun. 2018.

[59] L. F. Pereira, M.J. Peixoto, P. Carvalho, K. Sansuwan, G.A. Santos, J.F.M. Gonzalez, R.O.A. Ozório, "Cross-effects of dietary probiotic supplementation and rearing temperature on growth performance, digestive enzyme activities, cumulative mortality and innate immune response in seabass (*Dicentrarchus labrax*)", *Aquaculture Nutrition*, vol. 24, núm. 1, pp. 453–460, feb. 2018.

- [60] L.F. Pereira J.F. M. Gonzalves M.J. Peixoto A. Domingues S. B. Fonseca F. A. Magalhães G. A. Santos R. O. A. Ozorio, "Cross-effects of dietary probiotic supplementation and rearing temperature on antioxidant responses in European seabass (*Dicentrarchus labrax* (Linnaeus, 1758)) juveniles", *Journal of Applied Ichthyology*, vol. 33, núm. 3, pp. 377–385, jun. 2017.
- [61] L. Wang, J. Li, J. N. Jin, F. Zhu, M. Roffeis, y X. Z. Zhang, "A comprehensive evaluation of replacing fishmeal with housefly (*Musca domestica*) maggot meal in the diet of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*): growth performance, flesh quality, innate immunity and water environment", *Aquaculture Nutrition*, vol. 23, núm. 5, pp. 983–993, oct. 2017.
- [62] C.F. Corrêa, R. O. Nobrega, B. Mattioni, J. M. Block, y D. M. Fracalossi, "Dietary lipid sources affect the performance of Nile tilapia at optimal and cold, suboptimal temperatures", *Aquaculture Nutrition*, vol. 23, núm. 5, pp. 1016–1026, oct. 2017.
- [63] Z. Li, X. Xue, H. Yang, M. Liao, Y. Han, Z. Jiang, T. Ren, "Effect of dietary carbohydrate levels on growth performance, non-specific immune enzymes and acute response to low salinity and high temperature of juvenile sea cucumber *Apostichopus japonicus*", *Aquaculture Nutrition*, vol. 26, núm. 3, pp. 683–692, jun. 2020.
- [64] N. Révész, S. Kumar, A.S. Bogevik, G. Fazekas, Z. Jeney, Á. Hegyi, Z.J. Sándor, "Effect of temperature on digestibility, growth performance and nutrient utilization of corn distiller's dried grains with soluble (DDGS) in Common carp juveniles", *Aquaculture Research*, vol. 51, núm. 2, pp. 828–835, feb. 2020.
- [65] L. Fang, X.L. Bai, X.F. Liang, S. He, X.Z. Guo, L. Li, B. Li, D. Shen, Y.X. Tao, "Ammonia nitrogen excretion in Mandarin Fish (*Siniperca chuatsi*) and Grass Carp (*Ctenopharyngodon idellus*) fed practical diets: the effects of water temperature", *Aquaculture Research*, vol. 48, núm. 3, pp. 836–843, mar. 2017.
- [66] R. Kaminski, J. Sikorska, y J. Wolnicki, "Diet and water temperature affect growth and body deformities in juvenile tench (*Tinca tinca* L.) reared under controlled conditions", *Aquaculture Research*, vol. 48, núm. 3, pp. 1327–1337, mar. 2017.
- [67] R. Kolman, O. Khudiyi, O. Kushniryk, L. Khuda, M. Prusinska, y G. Wiszniewski, "Influence of temperature and Artemia enriched with ω -3 PUFAs on the early ontogenesis of Atlantic sturgeon, (*Acipenser oxyrinchus* Mitchill, 1815)", *Aquaculture Research*, vol. 49, núm. 5, pp. 1740–1751, may 2018.
- [68] D. V Le, A. C. Alfaro, C. Pook, N. L. C. Ragg, Z. Hilton, y N. King, "Biochemical composition of New Zealand geoduck clam broodstock (*Panopea zelandica*) conditioned under different temperature and feeding regimes", *Aqua. Res.*, vol. 48, núm. 4, pp. 1799–1814, abr. 2017.
- [69] L.M. Mufatto, R.O. Nobrega, D. Menoyo, y D.M. Fracalossi, "Dietary ratios of n-3/n-6 fatty acids do not affect growth of Nile tilapia at optimal temperatures (28°C) nor at temperatures that simulate the onset of winter (22°C)", *Aquaculture Nutrition*, vol. 25, núm. 3, pp. 646–661, jun. 2019.
- [70] M. Vasconi, L. Aidos, A. Di Giancamillo, F. Bellagamba, C. Domeneghini, y V. M. Moretti, "Effect of temperature on fatty acid composition and development of unfed Siberian sturgeon (*A. baerii*) larvae", *Journal Applied Ichthyology*, vol. 35, núm. 1, pp. 296–302, feb. 2019.
- [71] E. Villanueva-Gutiérrez, L. F. Enríquez-Ocaña, J. A. López-Elias, M. del C. Garza-Aguirre, J. M. Mazón-Suástegui, y L. R. Martínez-Córdova, "Gonadic conditioning and maturation of the queen conch (*Dosinia ponderosa*) fed three microalgae at three temperatures", *Aquaculture Nutrition*, vol. 25, núm. 1, pp. 88–96, feb. 2019.
- [72] I. Guerreiro, P. Enes, A. Rodiles, D. Merrifield, y A. Oliva-Teles, "Effects of rearing temperature and dietary short-chain fructooligosaccharides supplementation on allochthonous gut microbiota, digestive enzymes activities and intestine health of turbot (*Scophthalmus maximus* L.) juveniles", *Aquaculture Nutrition*, vol. 22, núm. 3, pp. 631–642, jun. 2016.
- [73] D. Huyben, A. Nyman, A. Vidakovi, V. Passoth, R. Moccia, A. Kiessling, J. Dicksved, T. Lundh, "Effects of dietary inclusion of the yeasts (*Saccharomyces cerevisiae*) and (*Wickerhamomyces anomalus*) on gut microbiota of rainbow trout", *Aquaculture*, vol. 473, pp. 528–537, abr. 2017.
- [74] M. Overland, A. Karlsson, L. T. Mydland, O. H. Romarheim, y A. Skrede, "Evaluation of *Candida utilis*, *Kluyveromyces marxianus* and *Saccharomyces cerevisiae* yeasts as protein sources in diets for Atlantic salmon (*Salmo salar* L.)", *Aquaculture*, vol. 402–403, pp. 1–7, jul. 2013.
- [75] A. Vidakovic M. Langeland H. Sundh K. Sundell M. Olstorpe J. Vielma A. Kiessling T. Lundh, "Evaluation of growth performance and intestinal barrier function in Arctic Charr (*Salvelinus alpinus*) fed yeast (*Saccharomyces cerevisiae*), fungi (*Rhizopus oryzae*) and blue mussel (*Mytilus edulis*)", *Aquaculture Nutrition*, vol. 22, núm. 6, pp. 1348–1360, dic. 2016.
- [76] M.R. Brown, S.W. Jeffrey, J.K. Volkman, y G. Dunstan, "Nutritional properties of microalgae for mariculture", *Aquaculture*, vol. 151, núm. 1–4, pp. 315–331, may 1997.
- [77] Y. Yamasaki, K. Ishii, S. Taga, y M. Kishioka,



"Enhancement of dietary effect of *Nannochloropsis* sp. on juvenile (*Ruditapes philippinarum*) clams by alginate hydrolysates", *Aquaculture Reports*, vol. 9, núm. September 2017, pp. 31–36, 2018.

[78] J. Gamboa, Y.I. Morales, M.G. Nieto, D.A. Villarreal, y L.E. Cruz, "Assimilation of dietary nitrogen supplied by fish meal and microalgal biomass from *Spirulina* (*Arthrospira platensis*) and (*Nannochloropsis oculata*) in shrimp (*Litopenaeus vannamei*) fed compound diets", *Journal of Applied Phycology*, 2019.

[79] P.K. Sarker, A.R. Kapuscinski, A.Y. Bae, E. Donaldson, A.J. Sitek, D.S. Fitzgerald, O.F. Edelson, "Towards sustainable aquafeeds: Evaluating substitution of fishmeal with lipid-extracted microalgal co-product (*Nannochloropsis oculata*) in diets of juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)", *PLoS One*, vol. 13, núm. 7, pp. 1–25, 2018.

[80] A. Sánchez-López, "Potential of prepupae meal of the Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) as fish meal substitute: effects on growth performance and digestibility in European sea bass (*Dicentrarchus labrax*)", 2016.

[81] C. Sheppard, J.K. Tomberlin, S. Irving, L. Newton, M.A. McGuire, E.E. Mosley, R.W. Hardy, W. Sealey, "Fly Prepupae as a Feedstuff for Rainbow Trout, (*Oncorhynchus mykiss*)", *Journal of the World Aquaculture Society*, vol. 38, núm. 1, pp. 59–67, 2007.

[82] A.S. Djissou, A. Ochiai, S. Koshio, y E. D. Fio-gbe, "Effect of total replacement of fishmeal by earthworm and (*Azolla filiculoides*) meals in the diets of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*, Linnaeus, 1758) reared in concrete tanks", *Indian Journal of Fisheries*, vol. 64, núm. 1, pp. 31–36, 2017.

COMPARACIÓN DE MÉTODOS PARA LA PREDICCIÓN DE ESTRUCTURAS SECUNDARIAS DE ARN MINIMIZANDO LA ENERGÍA LIBRE

Comparing methods for RNA secondary structure prediction minimizing the free energy

Pedro Ayala Elizarraraz, Arturo González Gutiérrez¹, Rolando Tenoch Bárcenas Luna¹

¹ Universidad Autónoma de Querétaro

*Correo electrónico: aglez@uaq.mx

RESUMEN

El comportamiento de una molécula de ARN depende directamente de sus estructuras secundarias y terciarias; sin embargo, se ha demostrado que la predicción de estructuras secundarias con pseudonudos arbitrarios es un problema NP-completo. En este artículo se presenta un estudio comparativo de tres algoritmos basados en la técnica de programación dinámica. Los algoritmos de Nussinov y Zuker predicen estructuras secundarias sin pseudonudos, mientras que el algoritmo de Akutsu lo hace con pseudonudos simples. Asimismo, se muestra una metaheurística que utiliza un algoritmo genético para producir subestructuras cuasióptimas que a su vez permiten la predicción de estructuras secundarias con pseudonudos simples. Finalmente, se aborda un análisis experimental de los cuatro algoritmos utilizando instancias públicas de estructuras de ARN provistas por las bases de datos RNA STRAND y PseudoBase++.

PALABRAS CLAVE: Estructura Secundaria de ARN, Mínima Energía Libre, Pseudonudo, Programación Dinámica, Algoritmo Genético.

ABSTRACT

The behaviour of an RNA molecule is directly linked to its secondary and tertiary structures. However, it has been proved that the secondary structure prediction problem with arbitrary pseudoknots is an NP-complete problem. In this paper, a comparative study of three algorithms based on the dynamic programming technique is presented. The Nussinov and Zuker algorithms predict secondary structures without pseudoknots, whereas Akutsu algorithm does it with simple pseudoknots. A metaheuristic that uses a genetic algorithm to produce quasi-optimal substructures is shown which in turn allows the prediction of secondary structures with simple pseudoknots. Finally, an experimental analysis is proposed for the four algorithms using public instances of RNA structures provided by RNA STRAND and PseudoBase++ databases.

KEYWORDS: RNA Secondary Structure, Minimum Free Energy, Pseudoknot, Dynamic Programming, Genetic Algorithm.

INTRODUCCIÓN

El ácido ribonucleico (ARN) es una molécula que consiste en una cadena formada por los nucleótidos: Adenina (A), Citosina (C), Guanina (G) y Uracilo (U). En comparación con el ADN, las moléculas de ARN son menos estables y muestran una mayor variabilidad en

su estructura tridimensional [1]. El ARN posee una gran relevancia, ya que está involucrado en varios procesos biológicos, tales como la codificación y decodificación de información genética; regulación, detección y comunicación de respuestas a señales celulares; así como la catalización de las reacciones biológicas [2].

Debido a que la funcionalidad de una molécula de ARN depende en gran medida de sus estructuras secundarias y terciarias, es importante su estudio y caracterización [3]. La caracterización y modelación de la estructura terciaria representa un mayor desafío científico y tecnológico que la estructura secundaria. Por ello, los esfuerzos se han enfocado en gran medida en la predicción de estructuras secundarias, ya que es experimentalmente accesible y contiene información para determinar la relación entre estructura y funcionalidad [4].

La estructura secundaria de una secuencia de ARN consiste en el plegamiento de la cadena de nucleótidos consigo misma mediante los enlaces de hidrógeno entre sus bases y en diferentes posiciones sobre la misma, donde cada nucleótido sólo puede formar parte de un par base [2].

DEFINICIONES

Secuencia de ARN: Sea $r=r_1\dots r_n$ una cadena y $\Sigma_{ARN}=\{A,C,G,U\}$ el conjunto que representa el alfabeto de los nucleótidos que conforman el ARN. Si r es una cadena conforme al alfabeto Σ_{ARN} , entonces, r es una secuencia de ARN.

La estructura secundaria se puede representar por el conjunto S_r de pares de índices, que corresponden con las posiciones de los pares base sobre la secuencia r ,

$$S_r \subseteq \{(i,j) \mid 1 \leq i < j \leq n\}$$

donde n es la longitud de la secuencia, i y j son posiciones en la cadena que representan bases complementarias sujetas a las siguientes restricciones [5], [6]:

1. Cada índice $k \in \{1, \dots, n\}$ ocurre a lo más una vez en el emparejamiento de S_r .
2. Para cada par (i,j) de S_r , el par de bases (i,j) es un par de tipo Watson-Crick: $(r_i, r_j) \in \{(A,U), (U,A), (C,G), (G,C)\}$, o es un par tipo Wobble: $(r_i, r_j) \in \{(G,U), (U,G)\}$.
3. Para cada par (i,j) de S_r , $j-i \geq 4$ (donde 4 es el tamaño mínimo de una región de bases no complementarias llamada bucle en horquilla).

En la Figura 1, se muestran las subestructuras elementales que pueden contener la estructura secundaria mediante métodos de plegamiento por maximización



de pares base o por minimización de energía libre entre moléculas.

46

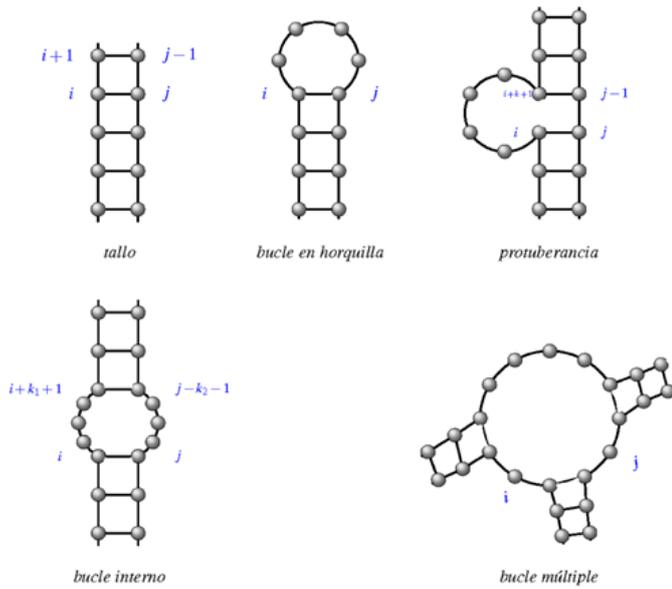


Figura 1. Representación de las posibles subestructuras que una cadena de arn puede adoptar. Las bases se muestran como puntos y las líneas representan las conexiones entre las bases [5]. Los índices i, j, k, k_1 y k_2 representan los pares base a partir de los cuales se forma la subestructura.

A continuación, se define el problema de la predicción de la estructura secundaria.

Predicción de la estructura secundaria: Dada una secuencia r conforme al alfabeto Σ_{ARN} , realizar el plegamiento de la secuencia utilizando las restricciones anteriormente listadas, generando las subestructuras permitidas [5], [7], [8], para obtener la estructura secundaria S_r con la mínima energía libre o la estructura que maximice el número de pares base.

Una topología o tipo de subestructura más compleja es el pseudonudo (Figura 2), la cual se caracteriza por el emparejamiento de bases en un bucle con residuos no apareados de la subestructura. Enseguida se describe formalmente el pseudonudo.

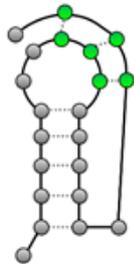


Figura 2. Representación esquemática de un pseudonudo. Las líneas punteadas representan las conexiones entre los pares base complementarios. Las conexiones entre pares base de los nodos resaltados conforman el pseudonudo.

Pseudonudo: Para todos los pares base de una estructura secundaria, si existen dos pares base (i, j) y (k, l) que no son continuos ($i < j < k < l$), ni anidados ($i < k < l < j$), pero se intersectan ($i < k < j < l$), entonces la estructura secundaria contiene un pseudonudo [9].

La intersección de los pares base (i, j) y (k, l) que obedece a la restricción ($i < k < j < l$), se muestra en la Figura 3. Si consideramos el par base (i, j) con las posiciones (1,13) y al par base (k, l) con las posiciones (6,21), claramente se observa esta intersección o superposición de pares base ($1 < 6 < 13 < 21$).

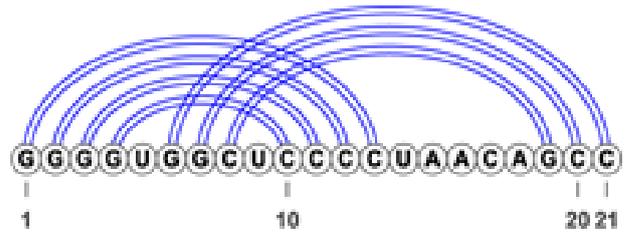


Figura 3. Representación planar de un pseudonudo.

Con base en las definiciones anteriores, el problema de la predicción de estructuras secundarias con pseudonudos se define como sigue:

Predicción de la estructura secundaria con pseudonudos: Dada una secuencia de ARN, la salida de la predicción con pseudonudos será la estructura secundaria que incluya pseudonudos que contienen la información de emparejamiento de bases.

METODOLOGÍA Y MATERIALES

Las estructuras secundarias se determinan mediante técnicas de laboratorio. Las técnicas más utilizadas para determinar las estructuras de ARN son los rayos X, cristalografía y la resonancia magnética nuclear (NMR) [3], [10]. En los últimos años ha surgido un mayor interés por la predicción de dichas estructuras mediante la modelación computacional. Con los métodos computacionales es posible reducir el tiempo y costo de la predicción de estructuras secundarias para una molécula [3]; sin embargo, la modelación computacional no está exenta de limitantes. Un claro ejemplo de ello es la predicción de estructuras con pseudonudos, la cual incrementa la complejidad tanto en tiempo como en espacio. Se ha demostrado que la predicción de estructuras con pseudonudos utilizando el modelo termodinámico de minimización de la energía libre es un problema NP-completo [11], [12].

A lo largo de la historia se han implementado diferentes algoritmos utilizando técnicas como programación dinámica y algoritmos genéticos principalmente.

Entre los algoritmos que excluyen la predicción de pseudonudos y que se basan en la técnica de programación dinámica se encuentran:

Nussinov [13], que utiliza un enfoque de maximización de pares base bajo la hipótesis de que, entre más emparejamientos existan entre bases de la cadena de ARN, menor será la energía libre de la molécula.

Zuker [14], que emplea el concepto de minimización de energía libre mediante la asignación de energías termodinámicas a cada tipo de subestructura que conforman la estructura secundaria final; estas energías dependen del tamaño de las subestructuras, y la energía total de la secuencia se representa como la suma de todas las contribuciones individuales de estas subestructuras.

Ambos algoritmos exhiben un orden de complejidad $O(n^3)$.

Por otro lado, respecto a los algoritmos que incluyen la predicción con pseudonudos, destacan los propuestos por:

Rivas [15], que propone un algoritmo con enfoque de minimización de la energía libre y con restricción en el tipo de pseudonudo con un orden de complejidad $O(n^6)$.

Akutsu [11], que establece un algoritmo que maximiza el número de pares base e incluye la predicción de pseudonudos simples con un orden de complejidad $O(n^4)$.

Del algoritmo de Akutsu en [16] se propone una modificación que incluye el modelo termodinámico de minimización de energía libre y reduce la complejidad del espacio de $O(n^3)$ a $O(n^2)$, con un tiempo de ejecución de $O(n^4)$.

Con respecto a enfoques metaheurísticos para la predicción de estructuras secundarias, en los últimos años se ha propuesto una variedad de algoritmos genéticos, como GA_{knot} [9], el cual genera un conjunto de hélices mediante un enfoque similar al del algoritmo Nussinov. A partir de este conjunto de hélices se genera la población inicial, donde cada individuo se crea a través de las combinaciones de las hélices previamente encontradas. Posteriormente, se aplican los operadores genéticos de selección, cruza y mutación para obtener la solución.

El algoritmo propuesto en [17], $GA-GRASP$, combina un algoritmo genético y la metaheurística $GRASP$ (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure) en combinación del modelo termodinámico de energía libre. El algoritmo RNA_{knot} [18] es una mejora del algoritmo $GA-GRASP$ que incluye la predicción de todos los tipos de subestructuras básicas (Figura 1) y dos tipos de pseudonudos: simple (H-type) y Kissing-Hairpin, con un orden de complejidad $O(n^2) + O(k \times nbs)$, donde k es

el número de iteraciones y nbs es el número de individuos en la población.

En la Figura 4 se muestra el flujo básico de los algoritmos genéticos mencionados.

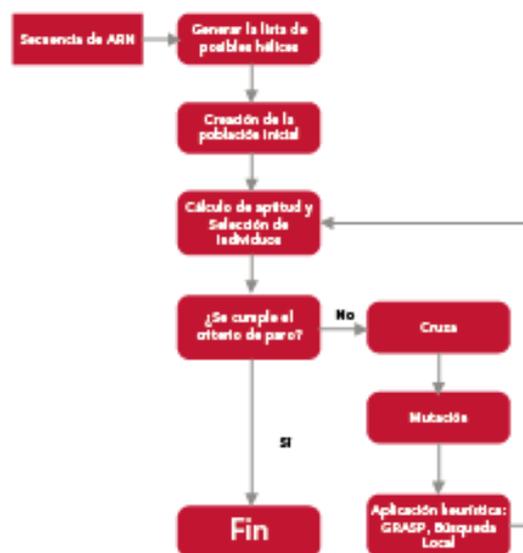


Figura 4. Diagrama de flujo del algoritmo genético.

En la Tabla 1 se presentan los enfoques de minimización de energía de cada modelo y su correspondiente algoritmo, así como sus restricciones en cuanto a si su predicción incluye o no los pseudonudos, indicando el tipo de pseudonudo en su caso.

Tabla 1. Caracterización de los algoritmos para modelación de estructuras secundarias.

ALGORITMO	MODELO DE MINIMIZACIÓN DE ENERGÍA	PREDICCIÓN CON PSEUDONUDOS	TIPO
Nussinov	Maximización de pares base	N	-
Zuker	Modelo Termodinámico	N	-
Akutsu	Modelo Termodinámico	S	Simple
RNA_{knot}	Modelo Termodinámico	S	Kissing Hairpin

PARÁMETROS DE ENERGÍA

La base de datos del vecino más cercano (*Nearest Neighbor Database, NNDB*) [19] es un modelo termodinámico que asume que la estabilidad de un par base específico depende directamente de las bases vecinas. Esta base de datos proporciona los parámetros de energía que permiten la predicción de una estructura secundaria estable.

La estabilidad de una estructura secundaria se mide por el cambio de energía libre ΔG . Este cambio se aproxima como la suma de las contribuciones individuales

- cercano, en el que se resume la contribución energética de cada subestructura que conforma la estructura secundaria final.
3. Algoritmo de predicción: se producen cuatro soluciones conforme a los algoritmos de Nussinov, Zuker, Akutsu y RNAknot.
 4. Notación Dot-Bracket: estructura secundaria predicha en un formato específico para permitir su posterior visualización.
 5. Estructura secundaria: es el resultado de la predicción (estructura secundaria), en el formato establecido y energía libre o número máximo de pares base, con la cual el prototipo desplegará el resultado.

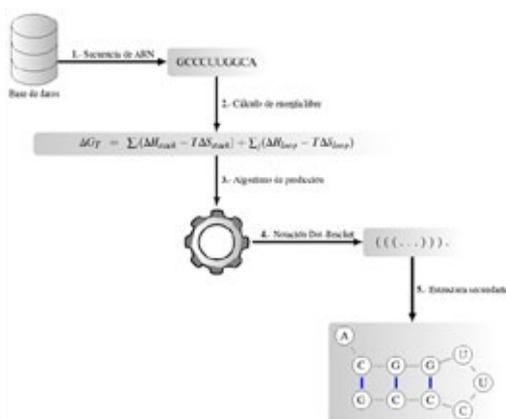


Figura 6. Diagrama de flujo del proceso de la predicción de estructuras secundarias.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para evaluar la precisión de la predicción de los métodos, se utiliza la técnica descrita en [23], que utiliza los conceptos de sensibilidad y valor predictivo positivo.

La sensibilidad (S) representa el porcentaje de pares base presentes en la estructura de referencia que ocurren en la estructura secundaria predicha, este valor es calculado con la siguiente ecuación:

$$S = \frac{VP}{VP + FN} \quad (1)$$

El valor predictivo positivo (VPP) describe qué porcentaje de pares base predichos ocurren en la estructura secundaria de referencia, se obtiene mediante la ecuación:

$$VPP = \frac{VP}{VP + FP} \quad (2)$$

Donde VP es el número de pares base predichos correctamente, FN el número de pares base en la estructura de referencia que no están en la estructura predicha y FP es el número de pares base predichos que no están en la estructura de referencia.

Adicionalmente, se incluye la medida de precisión Valor-F, que varía entre 0 y 1, donde 0 indica que no hay pares base en común entre ambas estructuras y 1 indica una precisión perfecta. Se obtiene con la siguiente ecuación:

$$Valor - F = \frac{2 \times S \times VPP}{S + VPP} \quad (3)$$

ANÁLISIS DE RESULTADOS

El conjunto de secuencias de prueba utilizado para evaluar el rendimiento, a través de los conceptos de sensibilidad (Ec. (1)) y de valor predictivo positivo (Ec. (2)), consta de 20 secuencias; 10 son libres de pseudonudos y las otras 10 incluyen un pseudonudo de tipo simple en la estructura de referencia. Se obtuvo la eficiencia con respecto a las métricas definidas mediante la ejecución de cada algoritmo.

En la Tabla 5 se muestra el promedio del Valor-F (Ec. (3)) por algoritmo, agrupado por estructura con o sin pseudonudo en la estructura de referencia. La estructura obtenida de manera experimental se asume que tiene un Valor-F de 1.

Tabla 5. Valor-F promedio en estructuras sin y con pseudonudos.

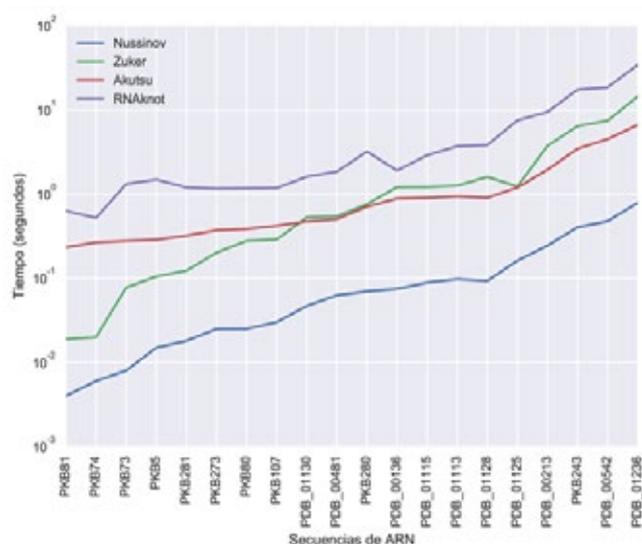
ALGORITMO	VALOR-F	
	ESTRUCTURAS SIN PSEUDONUDOS	ESTRUCTURAS CON PSEUDONUDOS
Nussinov	0.2655	0.2329
Zuker	0.7816	0.4817
Akutsu	0.4766	0.7349
RNAknot	0.4609	0.8039

Con respecto a las instancias sin pseudonudos, el algoritmo Zuker exhibe una mayor precisión con un 78.1 %, seguido por Akutsu con 47.6 %, luego RNAknot con 46 % y finalmente Nussinov con 26.5 %. El de Zuker es buen resultado, ya que la mayoría de algoritmos de predicción logran un porcentaje de efectividad de entre 60 % y 80 %, como se muestra en las comparaciones realizadas en [9] y [23]. En tanto para Akutsu y RNAknot, el porcentaje es superior a 45 %, lo cual es entendible debido a que la estructura de referencia no incluye pares base que formen un pseudonudo, pero la predicción de estos algoritmos incluye posibles pseudonudos en la mayoría de las instancias. Sin embargo, hay instancias como PDB_00136, PDB_B01125 y PDB_00213, donde la métrica VPP supera el 70 % (Apéndice A, Tabla 7). Finalmente, el porcentaje es muy bajo respecto a la efectividad del algoritmo Nussinov; la principal razón parece estar ligada a que este método se basa en la

tiempo de ejecución; sin embargo, como se mostró anteriormente, el algoritmo RNAknot tiene un mejor desempeño en cuanto a precisión con respecto a la estructura de referencia. Lo mismo sucede para los algoritmos Nussinov y Zuker: mientras que el algoritmo Nussinov tiene un mejor desempeño en tiempo de ejecución, el algoritmo de Zuker tiene por mucho un mejor desempeño en cuanto a la precisión de la estructura secundaria predicha.

Figura 9. Tiempos de ejecución.

Los algoritmos Nussinov, Zuker y Akutsu se implementaron construyendo un sistema en el lenguaje de programación Python versión 3.7.3, mientras que para el



algoritmo RNAknot se utilizó el software implementado en [18]. Las pruebas se realizaron en una computadora portátil Dell G3 con procesador Intel(R) Core(TM) i5-8300H CPU@ 2.30GHZ, RAM 16GB.

CONCLUSIONES

En este artículo se presenta un análisis sobre los principales algoritmos basados en programación dinámica y algoritmos genéticos para la predicción de estructuras secundarias. Con los resultados obtenidos a través de las métricas planteadas observamos que los algoritmos RNAknot, Akutsu y Zuker, que incluyen un modelo termodinámico para la minimización de energía, tienen un porcentaje de precisión mayor que el algoritmo Nussinov, que utiliza un enfoque de maximización de pares base. También se observa que existe una variabilidad en la precisión y sensibilidad con respecto a las diferentes instancias. Por ello, es importante incluir varios algoritmos en el desarrollo de un sistema robusto para la predicción de estructuras secundarias de ARN, para obtener una mejor propuesta a partir de los

diferentes resultados.

Como trabajo futuro se planea el diseño e implementación de un algoritmo genético que incluya el modelo termodinámico de minimización de energía, el cual puede ser alimentado con poblaciones iniciales de estructuras secundarias subóptimas desde el punto de vista energético.

Con respecto a la validación de resultados, un trabajo a futuro interesante consiste en incluir una validación desde la perspectiva topológica de la estructura que complemente los parámetros de sensibilidad y precisión.

REFERENCIAS

- [1] A. Polanski and M. Kimmel, *Bioinformatics*. Berlin: Springer Verlag, 2007.
- [2] A. Punetha, P. Sarkar, S. Nimkar, H. Sharma, Y. KNR, and S. Nagaraj, "Structural bioinformatics: Life through the 3d glasses," in *Bioinformatics: Sequences, Structures, Phylogeny* (A. Shanker, ed.), pp. 191–253, Springer Verlag, 2018.
- [3] A. E. Fatmi, M. A. Bekri, and S. Benhlima, "Rna secondary structure prediction based on genetic algorithm and comparative approach," in *2018 4th International Conference on Optimization and Applications (ICOA)*, pp. 1–7, April 2018.
- [4] A. Churkin, L. Weinbrand, and D. Barash, *Free Energy Minimization to Predict rna Secondary Structures and Computational rna Design*, pp. 3–16. New York, NY: Springer New York, 2015.
- [5] H.-J. Böckenhauer and D. Bongartz, *Algorithmic Aspects of Bioinformatics*. Berlin: Springer Verlag, 2007.
- [6] Z. Liu, D. Zhu, W. Cui, and N. Liu, "An approximation scheme for rna folding structure prediction including pseudoknots," in *2013 Ninth International Conference on Computational Intelligence and Security*, pp. 6–10, Dec 2013.
- [7] C. Reidys, *Combinatorial Computational Biology of rna: Pseudoknots and Neural Networks*. Berlin: Springer Verlag, 2011.
- [8] R. Lorenz, M. T. Wolfinger, A. Tanzer, and I. L. Hofacker, "Predicting rna secondary structures from sequence and probing data," *Elsevier: Advances in rna Structure Determination*, vol. 103, pp. 86–98, 2016.
- [9] K. Tong, K. Cheung, K. Lee, and K. Leung, "Gaknot: Rna secondary structures prediction with pseudoknots using genetic algorithm," in *2013 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Bioinformatics and Computational Biology (CIBCB)*, pp. 136–142, 2013.
- [10] Y. Zhao, Q. Ni, and Z. Wang, "Computational features evaluation for rna secondary structure predic-



tion," in *2009 2nd International Conference on Biomedical Engineering and Informatics*, pp. 1–5, Oct 2009.

[11] T. Akutsu, "Dynamic programming algorithms for rna secondary structure prediction with pseudoknots* 1,* 2," *Discrete Applied Mathematics*, vol. 104, pp. 45–62, 08 2000.

[12] S. Sheikh, R. Backofen, and Y. Ponty, "Impact of the energy model on the complexity of rna folding with pseudoknots," in *Combinatorial Pattern Matching*, pp. 321–333, Springer Berlin Heidelberg, 07 2012.

[13] R. Nussinov and A. B. Jacobson, "Fast algorithm for predicting the secondary structure of single-stranded rna" *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 77 11, pp. 6309–13, 1980.

[14] M. Zuker and P. Stiegler, "Optimal computer folding of large RNA sequences using thermodynamics and auxiliary information," *Nucleic Acids Research*, vol. 9, pp. 133–148, 01 1981.

[15] E. Rivas and S. R. Eddy, "A dynamic programming algorithm for RNA structure prediction including pseudoknots," *Journal of Molecular Biology*, vol. 285, no. 5, pp. 2053–2068, 1999.

[16] A. Kravchenko, "Predicting RNA secondary structures including pseudoknots," 2009.

[17] A. E. Fatmi, A. Chentoufi, M. A. Bekri, S. Benhlma, and M. Sabbane, "A heuristic algorithm for rna secondary structure based on genetic algorithm," in *2017 Intelligent Systems and Computer Vision (ISCV)*, pp. 1–7, April 2017.

[18] A. El Fatmi, M. A. Bekri, and S. Benhlma, "Rnaknot: A new algorithm for RNA secondary struc-

ture prediction based on genetic algorithm and grasp method," *Journal of Bioinformatics and Computational Biology*, vol. 17, no. 05, p. 1950031, 2019.

[19] D. H. Turner and D. H. Mathews, "Nndb: the nearest neighbor parameter database for predicting stability of nucleic acid secondary structure," *Nucleic Acids Research*, vol. 38, pp. D280–D282, 2009.

[20] D. Huson, "Lecture notes Algorithms in Bioinformatics I," December 2006.

[21] M. Andronescu, V. Bereg, H. Hoos, and A. Condon, "RNA strand: the RNA secondary structure and statistical analysis database," *BMC bioinformatics*, vol. 9, p. 340, 09 2008.

[22] M. Taufer, A. Licon, R. Araiza, D. Mireles, F. H. D. van Batenburg, A. P. Gulyaev, and M.-Y. Leung, "Pseudobase++: an extension of pseudobase for easy searching, formatting and visualization of pseudoknots," *Nucleic acids research*, vol. 37, p. D127–35, January 2009.

[23] Y. Zhao, J. Wang, C. Zeng, and Y. Xiao, "Evaluation of rna secondary structure prediction for both base-pairing and topology," *Biophysics Reports*, vol. 4, 06 2018.

[24] P. Kerpedjiev, S. Hammer, and I. L. Hofacker, "Forna (force-directed RNA): Simple and effective online RNA secondary structure diagrams," *Bioinformatics*, vol. 31, pp. 3377–3379, 06 2015.

[25] K. Darty, A. Denise, and Y. Ponty, "VARNA: Interactive drawing and editing of the RNA secondary structure," *Bioinformatics*, vol. 25, pp. 1974–1975, 04 2009.

Tabla 7. Métricas de precisión por instancia y algoritmo.

CLAVE	ALGORITMO	VP	FN	FP	S	VPP	VALOR-F
PDB.00136	Nussinov	18	8	10	0.6428	0.6428	0.6666
	Zuker	18	8	10	0.6923	0.8571	0.7659
	Akutsu	19	7	9	0.7307	0.6785	0.7037
	RNAknot	18	8	1	0.6923	0.9473	0.80
PDB.01130	Nussinov	0	20	24	0.0	0.0	0.0
	Zuker	20	0	0	1.0	1.0	1.0
	Akutsu	16	4	10	0.80	0.6153	0.6956
	RNAknot	0	20	19	0.0	0.0	0.0
PDB.00481	Nussinov	0	26	24	0.0	0.0	0.0
	Zuker	14	12	0	0.5384	1.0	0.70
	Akutsu	0	26	22	0.0	0.0	0.0
	RNAknot	7	19	7	0.2692	0.50	0.35

CLAVE	ALGORITMO	VP	FN	FP	S	VPP	VALOR-F
PDB.01115	Nussinov	9	17	18	0.3461	0.3333	0.3396
	Zuker	20	6	1	0.7692	0.9523	0.8510
	Akutsu	6	20	22	0.2307	0.2142	0.2222
	RNAknot	10	16	10	0.3846	0.50	0.4347
PDB.01113	Nussinov	8	19	19	0.2962	0.2962	0.2962
	Zuker	18	9	1	0.6666	0.9473	0.7826
	Akutsu	6	21	22	0.2222	0.2142	0.2181
	RNAknot	6	21	11	0.2222	0.3529	0.2727
PDB.01128	Nussinov	0	27	27	0.0	0.0	0.0
	Zuker	12	15	6	0.4444	0.6666	0.5333
	Akutsu	14	13	19	0.5185	0.4242	0.4666
	RNAknot	8	19	9	0.2962	0.4705	0.3636
PDB.01125	Nussinov	18	18	18	0.50	0.50	0.50
	Zuker	33	3	0	0.9166	1.0	0.9565
	Akutsu	27	9	6	0.75	0.8181	0.7826
	RNAknot	24	12	0	0.6666	1.0	0.80
PDB.00213	Nussinov	9	32	30	0.2195	0.2307	0.2250
	Zuker	30	11	3	0.7317	0.9090	0.8108
	Akutsu	32	9	9	0.7804	0.7804	0.7804
	RNAknot	23	18	9	0.5609	0.7187	0.6301
PDB.00542	Nussinov	8	42	40	0.16	0.1666	0.1632
	Zuker	32	18	8	0.64	0.80	0.7111
	Akutsu	19	31	30	0.38	0.3877	0.3838
	RNAknot	19	31	14	0.38	0.5757	0.4578
PDB.01236	Nussinov	26	28	32	0.4814	0.4482	0.4642
	Zuker	37	17	14	0.6851	0.7254	0.7047
	Akutsu	29	25	30	0.5370	0.4915	0.5132
	RNAknot	24	30	18	0.4444	0.5714	0.50
PKB5	Nussinov	0	8	13	0.0	0.0	0.0
	Zuker	5	3	6	0.6250	0.4545	0.5263
	Akutsu	8	0	6	1.0	0.5714	0.7272
	RNAknot	4	4	4	0.50	0.50	0.50
PKB73	Nussinov	7	5	4	0.5833	0.6363	0.6086
	Zuker	7	5	2	0.5833	0.7777	0.6666
	Akutsu	12	0	0	1.0	1.0	1.0
	RNAknot	11	1	0	0.9166	1.0	0.9565



PKB74	Nussinov	5	6	5	0.4545	0.50	0.4761
	Zuker	7	4	0	0.6363	1.0	0.7777
	Akutsu	11	0	0	1.0	1.0	1.0
	RNAknot	8	3	0	0.7272	1.0	0.8421
PKB80	Nussinov	0	12	15	0.0	0.0	0.0
	Zuker	0	12	10	0.0	0.0	0.0
	Akutsu	12	0	5	1.0	0.7058	0.8275
	RNAknot	12	0	0	1.0	1.0	1.0
PKB81	Nussinov	2	6	6	0.25	0.25	0.25
	Zuker	5	3	0	0.6250	1.0	0.7692
	Akutsu	8	0	0	1.0	1.0	1.0
	RNAknot	6	2	0	0.75	1.0	0.8571
PKB107	Nussinov	0	12	17	0.0	0.0	0.0
	Zuker	0	12	11	0.0	0.0	0.0
	Akutsu	12	0	5	1.0	0.7058	0.8275
	RNAknot	12	0	0	1.0	1.0	1.0
PKB243	Nussinov	0	31	45	0.0	0.0	0.0
	Zuker	20	11	7	0.6451	0.7407	0.6896
	Akutsu	22	9	19	0.7096	0.5365	0.6111
	RNAknot	11	20	16	0.3548	0.4074	0.3793
PKB273	Nussinov	5	6	11	0.4545	0.3225	0.3703
	Zuker	6	5	6	0.5454	0.50	0.5217
	Akutsu	10	1	6	0.9090	0.6250	0.7407
	RNAknot	6	5	3	0.5454	0.6666	0.60
PKB280	Nussinov	6	8	17	0.4285	0.2608	0.3243
	Zuker	7	7	11	0.50	0.3888	0.4375
	Akutsu	12	2	13	0.8571	0.48	0.6153
	RNAknot	13	1	0	0.9285	1.0	0.9629
PKB281	Nussinov	3	5	9	0.3750	0.50	0.4385
	Zuker	3	5	3	0.3750	0.50	0.4285
	Akutsu	0	8	10	0.0	0.0	0.0
	RNAknot	8	0	1	1.0	0.8888	0.9411

DIAGNÓSTICO DEL DESBALANCEO DE ROTOR SUJETO A FRICCIÓN CON GRÁFICOS DE RECURRENCIA

Diagnosis of unbalanced rotor subject to friction by Recurrence Plot

Ignacio Torres Contreras¹, Juan Carlos Jáuregui Correa¹, Carlos Santiago López Cajún¹, Salvador Echeverría Villagómez²

¹ Universidad Autónoma de Querétaro

²Centro Nacional de Metrología

*Correo electrónico: igtoc4@gmail.com

RESUMEN

El desbalanceo de los componentes en máquinas rotativas y el desgaste provocado por la fricción son algunas de las fallas más recurrentes que incrementan significativamente los niveles de vibración, lo cual afecta la confiabilidad de las máquinas, la vida útil de sus elementos y la calidad del producto. En el presente trabajo se analizó el desbalanceo de un disco montado sobre un eje apoyado entre dos chumaceras a cada extremo al aplicar una fuerza de fricción sobre la superficie del diámetro exterior del disco. Como método de análisis se emplearon los diagramas de recurrencia, los cuales tienen la capacidad de analizar sistemas dinámicos no lineales en regímenes no estacionarios. Los gráficos de recurrencia se construyeron a partir de los espectros de desplazamiento obtenidos por la doble integración de la aceleración mediante la descomposición empírica de los modos de vibración, mismos que también pueden utilizarse para analizar sistemas no lineales. El objetivo del presente trabajo fue la caracterización cualitativa de una falla por desbalanceo en presencia de fricción mediante diagramas de recurrencia para determinar si es factible identificar el fenómeno no lineal de la fricción.

Palabras clave: Otro, desbalanceo, fricción, Gráficos de Recurrencia, sistemas dinámicos no lineales, mantenimiento predictivo.

ABSTRACT

The imbalance of components and friction caused wear in rotating machines are some of the most recurrent failures that significantly increase vibration levels, affecting the reliability of the devices, the useful life of its elements and the quality of the product. In the present study, the imbalance of a disk mounted on a shaft supported between two bearings at both ends when a friction force was applied on the outer diameter of the disk was analysed. The analysis method used was the recurrence plot, which can analyse non-linear dynamic systems in non-stationary regimes. The recurrence plot was constructed from the displacement spectra obtained by the double integration of the acceleration through the empirical mode decomposition, which can also be used to analyse non-linear systems. The objective of the present work was the qualitative characterization of an imbalance failure in the presence of friction using recurrence diagrams to determine if it is feasible to identify the non-linear phenomenon of friction.

KEYWORDS: Others, Shaft imbalance, rotor friction, recurrence plot, nonlinear dynamic systems, predictive maintenance.

INTRODUCCIÓN

El desbalanceo es originado cuando el eje de rotación del rotor no coincide con su centro de masa; a mayor grado de desbalanceo, más altos niveles de vibración. La vibración genera fuerzas radiales y axiales, las cuales repercuten en la flexión de ejes, incrementan cargas en rodamientos, producen desalineaciones entre ejes y rodamientos, reducen la vida útil, aumentan el desgaste en los acoplamientos, afectan las deflexiones de los ejes y amplifican el consumo de energía.

Todos los componentes mecánicos rotativos presentan un cierto grado de desbalanceo debido a los procesos de manufactura, especialmente cuando vienen de un proceso de maquinado. Aproximadamente el 99 % de los equipos industriales trabajan bajo cierto grado de desalineación. Durante su operación, el desbalanceo es provocado por el desgaste en chumaceras y muñones generado por la fricción entre las partes rotativas, las extremas flexiones de los propios ejes, las fuerzas internas generadas entre componentes, y las deformaciones en la carcasa o apoyos y desniveles en la cimentación, entre otros. Cuando los niveles de vibración no se detectan y controlan oportunamente, provocan fallas en los equipos [1], [2].

La industria ha implementado diversas estrategias de mantenimiento a lo largo de la historia, de las cuales destaca el mantenimiento predictivo o Predictive Maintenance (PdM, por sus siglas en inglés) basado en el monitoreo de vibraciones, para el control de la condición y la aplicación de acciones correctivas a través de un plan de mantenimiento programado [3], [4]. Gracias al PdM, se ha logrado incrementar la confiabilidad de la maquinaria y reducir los costos de mantenimiento y las afectaciones económicas, laborales, de seguridad y del medio ambiente provocados por las fallas no controladas o catastróficas.

Los gráficos de recurrencia, *Recurrence Plot* (RP, por sus siglas en inglés), son una metodología alternativa para el análisis de las recurrencias a partir de datos experimentales en las series de tiempo. Tiene la capacidad de identificar el comportamiento no lineal en los sistemas dinámicos [5]-[9]. La capacidad de RP para identificar las no linealidades abre las puertas a nuevas posibilidades en el diagnóstico y predicción de fallas de las máquinas rotativas para, en consecuencia, incrementar la confiabilidad.

En los últimos años se han realizado trabajos de investigación sobre la caracterización del desbalanceo aplicando los análisis de orden para obtener la amplitud y la fase de la vibración con el fin de determinar el tipo de falla y su localización [10]. Otros autores [11]



han propuesto algoritmos inteligentes para corregir el desbalanceo con base en los análisis espectrales tanto en dominio del tiempo como de la frecuencia mediante los transformada rápida de Fourier, o FFT por sus siglas en inglés (Fast Fourier Transform). Para el diagnóstico de problemas de desbalanceo, [12] ha propuesto las redes neuronales Elman en conjunto con los análisis en el dominio de la frecuencia, donde la red es entrenada a través de variaciones en la amplitud de la aceleración con la finalidad de clasificar la condición de falla.

Algunos investigadores han implementado controles adaptativos aplicados a rodamientos activos para autocompensar las fuerzas debidas al desbalanceo del rotor sin necesidad de realizar el balanceo típico en banco [13]. Incluso existen métodos [14] especializados en el diagnóstico y corrección del desbalanceo en línea basados en los análisis espectrales en el dominio del tiempo y de la frecuencia; en ambos casos se conserva en enfoque a solo el fenómeno del desbalanceo, y las metodologías siguen siendo los análisis de vibraciones clásicos. Las bases para el desarrollo de controladores para el desbalanceo debido a la sincronización del sistema se fundamentan en los análisis espectrales y de fase combinados con el control de la velocidad [15].

La estimación instantánea de la velocidad y del ángulo de fase complementado con FFT siguen siendo temas actuales de investigadores [16] para el diagnóstico y corrección del desbalanceo. La señal de vibración se vuelve a muestrear aún en el dominio angular para reducir el efecto de la fluctuación de la velocidad angular. Recientemente se han comenzado a emplear técnicas de no contacto para el diagnóstico del desbalanceo, mediante la localización de la masa de desbalanceo en 3D con el uso de sistemas de video estéreo sincronizadas con cámaras de alta velocidad [17]. Otros autores han aplicado algoritmos de la integral-diferencial del gradiente de velocidad para controlar la variación de la fase entre dos rotores unidos en serie [18] como una alternativa para solucionar los problemas de sincronización originados por el desbalanceo diagnosticado en campo.

Estudios más recientes consideran el sobrecalentamiento generado por las condiciones extremas de operación en el fenómeno de desalineamiento, de esta manera consideran una condición real de campo en la cual usualmente varias fallas están presentes durante los diagnósticos. Se aplican análisis estructurales para determinar las características del sistema de estudio, junto con los análisis espectrales típicos de vibración y diagramas de Campbell; la conclusión es que el calentamiento afecta significativamente el desbalanceo del rotor [19].

De igual manera, se han publicado muchos trabajos

sobre el efecto de la fricción en componentes rotativos. [20] estudió el comportamiento dinámico de un rotor sujeto a fricción generada por el contacto entre éste y el estator mediante el análisis de las trayectorias en los subespacios. Mediante la teoría de Poincaré demostró que el comportamiento está influenciado fuertemente por los contactos entre superficies. Otros estudios se han enfocado a mejorar la predicción de la vida remanente en chumaceras a través de la caracterización de las respuestas no lineales de la lubricación [21]. Por ello queda claro que existe actualmente el interés por conocer la influencia de las no linealidades en el comportamiento de los fenómenos dinámicos.

La conversión de la aceleración en velocidad y desplazamiento sigue siendo un tema de estudio. Las estrategias más utilizadas para realizar las integraciones de la aceleración son dos:

- las que están basadas en la integración directa en el dominio del tiempo;
- las que se trasladan al dominio de la frecuencia mediante la transformada de Fourier, donde se realizan las integraciones y se regresan al dominio del tiempo con la transformada inversa de Fourier.

Ambos métodos siguen generando significativos errores que dependen de factores tan variados como son desde la resolución del muestreo hasta la respuesta digital de la señal [22]. La doble integración de la aceleración tiene muchas aplicaciones, por ejemplo, la determinación del desplazamiento de edificios de gran altura [23]; incluso se combina con las nuevas líneas de investigación en el campo del Internet de las Cosas mediante la aplicación de una serie de filtros, tales como los de Kalman [24].

En el presente trabajo se usa el método empírico de los modos intrínsecos de una función, EMD por sus siglas en inglés (Empirical Mode Decomposition) para eliminar la tendencia debida a los errores de integración en el dominio del tiempo. EMD es una técnica para descomponer empíricamente una señal en sus funciones intrínsecas con sus frecuencias y amplitudes instantáneas que fue aplicado por primera vez en análisis espectrales para estudiar fenómenos no lineales en regímenes no-estacionarios de variables complejas [25]. EMD ha ganado popularidad en los últimos años como una solución para eliminar las tendencias en las integraciones de la aceleración [26], para la separación de los componentes determinísticos y estocásticos de un sistema dinámico [27], y como una herramienta para diagnosticar fallas en rotores dinámicos [28], solo por mencionar algunas.

El método de integración utilizado en el presente trabajo es el método de Simpson, el cual ha demostrado tener una mejor precisión y un tiempo de proce-

samiento bajo [29].

Para probar la aplicación de RP en el desbalanceo de un rotor sujeto a fricción externa, se ha diseñado un experimento consistente en un rotor montado sobre un eje flexible centrado en dos apoyos con chumaceras y sujeto a una carga de fricción en seco sobre la superficie del diámetro exterior mediante una celda de carga. Los resultados son analizados para varias velocidades.

El objetivo del presente trabajo fue la caracterización cualitativa de una falla por desbalanceo en presencia de fricción mediante diagramas de recurrencia para determinar si es factible identificar el fenómeno no lineal de la fricción.

MATERIALES Y MÉTODOS

METODOLOGÍA

La metodología aplicada para la caracterización de las fallas por desbalanceo sujeto a fricción consiste en los siguientes pasos y se basa en el arreglo de banco de pruebas de la Figura 1:

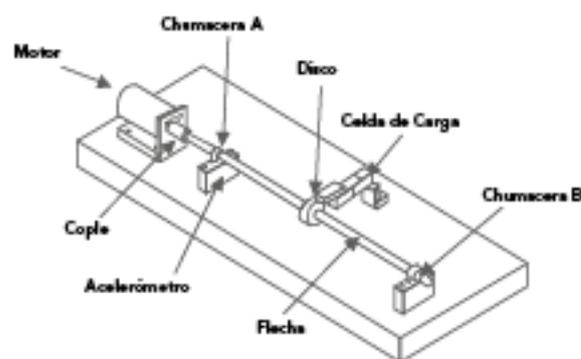
- 1) Medición de las vibraciones del sistema a través de un acelerómetro ubicado en el apoyo A para velocidades de operación de 250 y 500 rpm:
 - a) Medición de las vibraciones en aceleración del rotor sin desbalanceo.
 - b) Medición de las vibraciones en aceleración del rotor con desbalanceo sin fricción.
 - c) Medición de las vibraciones en aceleración del rotor con desbalanceo y fricción.
- 2) Integración de la aceleración para obtener el espectro de aceleración y desplazamiento.
 - a) Integración de la aceleración para obtener la velocidad y el desplazamiento.
 - b) Corrección de la tendencia debida al error de integraciones con EMD.
- 3) Construcción de los RPS.
- 4) Caracterización cualitativa de las fallas del desbalanceo y fricción con RP.
- 5) Análisis de resultados.

MODELO DEL ARREGLO SUJETO DE ESTUDIO

El banco de pruebas utilizado para la experimentación (Fig. 1) consta de un rotor de acero con una masa $M = 0.819$ kg, montado sobre una flecha flexible de diámetro $d = 19$ mm y apoyada simétricamente entre

dos chumaceras separadas por una distancia de 700 mm. La flecha es impulsada por un motor mediante un acoplamiento flexible. El disco tiene orificios roscados M5 x 1 mm de paso para las masas de desbalanceo en un círculo concéntrico de $\varnothing 65$ mm y con 16 posiciones igualmente espaciadas. La masa de prueba fue de 12 g, localizada simétricamente en un solo barrenado. En la base de la chumacera A se ubica el acelerómetro unidireccional en posición vertical. La celda de carga tiene una placa de desgaste de acero con un ancho unitario de 38 mm para el contacto contra la superficie del disco y un arreglo flexible. De acuerdo con el diseño del banco, la fuerza de fricción aumenta con el incremento del desbalanceo.

Figura 1. Banco de pruebas



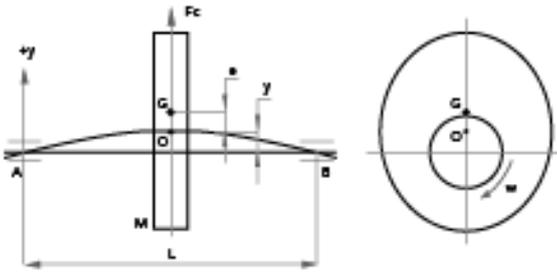
DISCO SOBRE UNA FLECHA FLEXIBLE

La Fig. 2 describe un sistema formado de un disco de masa M , montado en una flecha flexible simétricamente con respecto a sus apoyos; se asume que la masa de la flecha no es significativa con respecto a la masa del disco. El punto O está ubicado en el eje de la flecha, G es el centro de masa del disco, y es la deflexión de la misma flecha, e es la excentricidad del disco con respecto del eje de la flecha, F_c es la fuerza centrífuga y w es la velocidad de rotación de la flecha. La fuerza F_c es igual al producto de la masa del disco por la aceleración normal del punto G . De la misma manera, la aceleración normal es igual al radio de rotación por el cuadrado de la velocidad angular, como se indica en la Ec. (1), donde w está expresada en radianes por segundo:

(1)

$$F_c = Ma = M(y + e)w^2$$

Figura 2. Esquema de un disco desbalanceado.



La flexión de la flecha generada por la velocidad angular tiene un comportamiento equivalente a un resorte y la fuerza de resistencia tiene un valor de k_y . Siendo k la constante de rigidez del sistema. Para que dicho sistema esté en equilibrio, la fuerza de resistencia debe ser igual a la fuerza centrífuga, como se indica en la Ec. (2):

(2)

$$k_y = M(y + e)w^2$$

Entonces, la

deflexión de la flecha es:

$$y = \frac{ew^2}{\left(\frac{k}{M}\right) - 2} \tag{3}$$

De la Ec. (3), es claro notar que cuando $w = 0$, la deflexión es cero. Por otro lado, cuando $w^2 = k/M$, y tiende a un valor infinito. Para esta condición, w se conoce como la velocidad crítica w_n :

$$w_n = \sqrt{\frac{k}{M}} \tag{4}$$

La Fig. 3 representa a la ecuación (3). Es claro observar que cuando $w < w_n$, y es positiva y cambia de signo cuando $w_n > w$. Para velocidades angulares muy altas, y tiende al valor negativo de la excentricidad e . Obviamente, las mayores deflexiones se dan para valores cercanos a la frecuencia natural w_n .

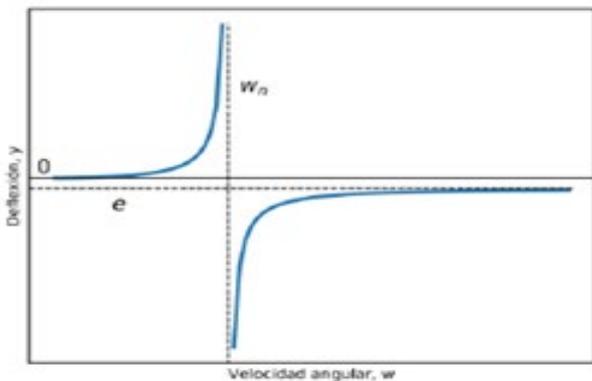


Figura 3. Gráfico de la velocidad angular vs deflexión de la flecha.

Se tiene que, para el arreglo del experimento (Fig. 2), despreciando la masa de la flecha y considerando

que los apoyos están sobre chumaceras, la deflexión estática y_{st} está dada por la siguiente expresión:

$$y_{st} = \frac{Mga^2b^2}{3EIL} \tag{5}$$

Y de igual forma la velocidad crítica es:

$$w_n = \sqrt{\frac{3EIL}{Ma^2b^2}} \tag{6}$$

Donde, w_n es velocidad crítica (rad/s), E es el Módulo de elasticidad de la flecha (Pa), I es el Momento de inercia de la sección transversal de la flecha (m^4), g es la aceleración de gravedad (m/s^2), M es la masa del disco (kg), L es la distancia entre chumaceras (m), a es la distancia de la chumacera izquierda al disco (m) y b es la distancia de la chumacera derecha al disco (m).

De la Ec. (1), la fuerza centrífuga producida por un milímetro-kilogramo de desbalanceo en función de la velocidad angular se ilustra en la Fig. 4. Para este caso, $y = 0$, $e = 1$ mm y $M = 1$ kg. Como puede observarse, la influencia de una pequeña cantidad de desbalanceo a altas velocidades es muy significativa, debido a que está afectada por el cuadrado de la velocidad angular.

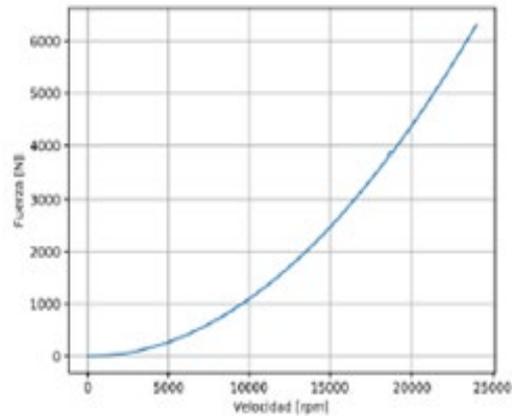


Figura 4. Efecto del desbalanceo unitario en la fuerza centrífuga.

DISCO SOBRE UNA FLECHA FLEXIBLE

Un modelo esquemático de la fuerza de fricción generada entre un eje eficiente también puede generar fricción entre las superficies. La fricción seca es una de las metodologías más utilizadas para su estudio y está dada por la siguiente Ec. (7) [8], [9]:

$$F_\mu = \mu F_N \sin(r\dot{\theta}) \tag{7}$$

Donde, F_μ es la fuerza de fricción sobre el punto de contacto entre las dos superficies, μ es el coeficiente de fricción, F_N es la fuerza normal, r es la distancia entre ambos círculos y θ es el ángulo de la fuerza normal contra la horizontal. Obsérvese que la fuerza de fric-

ción varía proporcionalmente con la fuerza normal. Se asume un coeficiente de fricción dinámico genérico de $\mu d = 0.18$ para el contacto entre superficies de acero.

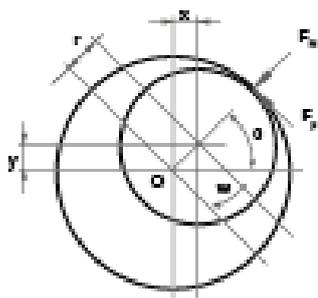


Figura 5. Esquema de la fricción entre dos rotores.

GRÁFICOS DE RECURRENCIA

RP es una representación de los estados de recurrencia de un sistema dinámico en su espacio de fase m-dimensional. Cada elemento del vector del espacio de fase \vec{x}^i ($i=1,2,\dots,N, \vec{x}^i \in R^m$) se compara con los otros mediante la siguiente relación [30]:

$$R_{i,j} = \Theta(\varepsilon - d(\vec{x}_i, \vec{x}_j)) \tag{8}$$

Donde $\Theta(\cdot)$ es la función escalón de Heaviside y ε representa el error de proximidad. La cercanía $d(\vec{x}^i, \vec{x}^j)$ típicamente se mide como una distancia en el espacio en términos del máximo o de la norma Euclidiana $d(\vec{x}^i, \vec{x}^j) = \|\vec{x}^i - \vec{x}^j\|$. La matriz binaria de recurrencia R contiene un valor para todos los pares $\|\vec{x}^i - \vec{x}^j\| < \varepsilon$. La trayectoria puede reconstruirse de las series de tiempo $\{u_i\}$ N $i=1$ por un retardo de tiempo embebido.

$$\vec{x}_i = (u_i, u_{i+\tau}, \dots, u_{i+\tau(m-1)}) \tag{9}$$

Donde m es la dimensión embebida y τ es el retardo.

La matriz resultante muestra la línea de identidad formada por la diagonal principal $R_{i,j}=1$. Cuando se usa una distancia en el espacio como el criterio de recurrencia, la matriz RP es simétrica. En dicha matriz se pueden observar y cuantificar las pequeñas variaciones sobre las líneas verticales y diagonales, las cuales reflejan y cuantifican la dinámica del sistema.

La matriz RP da un patrón visual, mediante el que se identifican cualitativamente los fenómenos dinámicos en el sistema sujeto de estudio. Por la homogeneidad del patrón se determina si el sistema es estacionario o no estacionario, y si el proceso contiene tendencias o cambios. Por la periodicidad del patrón son identificados los procesos cíclicos y su distancia en tiempo. Los puntos simples discontinuos indican la existencia de fuertes fluctuaciones y, cuando sus distancias de separación son irregulares, significa que los procesos son quasi periódicos. Las líneas diagonales paralelas dan a

conocer la evolución del sistema, si existe un proceso determinístico, caótico o inestable. Las líneas verticales y horizontales representan a algunos estados que no cambian o lo hacen muy lentamente por algún tiempo. Estructuras con líneas curvadas expresan la evolución de los estados en diferentes tiempos a una velocidad diferente y en la que la dinámica del sistema puede ser cambiante [30].

DESCOMPOSICIÓN EMPÍRICA DE LOS MODOS DE VIBRACIÓN DE UNA SEÑAL EN EL DOMINIO DEL TIEMPO

EMD es un método para analizar los sistemas no lineales y no estacionarios. La esencia de esta técnica es la descomposición de las series de datos complejos en el dominio del tiempo en un número finito de funciones modales intrínsecas, IMFs por sus siglas en inglés (Intrinsic Mode Functions). Dicha metodología de descomposición es adaptativa y muy eficiente. La descomposición se basa en la extracción de la energía del espectro asociada con las diferentes escalas de tiempo intrínsecas, las cuales son los parámetros más importantes del sistema [25]. El método consiste en identificar a todos los máximos y mínimos locales de la serie de tiempo, construir una envolvente con splines cúbicos para cada una de las series de máximos y mínimos con base en una interpolación. A continuación, se calcula y se sustrae una tercera envolvente con los valores medios para cada tiempo de las envolventes máximas y mínimas; estas forman las IMFs, respectivamente. Este procedimiento se repite hasta que se cumplan las condiciones siguientes: que la media entre las envolventes máxima y mínima tienda a cero y que el número de extremos y cruces por cero no difiera por más de la unidad.

El resultado de este proceso genera un número finito de IMFs y una función residual, como se muestra en la siguiente expresión [28]:

$$x(t) = \sum_{i=1}^N IMF_i(t) + R_N(t) \tag{10}$$

Donde, $IMF_i(t)$ representa a todas las posibles IMFs, N es el número de IMFs generadas y $R_N(t)$ es un residuo de la descomposición.

INTEGRACIÓN DE LA ACELERACIÓN Y DE LA VELOCIDAD.

Para encontrar el espectro del desplazamiento es necesario integrar dos veces la vibración en función de la aceleración. Los dos métodos más utilizados para realizar las integraciones tienen lugar en el dominio del tiempo y de la frecuencia. En la integración en el dominio de la frecuencia, la señal original se pasa a los gráficos de



frecuencia mediante la transformada de Fourier, luego se integra ya sea una o dos veces, para finalmente regresar los resultados al dominio del tiempo y obtener la velocidad y el desplazamiento. En cada integración se generan tendencias debidas al error acumulativo del método y a la discretización de los datos. Dichas tendencias deber ser corregidas para dar confiabilidad a los resultados [29]. Los efectos de las tendencias son corregidos mediante la extracción de la curva que representa la tendencia obtenida por un ajuste polinomial, y cada vez se emplea más el método EMD para el procesamiento de señales [31], [32].

En funciones simples, un polinomio de segundo orden normalmente resuelve el problema; sin embargo, en vibraciones complejas, el grado del polinomio se incrementa y se vuelve un tanto subjetivo. En el presente artículo, la corrección de la tendencia se realiza mediante el método de EMD.

Además de lidiar con las tendencias, existe el desconocimiento de las condiciones iniciales de la velocidad y el desplazamiento, las cuales suelen ser definidas como cero. Esta consideración genera errores de desplazamientos verticales y horizontales en los resultados, mismos que también deben ser manejados para minimizar los errores en la integración [29].

La regla de Simpson se divide en dos tipos: 1/3 y 3/8, como se muestra a continuación:

a) Regla de Simpson 1/3:

$$I_{1/3} = \int_{t_0}^{t_1} f(t)dt \approx \frac{t_1 - t_0}{6} (f(t_0) + 4f(\frac{t_1 + t_0}{2}) + f(t_1)) - \frac{(t_1 - t_0)^5}{2880} f^{(4)}(\xi) \quad (11)$$

b) Regla de Simpson 3/8:

$$I_{3/8} = \int_{t_0}^{t_1} f(t)dt \approx \frac{t_1 - t_0}{8} (f(t_0) + 3f(\frac{t_1 + 2t_0}{3}) + 3f(\frac{2t_1 + t_0}{3}) + f(t_1)) - \frac{(t_1 - t_0)^5}{6480} f^{(4)}(\xi) \quad (12)$$

Donde, t_0 y t_1 son el tiempo inicial y final del rango de estudio, respectivamente, $f \in C^4(t_0, t_1)$. Ambas expresiones tienen una precisión de tercer orden y, como puede observarse, el tipo 3/8 tiene el error de truncamiento menor, $e(f)$.

$$e(f) = \frac{(t_1 - t_0)^5}{6480} f^{(4)}(\xi) \quad (13)$$

Buscando la mayor precisión y el menor tiempo de procesamiento en la integración, se usó la regla de Simpson 3/8 en el presente trabajo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El experimento consistió en analizar las fallas por desbalanceo con y sin fricción del rotor mostrado en la Figura 1. Se analizaron seis condiciones de operación como se indican en la Tabla 1. La masa del desbalanceo fue constante y los cálculos se realizaron para dos velocidades. La velocidad de análisis siempre estuvo

por debajo de la velocidad crítica, que para el caso tiene un valor de $\omega_n = 4\ 575$ rpm.

Tabla 1. Condiciones de prueba del experimento.

CASO No.	CONDICIÓN DE PRUEBA	VELOCIDAD (RPM)
1	Sin Desbalanceo	250
2	Sin Desbalanceo	500
3	Con Desbalanceo	250
4	Con Desbalanceo	500
5	Sin Desbalanceo + Fricción	250
6	Sin Desbalanceo + Fricción	500
7	Con Desbalanceo + Fricción	250
8	Con Desbalanceo + Fricción	500

El sistema para la adquisición de datos consiste en un controlador embebido CompactRIO cRio-9074, 8 ranuras, CPU 400 MHz, 128 MB RAM, almacenamiento 256 MB, FPGA de 2M de Compuertas de National Instruments. Contiene un módulo de 4 canales NI9234 para la adquisición de datos dinámicos, un canal para entradas análogas NI9205 y otro módulo digital con 32 canales NI9403. Los datos fueron adquiridos y procesados mediante un programa elaborado en el paquete de ingeniería LabVIEW.

Para medir la aceleración se utilizó un acelerómetro uniaxial ADXL103 con un rango de medición de ± 1.7 g, una sensibilidad de 1 000 mV/g y un ancho de banda de 0.5 Hz a 2.5 kHz. El acelerómetro fue colocado en posición vertical y ubicado por debajo del primer apoyo A del rotor según la Figura 1. La celda de carga es de la marca Rhino tipo RH1242 con una capacidad para 100 kg de carga.

Para la adquisición de datos de aceleración, la frecuencia de adquisición del sistema fue de 3 kHz, tomando muestras de 20 bloques de 1 042 datos cada uno. Lo cual da una resolución muestral bastante fina y, por tanto, sobrada para el caso analizado.

Es importante conocer la velocidad crítica del sistema para evitar trabajar bajo su influencia; ésta fue $\omega_n = 4\ 775.7$ rpm. De la Ec. (6), para $M = 0.819$ kg, $a = b = 350$ mm, $L = 700$ mm, $E = 2.1E^{11}$ Pa, $I = 6.397E^{-9}$ m⁴ y considerando un material AISI 4140 para la flecha. Las velocidades de prueba fueron de 250 rpm y 500 rpm.

Como primer paso se tomaron los espectros de aceleración para cada uno de los casos. Se realizaron 20

mediciones por cada caso estudiado. Cada espectro fue procesado para hacer coincidir la media con el valor de cero de la amplitud de la vibración. Todos los datos fueron normalizados para el proceso de integración. Cabe subrayar que el interés del presente trabajo es la cualificación de los patrones del comportamiento dinámico del sistema analizado y, específicamente, la identificación del comportamiento no lineal originado por la fricción. Los espectros de la aceleración para cada caso son mostrados en la Fig. 6.

A continuación, cada espectro de aceleración fue integrado por la regla de Simpson 1/3. Solo se analiza el primer caso con la intención de dar a conocer la metodología aplicada al procesamiento de la señal para obtener la velocidad. Para todos los casos la condición inicial, tanto para la velocidad como para el desplazamiento, fue de cero. El procesamiento de las señales se llevó a cabo mediante un algoritmo realizado en Python, por lo que todos los resultados tuvieron el mismo procesamiento.

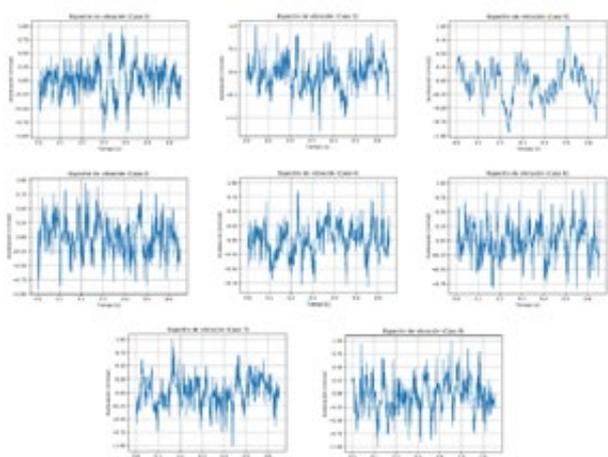
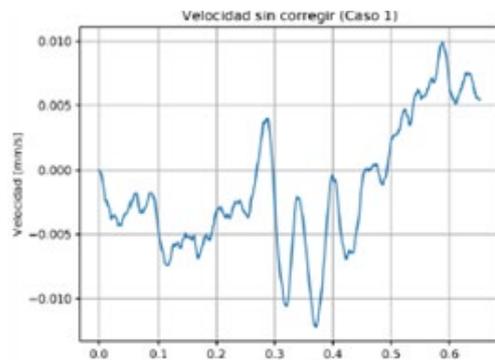


Figura 6. Espectros de aceleración de cada caso analizado.

Como resultado de la integración se obtuvo el espectro de velocidad de la Fig. 7. Como puede observarse, existe una tendencia debida a los errores de integración, las condiciones iniciales, las frecuencias parásitas y los errores de medición.

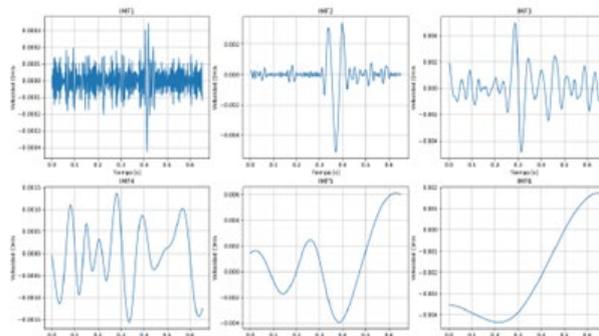
En este tipo de integraciones, las frecuencias bajas son amplificadas mientras que las frecuencias altas son disminuidas. A pesar de tratarse de un caso simple de desbalanceo —y posiblemente un poco de desalineación que se ha despreciado—, la tendencia no es lineal. Esta no linealidad en la tendencia de integración complica la búsqueda del polinomio de bajo orden. Mediante la técnica de mínimos cuadrados es factible encontrar dicha tendencia, sin embargo, este proceso se vuelve un tanto subjetivo dado que deja la elección



del grado del polinomio a la persecución del usuario. Figura 7. Velocidad obtenida con la integración con el método de Simpson 1/3.

En el presente trabajo, la tendencia debida a la integración es determinada por el método de EMD. Al descomponer la señal en sus IMFs, los primeros IMFs representan a las frecuencias más altas, y los finales corresponden a las frecuencias más bajas. De esta manera se tiene todo el abanico de posibilidades para estimar claramente la tendencia de la integración, además se da la posibilidad de eliminar las frecuencias que no sean de interés; para el caso de estudio solo se eliminará la tendencia de los errores de la integración.

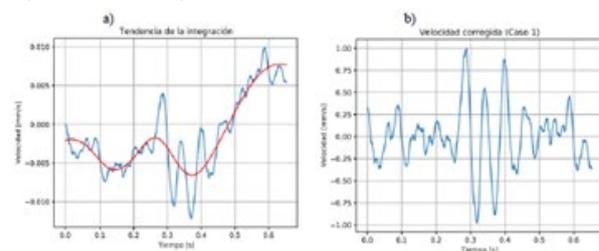
Aplicando el método EMD al espectro de velocidad calculado por la integración se obtuvieron los 6 IMFs de la Fig. 8. Los dos últimos IMFs reúnen las características



útiles para determinar la tendencia de la velocidad.

Figura 8. IMFs extraídos de la velocidad.

Al combinar el IMF5 e IMF6 se obtiene la tendencia que coincide con la tendencia de integración de la velocidad representada por la curva en color rojo (Fig. 9a). Cabe señalar que no solo se encuentra la tendencia del espectro, sino que también se hace la corrección debida



al valor inicial; esto puede observarse en la Fig. 9b.

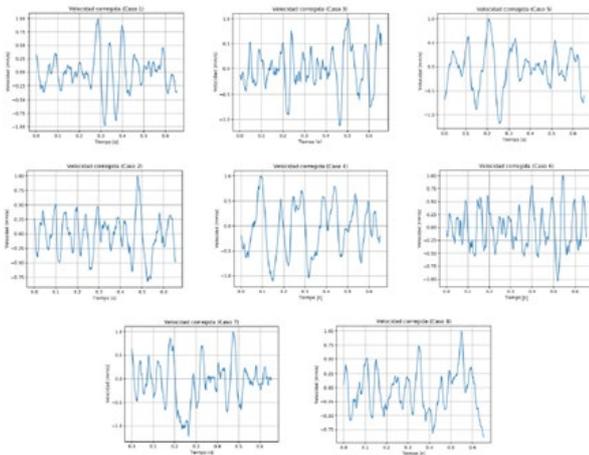


Figura 9. Corrección de la tendencia de la velocidad por EMD.

A continuación, se vuelve a integrar el espectro de la velocidad para calcular el desplazamiento. El proceso se repite para cada uno de los ocho casos analizados. La figura 10 presenta una compilación de cada uno de los espectros de velocidad.

En una comparación visual entre la aceleraciones y velocidades obtenidas, se observa que las velocidades presentan espectros más suavizados, como si el proceso de integración por medio de EMD realizase una especie de filtrado. Cabe recordar que solo se eliminaron los dos últimos IMF, los cuales corresponden a la tendencia de integración y la frecuencia más baja.

En todos los casos, la combinación de ambos fue la que dio la mejor tendencia debida a la integración. Sin embargo, los espectros muestran una consistente representación del comportamiento con respecto al espectro de aceleración. A simple vista, es difícil encontrar di-



ferencia significativa entre los casos con y sin fricción.

Figura 10. Velocidades corregidas con EMD para los ocho casos.

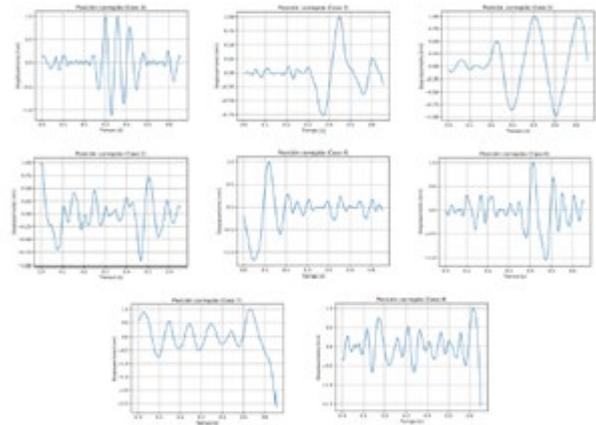
La Fig. 11, resume los desplazamientos obtenidos como resultado de la segunda integración. Nótese que éstos muestran un mayor grado de suavidad en su trazo. Del proceso de la segunda integración se obtuvieron como máximo 3 IMFs y un mínimo de 2. Es evidente que a medida en que se aplica el proceso sobre un mismo espectro tienden a disminuir los modos intrínsecos empíricos. Esta disminución influye en la información del resultado. A estas alturas solo se tiene el comportamiento más significativo de sistema dinámico. Sin embargo, los espectros no presentan errores de tendencia.

Los casos 7 y 8 tienen una terminación más prolongada de lo normal, posiblemente se deba a los errores del método EMD que se da en las terminaciones de los splines en los puntos finales de la serie. Este es un problema del método y en ocasiones también aparece en los puntos iniciales. Existen técnicas para solucionar

esta situación, sin embargo, se ha preferido dejarlos así al igual que a todos los casos para fines comparativos. Tampoco es fácil observar alguna diferencia entre los casos con y sin fricción a estas alturas.

Los espectros de desplazamiento son la base para la construcción de los diagramas de recurrencia. Los errores utilizados para cada RP se muestran en la Tabla 2. Todos los errores resultaron ser de $\epsilon=0.01$. Cada caso fue desarrollado con los mismos parámetros.

Con respecto a la fuerza de fricción normalizada generada por las condiciones de trabajo los casos 5 y 7 alcanzaron los valores más altos porque la velocidad tangencial es menor que en el caso 6 y 8, esto significa que con el incremento de la velocidad disminuyó el coeficiente de fricción entre las superficies dentro del rango de velocidades de estudio. Esta situación resulta



lógica al compararlos contra los valores del coeficiente de fricción estático.

Figura 11. Velocidades corregidas con EMD para los ocho casos analizados.

Tabla 2. Error de recurrencia de RP y fuerza de fricción.

CASO No.	ERROR DE RECURRENCIA	FUERZA DE FRICCIÓN (N)
1	0.01	0
2	0.01	0
3	0.01	0
4	0.01	0
5	0.01	0.94
6	0.01	0.77
7	0.01	1.00
8	0.01	0.60

Como una información adicional sobre el comportamiento dinámico del sistema y aprovechando los valores de la velocidad y del desplazamiento, se construyeron las trayectorias de la fase en el espacio en para cada caso y pueden observarse en la Fig. 12.

En seguida se muestran los RPS para los cuatro primeros casos en los que no se aplica fricción. Para estos casos el disco gira libremente en su dirección radial y solo está expuesto a flexión por el efecto del desbalanceo y su velocidad.

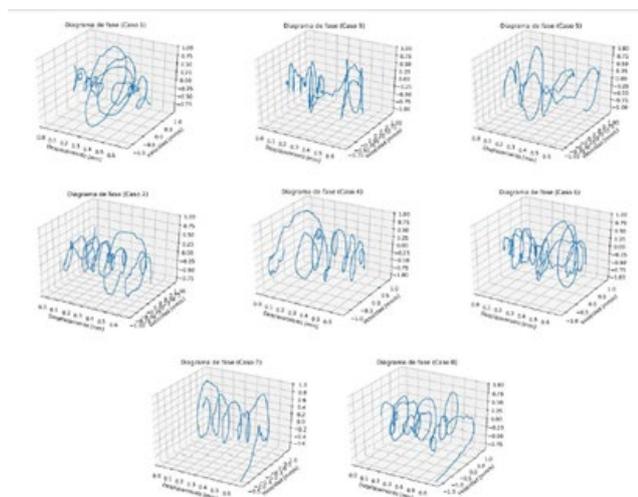


Figura 12. Diagramas de fase para cada caso analizado.

La interpretación de cada gráfico está desarrollada en la Tabla 2. De acuerdo con dicha tabla se realizó un análisis cualitativo tomando como base las características de la tipología y la textura de los RPS. Se identificaron los patrones de homogeneidad del sistema, la periodicidad, la existencia de corrimientos y si existen comportamientos disruptivos, es decir, cambios súbitos del sistema.

De igual manera, se analizó e interpretó la existencia de puntos, líneas diagonales y verticales. La idea del análisis fue identificar mediante los RPS el fenómeno no lineal generado por la aplicación de la fuerza de fricción sobre el diámetro exterior del disco.

La diagonal principal de los gráficos de recurrencia es el eje de simetría de las figuras y en todos los casos es la línea diagonal que une al vértice superior izquierdo con el vértice inferior derecho.

El análisis de la Tabla 3 mostró que los RPS sujetos a fricción presentaron una diferencia significativa en la tipología del gráfico. Dado que el sistema analizó la falla por desbalanceo con y sin fricción, queda claro que la diferencia en la tipología se debe al fenómeno no lineal de la fricción. Los dos casos más representativos del estudio son el número 4 y 8: visualmente hay una clara diferencia. De igual manera, el caso 1 con el disco sin desbalanceo y sin fricción, tiene una tipología caracterizada por los cuatro recuadros de alta densidad y las franjas verticales y horizontales.

Durante el procesamiento de las señales pudo constatarse que el método RP es muy sensible a los cambios en los espectros; sin duda, la atenuación de la señal tuvo influencia en los resultados. A pesar de lo errores debidos al proceso de integración, todos los casos fueron tratados con la misma metodología a través del algoritmo desarrollado para este efecto. Bajo estas condiciones, los resultados muestran en los diagramas claras características atribuidas a la fricción.

Tabla 3. Análisis cualitativo de los resultados para los ocho casos de estudio.

TIPOLOGÍA	CASOS ANALIZADOS			
	1	2	3	4
Homogeneidad	Homogeneidad típica de un sistema estacionario	Homogeneidad típica de un sistema estacionario	Homogeneidad típica de un sistema estacionario	Homogeneidad típica de un sistema estacionario
Periodicidad	Recuadros densos indican periodicidad inestable	Recuadros densos indican periodicidad inestable, geometría en esquina izquierda superior estabilidad	Recuadros densos pequeños indican poca periodicidad inestable, geometría circular en esquinas propias de estabilidad	Recuadros densos pequeños indican poca periodicidad inestable, geometría circular en esquinas propias de estabilidad
Corrimientos	No hay esquinas vacías características de corrimientos	No hay esquinas vacías características de corrimientos	No hay esquinas vacías características de corrimientos	No hay esquinas vacías características de corrimientos
Comportamiento disruptivo	Recuadros densos simétricos propios de un movimiento aleatorio	Recuadros densos simétricos propios de un movimiento aleatorio	Recuadros densos pequeño y simétricos propios de poco movimiento aleatorio	Recuadros densos pequeño y simétricos propios de poco movimiento aleatorio



TIPOLOGÍA	CASOS ANALIZADOS			
	1	2	3	4
TEXTURA:				
Puntos simples	Sin puntos simples indicando ausencia de ruido	Sin puntos simples indicando ausencia de ruido	Sin puntos simples indicando ausencia de ruido	Sin puntos simples indicando ausencia de ruido
Líneas diagonales	Sin líneas diagonales	Sin líneas diagonales	Sin líneas diagonales	Pequeñas líneas paralelas interrumpidas indicando mismas órbitas
Líneas verticales / horizontales	Claras líneas verticales y horizontales señalando un comportamiento con cambios suaves	Claras líneas verticales y horizontales señalando un comportamiento con cambios suaves	Claras líneas verticales y horizontales señalando un comportamiento con cambios suaves	Claras líneas verticales y horizontales señalando un comportamiento con cambios suaves
TIPOLOGÍA	CASOS ANALIZADOS			
	1	2	3	4
Homogeneidad	Homogeneidad típica de un sistema estacionario con cierta perturbación en la parte superior de la diagonal	Homogeneidad típica de un sistema estacionario con cierta perturbación en la parte superior de la diagonal y esquinas	Homogeneidad típica de un sistema estacionario con cierta perturbación en la parte superior de la diagonal	La mayor homogeneidad típica de un sistema estacionario con ciertas perturbaciones localizadas
Periodicidad	línea principal dividida por líneas perpendiculares mostrando una periodicidad compleja con órbitas inestables	Estructura mostrando una periodicidad irregular, puede deberse a la no linealidad de la fricción.	línea principal dividida por líneas perpendiculares mostrando una periodicidad compleja con órbitas inestables	Estructura mostrando una periodicidad irregular, puede deberse a la no linealidad de la fricción.
Corrimientos	No hay esquinas vacías características de corrimientos	No hay esquinas vacías características de corrimientos	No hay esquinas vacías características de corrimientos	No hay esquinas vacías características de corrimientos
Comportamiento disruptivo	Sin cambios súbitos	Recuadros densos pequeños simétricos propios de poco movimiento aleatorio	Sin cambios súbitos	Recuadros pequeños propios de poco movimiento aleatorio
TEXTURA:				
Puntos simples	Sin puntos simples indicando ausencia de ruido	Sin puntos simples indicando ausencia de ruido	Sin puntos simples indicando ausencia de ruido	Sin puntos simples indicando ausencia de ruido
Líneas diagonales	Pequeñas líneas paralelas interrumpidas indicando mismas órbitas	Sin líneas diagonales paralelas de un sistema aleatorio	Pequeñas líneas paralelas interrumpidas indicando pasos por la misma órbita	Pequeñas líneas paralelas y perpendiculares interrumpidas indicando pasos por la misma órbita
Líneas verticales / horizontales	Claras líneas verticales y horizontales señalando un comportamiento con cambios poco suaves	Zona localizada con ambos tipos de líneas indicando un sistema relativamente estable	Claras líneas verticales y horizontales señalando un comportamiento con cambios poco suaves	Pocas pequeñas líneas indicando un sistema poco estable

A continuación, se presentan los RPS correspondientes a los ocho casos analizados en la Fig. 13. Su interpretación cualitativa está dada en la Tabla 3.

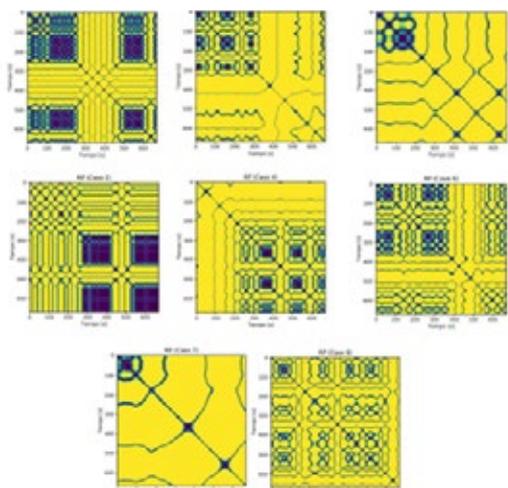


Figura 13. RPS para los ocho casos de estudio.

CONCLUSIONES

De acuerdo con el análisis de los casos de estudio sobre el comportamiento dinámico del sistema formado por el ensamble de un disco sobre una flecha apoyada en dos chumaceras de manera simétrica, se aplicó una fuerza de fricción ejercida por la acción de una celda de carga sobre la superficie exterior del disco. Fueron analizadas cuatro combinaciones operacionales a dos velocidades diferentes y el objetivo fue identificar cualitativamente la influencia de la fricción a través de los RPS. En el modelo fue despreciado el peso de la flecha y el efecto de las chumaceras.

Los resultados mostraron una significativa diferencia cualitativa entre los dos casos extremos, 4 y 8, correspondientes a la condición de desbalanceo sin fricción y con fricción respectivamente. De acuerdo con la tipología pudo detectarse la presencia del fenómeno no lineal por la fricción.

Se observó que el método de RP es muy sensible a los cambios en los espectros de vibración y que el proceso de integración afecta los resultados.

La obtención de la velocidad y del desplazamiento se realizó por medio de la integración de Simpson 1/3. Para corregir las tendencias debidas a los errores de la integración y de las condiciones iniciales fue aplicada la técnica EMD. El método EMD mostró un filtrado de datos por cada integración y al final se obtuvieron espectros suavizados. Al parecer es posible que se perdieran algunas frecuencias altas y bajas durante el proceso. No obstante, con los resultados obtenidos, se pudo lograr identificar la influencia de la fricción en los RPS.

Como trabajos futuros, puede trabajarse en la caracterización de la sensibilidad del análisis de RPS en otros

tipos de fallas que incluyan fenómenos no lineales, tales como baleros y engranes. El presente estudio debe complementarse con un análisis cuantitativo para tener un resultado más concluyente. De igual manera, es deseable incrementar el rango de velocidades de estudio para tener una mejor caracterización de la falla en cuestión. Dado que el método de integración tiene influencia en los resultados, es importante mejorarlos o probar con otras técnicas para incrementar la confiabilidad de los resultados, o bien confirmarlos. De igual manera, se deberá incluir la medición de vibración en plano radial horizontal para caracterizar el comportamiento en dicha dirección.

REFERENCIAS

- [1] Alejandro A. Lozano Guzman, Juan Carlos A. Jáuregui Correa, "Las Vibraciones Mecánicas en el Mantenimiento Predictivo", *Colección fundap Ciencia y Tecnología para el Desarrollo*, 2013.
- [2] Imrich Vojtko, Petr Baron, Martin Pollák, "Examining the Effect of Alignment of the Rotor of the Emissions Exhaust Fan on Its Operating Parameters", *Hindawi, Advances in Materials Science and Engineering*, Volume 2019, Article ID 4985395, 13 pages, <https://doi.org/10.1155/2019/4985395>.
- [3] William Olarte C., Marcela Botero, A, Benhur A. Cañon Z., "Análisis de vibraciones: una herramienta clave en el mantenimiento predictivo", *Scientia et Technica*, Año XVI, No 45, agosto de 2010. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701.
- [4] BS EN 13303:2017, "Maintenance terminology, British Standards Institution", 2019.
- [5] J.-P. Eckmann, S. Oliffson, D. Ruelle, "Recurrence Plots of Dynamical Systems", *Europhysics Letters*, 5 (1987) 973–977.
- [6] Sylwester Samborski, Jakub Wiczorkiewicz, Rafal Rusinek, "A numerical-experimental study on damaged beams dynamics", *Eksploatacja Niezawodnosc – Maintenance and Reliability* 2015; 17 (4): 624–631, <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2015.4.20>.
- [7] Shan Kan, Andy C. Tan, Joseph Mathew, "A review on prognostic techniques for non-stationary and non-linear rotating Systems", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015.
- [8] J. C. Jauregui-Correa, "Identification of nonlinearities in mechanical systems using Recurrence Plots" in *Nonlinear Structural Dynamics and Damping*, Springer, 2019.
- [9] J. C. Jauregui-Correa, *Nonlinear Structural Dynamics and Damping*, Springer, 2019.
- [10] S. P. Mogal, D. I. Lalwani, "Experimental investigation of unbalance and misalignment in rotor bearing system using order analysis", *Journal of Measurements in Engineering*, volume 3, issue 4, 2015.



- [11] Guilherme Kenji Yamamoto, Cesar da Costa, João Sinohara da Silva Sousa, "A smart experimental setup for vibration measurement and imbalance fault detection in rotating machinery", *Case Studies in Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 4, Pages 8-18, , 2016. ISSN 2351-9886, <https://doi.org/10.1016/j.csmssp.2016.07.001>.
- [12] S. Sendhilkumar and N. Mohanasundaram and M. Senthilkumar and S. N. Sivanandam, "Elman Neural Network for Diagnosis of Unbalance in a Rotor-Bearing System", *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, World Academy of Science, Engineering and Technology, Open Science Index 111, 2016, <https://publications.waset.org/pdf/10004647>.
- [13] Stefan Heindel, Fabian Becker, Stephan Rinderknecht, "Unbalance and resonance elimination with active bearings on a Jeffcott Rotor", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 85, Pages 339-353, ISSN 0888-3270, <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.08.016>.
- [14] Md. Mizanur Rahman, Mohammad Nasir Uddin, "Online Unbalanced Rotor Fault Detection of an IM Drive Based on Both Time and Frequency Domain Analyses", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 85, Pages 339-353, ISSN 0888-3270, <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.08.016>.
- [15] René Bartkowiak, "Controlled synchronization at the existence limit for an excited unbalanced rotor", *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Volume 91, Pages 95-102, 2017. ISSN 0020-7462, <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2017.02.012>.
- [16] Hongrui Cao, Dong He, Songtao Xi, Xuefeng Chen, "Vibration signal correction of unbalanced rotor due to angular speed fluctuation", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 107, Pages 202-220, 2018. ISSN 0888-3270, <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.01.030>.
- [17] Huaxia Deng, Yifan Diao, Jin Zhang, Peng Zhang, Mengchao Ma, Xiang Zhong and Liandong Yu, "Three-Dimensional Identification for Unbalanced Mass of Rotor Systems in Operation", *Applied sciences*, vol. 8, 2018. doi:10.3390/app8020173, www.mdpi.com/journal/applsci.
- [18] Boris Andrievsky, Alexander L. Fradkov, Olga P. Tomchina, Vladimir I. Boikov "Angular Velocity and Phase Shift Control of Mechatronic Vibrational Setup", *IFAC-PapersOnLine*, This work was partly supported by the RFBR (Grants 17-08-01728), Volume 52, Issue 15, Pages 436-441, 2019, ISSN 2405-8963, <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.714>.
- [19] N. Ahobal and S. L. Ajit prasad, "Angular Velocity and Phase Shift Control of Mechatronic Vibrational Setup", *IOP Publishing Ltd, ICONAMMA2018, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 577 (2019) 012140, IOP Publishing, doi:10.1088/1757-899X/577/1/012140.
- [20] Rodrigo Veronese Moreira, Alberto Paiva, "The Influence of Friction in Rotor-Stator Contact Nonlinear Dynamics", *Springer Nature Switzerland AG 2019*, K. L. Cavalca and H. I. Weber (Eds.): *IFTOMM 2018, MMS 61*, pp. 428-441, 2019, https://doi.org/10.1007/978-3-319-99268-6_30.
- [21] PeterW. Tse, Dong Wang, "State Space Formulation of Nonlinear Vibration Responses Collected from a Dynamic Rotor-Bearing System: An Extension of Bearing Diagnostics to Bearing Prognostics", *Sensors*, vol. 17, 2017. doi:10.3390/s17020369. www.mdpi.com/journal/sensors.
- [22] Sangbo Han, "Measuring displacement signal with an accelerometer†", *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 24 (6), pp. 1329-1335, 2010. DOI 10.1007/s12206-010-0336-1, www.springerlink.com/content/1738-494x.
- [23] Heuisoo Han, Mincheol Park, Sangki Park, Juh-yong Kim y Yong Baek, "Experimental Verification of Methods for Converting Acceleration Data in High-Rise Buildings into Displacement Data by Shaking Table Test", *Appl. Sci.* vol. 9(8), 2019. doi:10.3390/app9081653, www.mdpi.com/journal/applsci.
- [24] Renato Ferrero, Filippo Gandino, Masoud Hemmatpour, "Estimation of Displacement for Internet of Things Applications with Kalman Filter", *Electronics*, vol. 8, 2019. doi:10.3390/electronics8090985, www.mdpi.com/journal/electronics.
- [25] Hongjun Wang, Yongjian Ji, "A Revised Hilbert-Huang Transform and Its Application to Fault Diagnosis in a Rotor System", *Sensors*, vol. 18, 2018. doi:10.3390/s18124329, www.mdpi.com/journal/sensors
- [26] Hongjun Wang, Yongjian Ji, "Effect of Different Detrending Approaches on Computational Intelligence Models of Time Series", *wcci 2010 ieee World Congress on Computational Intelligence, July, ccib, Barcelona, Spain18-23*, 2010.
- [27] Ricardo Araújo Rios, Rodrigo Fernandes de Mello, "Applying Empirical Mode Decomposition and mutual information to separate stochastic and deterministic influences embedded in signals", *Signal Processing*, vol. 118, pp. 159-176, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sigpro.2015.07.003>.
- [28] Hongjun Wang, Yongjian Ji, "A Revised Hilbert-Huang Transform and Its Application to Fault Diagnosis in a Rotor System", *Sensor*, vol. 18, 2018. doi:10.3390/s18124329, 2018, 18, 4329; doi:10.3390/s18124329.
- [29] Jingbo Xu, Xiaohong Xu, Xiaomeng Cui, "A new recursive Simpson integral algorithm in vibration testing", *Australian Journal of Mechanical Engineering*, <https://doi.org/10.1080/14484846.2019.1682805>.
- [30] Marwan, M. C. Romano, M. Thiel, J. Kurths: "Re-

urrence Plots for the Analysis of Complex Systems”, *Physics Reports*, vol. 438(5-6), pp. 237-329, 2007.

[31] Neeraj Bokde, Andrés Feijóo, Daniel Villanueva, Kishore Kulat, “A Review on Hybrid Empirical Mode Decomposition Models for Wind Speed and Wind Power Prediction”, *Energies*, vol. 12, 2019. doi:10.3390/en12020254, www.mdpi.com/journal/energies.

[32] Alexander Voznesensky, Dmitrii Kaplun, “Adaptive Signal Processing Algorithms Based on EMD and ITD”, *Access*, doi:10.1109/ACCESS.2019.2956077

ÁREAS DE OPORTUNIDAD PARA LA ACTUALIZACIÓN DE VALORES CATASTRALES DE SUELO HABITACIONAL EN ZONAS URBANAS

Opportunities for updating cadastral values of residential land in urban areas.

Pablo Jesús Bueno Villegas¹, José Luis Alcántara Obregón¹, Verónica Leyva Picazo¹,
Sandra Hernández López¹

¹ Universidad Autónoma de Querétaro
Querétaro, México.

*Correo electrónico: pbuenov@gmail.com

RESUMEN

En Latinoamérica los valores de suelo, que son la base para el cobro de las contribuciones sobre la propiedad inmobiliaria (valores catastrales), presentan cierta desactualización. En México, cerca de la mitad de los valores base se encuentran desactualizados hasta por 15 años, hecho que por sí mismo contraviene las leyes nacionales. Esta desactualización representa una pérdida económica en los ingresos municipales, lo cual se ve reflejado en estudios de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) que posicionan los impuestos al patrimonio en México por debajo del porcentaje respecto al producto interno bruto (PIB) promedio de América Latina y el Caribe. El presente artículo sirve como análisis bibliográfico para el desarrollo de futuros trabajos y provee una base teórica en la actualización de valores catastrales. Se encontraron elementos de convergencia dentro de las diferentes metodologías que posibilitan identificar las áreas de oportunidad para la actualización de los valores catastrales de suelo a través del análisis del proceso general de actualización. Se concluye que la actualización de valores catastrales de suelo es posible y factible mediante la participación de dos instituciones consolidadas en México que, si bien no fueron creadas con el fin expreso de servir para el incremento de las contribuciones municipales sobre la propiedad inmobiliaria, reducirán una de las partes más complicadas del proceso de actualización de valores catastrales de suelo.

PALABRAS CLAVE: VAL, valuación de suelo, valuación catastral, valuación masiva, impuestos municipales, catastro multifinanciado.

ABSTRACT

In Latin America, land values, the basis for the collection of taxes on real estate (cadastral values), are rather outdated; in Mexico, about half of the base values are outdated by up to 15 years, a fact that in itself contravenes national laws. It represents an economic loss in municipal revenues, which is reflected in OECD studies that position wealth taxes in Mexico below the percentage with respect to the average GDP of Latin America and the Caribbean. This article will serve as a bibliographic analysis for the development of future works and will provide a theoretical basis for updating cadastral values. Convergence elements were found within the different methodologies that make it possible to identify areas of opportunity for updating land cadastral values through the analysis of the general updating process. It is concluded that updating cadastral land values is possible and facilitated through the participa-

tion of two consolidated institutions in Mexico, which, although they were not created with the express purpose of serving to increase municipal taxes on real estate, will reduce some of the most complicated parts of the long process of updating land cadastral values.

KEYWORDS: VAL, land valuation, cadastral valuation, massive valuation, municipal taxes, multipurpose cadastre.

INTRODUCCIÓN

En México, a partir de la descentralización fiscal que comenzó en los años ochenta, los municipios se han visto dotados de la capacidad institucional para recabar impuestos propios. De la reforma de 1999 al artículo 115 constitucional: “los ayuntamientos podrán proponer a las legislaturas para efectos de la ley de ingresos municipales, las cuotas y tarifas aplicables a impuestos, derechos, contribuciones de mejoras y de la propiedad inmobiliaria” [1]. Esta autonomía de los municipios en México incrementa sus libertades en el ejercicio de las riquezas, al no depender de recursos etiquetados previamente por otras instancias gubernamentales [2]. Sin embargo, esta autonomía fiscal no se ve reflejada dentro de las finanzas municipales.

En la actualidad, la hacienda municipal depende en 70 % de las transferencias de la federación y los estados, solo 21 % proviene de ingresos propios (impuestos, derechos, productos y aprovechamientos), y el predial contribuye en apenas 8.8 % a los ingresos públicos de la hacienda local. [3]

La propiedad inmobiliaria, el suelo y las construcciones adheridas, tiene el potencial de proveer al municipio de más impuestos de los que actualmente proporciona; la desactualización de los valores catastrales respecto al mercado es uno de los factores que limitan este incremento en la recaudación [4]. Representa un espacio tributario poco aprovechado.

De acuerdo con datos de la OCDE, los impuestos al patrimonio en México tienen un nivel de recaudación muy bajo —0.3 % del Producto Interno Bruto (PIB)—, mientras que el promedio de América Latina y el Caribe es de 0.8 % del PIB (Argentina, Brasil y Colombia, 2.7, 2.0 y 2.1 %, respectivamente), y el promedio de los países miembros de la OCDE de 1.9 % del PIB. [5]

Como se puede observar, la realidad de los Estados en América Latina es preocupante en medida que se reconoce una desactualización en los valores reales (precio de mercado) de sus inmuebles [6]. El presidente del Instituto Mexicano de Catastro (Inmeca), durante el simposio “El reto del catastro”, resaltó que el 40 por ciento de los valores de suelo a nivel nacional están desactualizados, hasta con 15 años de atraso [7]. El problema de la desactualización de valores de suelo



afecta principalmente a los Estados Latinoamericanos; en México se encuentra arraigado política e institucionalmente a los municipios [3], su misma existencia quebranta el artículo quinto transitorio del decreto por el que se declara reformado y adicionado el artículo 115 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos de 1999, transcrito a continuación.

“Antes del inicio del ejercicio fiscal de 2002, las legislaturas de los estados, en coordinación con los municipios respectivos, adoptarán las medidas conducentes a fin de que los valores unitarios de suelo que sirven de base para el cobro de las contribuciones sobre la propiedad inmobiliaria sean equiparables a los valores de mercado de dicha propiedad”. [8]

VALUACIÓN MASIVA, UNA SOLUCIÓN COMPROBADA

La mayoría de los autores, dentro de los cuales destacan la Asociación Internacional de Peritos Valuadores y la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa, coinciden que la valuación masiva es el proceso de valorar un gran número de inmuebles referidos a la misma fecha [9], [10], [11]. De acuerdo con el Instituto de Administración y Avalúos de Bienes Nacionales, es el “Proceso de valorar, mediante un proceso selectivo a un universo de bienes inmuebles a una fecha determinada, utilizando una metodología estándar, con información común y que permita inferencias estadísticas”.

Generalmente, la valuación masiva se utiliza con fines catastrales [6], [11], [12], [13], [14], y tiene “la finalidad de homogeneizarlos y referenciarlos uniformemente con los valores de mercado” [12] para llegar a un valor objetivo e imparcial [6]. El uso de valuaciones masivas tiene sus orígenes a principios del siglo xx, con la necesidad de los gobiernos de realizar valuaciones precisas, baratas y justas para el establecimiento de impuestos a la propiedad [10], [12]. Puede considerarse dentro del Método Directo, pero también pueden utilizarse otros métodos al mismo tiempo, lo cual puede ser considerado como Método Mixto [9]. Se llevan a cabo un conjunto de técnicas estadísticas y se interpolan precios de mercado de los inmuebles, [15]. Los procedimientos pueden ser de carácter general, parcial o simplificado, y se prevé su aplicación tanto para bienes inmuebles urbanos como rurales [12].

En términos generales, el proceso que sigue la valuación masiva o colectiva consiste en elaborar normas y procedimientos de valuación, incluyendo formularios, manuales e instructivos; asimismo, se tienen que delimitar las colonias urbanas homogéneas y clasificar las

tierras en las zonas rurales; en seguida deben recopilarse los factores de influencia del valor, para que, con base en un análisis de sus antecedentes, así como de los datos sobre ventas observados, se fijen valores unitarios de los terrenos y construcciones. Una vez establecidos dichos valores, considerando el método de mercado, que es el más utilizado, se procede a aplicarlos a los datos específicos de cada predio. [14]

Los procesos de valuación masiva, mientras permitan la valuación del suelo en un nivel elevado, son una etapa clave de la política fiscal de los gobiernos locales y genera información de relevancia para el diseño de políticas de desarrollo urbano y de acceso al suelo para diversos sectores de la población [15]. En el contexto actual, los países de primer mundo han adoptado sistemas de valuación masiva pero esta implementación no es un proceso simple, sino que requiere de varios años, exige un presupuesto elevado, y es fundamental mantenerlo actualizado y realizar ciclos regulares de valuación, así como apoyarse en una buena estadística de valores reales de compraventa con el mantenimiento de un observatorio/registro de los valores de mercado [10].

OBSERVATORIOS DE VALOR, CONTINUIDAD Y CONSTANCIA

Las nuevas metodologías de valuación masiva incluyen Observatorios de Valor, donde se sintetizan datos del mercado inmobiliario [6] mediante una estructura administrativa y tecnológica que monitorea los valores de mercado a través de imágenes y censos [16]. El observatorio de valores del mercado inmobiliario es una de las bases metodológicas de un nuevo modelo propuesto para la actualización constante de los valores [10]. En España, por ejemplo, el uso del Observatorio Catastral del Mercado Inmobiliario es uno de los criterios analizados como base para la reglamentación, respecto a los estudios de mercado y métodos de valuación masivas [17].

La constitución de observatorios urbanos de valores es una iniciativa que busca aumentar y mejorar la información además de reducir los esfuerzos que generalmente realizan los involucrados [18]. En el contexto catastral, reducen costos y agilizan la actualización de los valores, al permitir generar información continua y completa mediante la correlación de los datos de distintas fuentes de manera rápida y confiable [19]. En países iberoamericanos, tales como Colombia, Chile y Guatemala, los observatorios de valores tienen el objetivo de cuidar y legitimar los valores que se actualicen y propongan. [20]

Los estudios económicos y la implementación de técnicas geoestadísticas y econométricas sobre la realidad

inmobiliaria han sido mejorados por la implementación de los observatorios, que otorgan mayor credibilidad y certeza a las decisiones que toma la administración municipal [16]. “En general, los observatorios de valor realizan levantamientos de datos para generar mapas de valores, necesarios para definir la política tributaria del impuesto predial, la contribución por mejoras y la recuperación de plusvalías” [19].

SIG, HERRAMIENTA ÚTIL

Los sistemas de información geográfica son herramientas que, en conjunto, permiten: obtener, almacenar, recuperar y desplegar datos georreferenciados para analizar fenómenos limitados en áreas específicas [21]. Un Sistema de Información Geográfica es capaz de realizar una gestión completa de datos que cuentan con coordenadas geográficas reales asociadas para su manejo y análisis [22]. Asimismo, los Sistemas de Información Geográfica, SIG o GIS, permiten incorporar y utilizar datos de variadas fuentes que permiten el análisis, la comparación y la validación en forma sistémica [23], [24].

El SIG permite integrar distintos tipos de información, fotos aéreas, mapas, imágenes de satélite o información vectorial —según sea el nivel de definición en el que se trabaje: local, regional o nacional— sobre la base de una extensión geográfica común; y a su vez posibilita la comunicación de resultados mediante mapas [9].

Los SIG estructuran el catastro ortodoxo. El uso de estas herramientas, entre otras, permite avanzar eficientemente y con calidad hacia el desarrollo de nuevos mapas de valores; en el contexto tecnológico actual, aportan a la evolución del catastro y posibilitan implementar modelos de valuación masiva. “La integración del OUV y el SIG propició la elaboración de mapas de valores del suelo para mejorar los procesos de valuación y el cobro del impuesto predial y automatizar el cobro del impuesto al traslado de dominio” [19].

ANTECEDENTES

El artículo al que hace referencia la investigación de Piumetto *et al.* [6] tuvo como objetivo realizar la valuación de cerca de 2 000 000 de inmuebles que posee la provincia de Córdoba, Argentina. Para ello se implementaron Modelos de Valuación Masiva Automatizada y se utilizaron herramientas geomáticas (SIG, procesamiento de imágenes, análisis espaciales, etc.) en la construcción de variables territoriales y para los fines de calcular valores a partir de algoritmos y modelos matemáticos. Tal trabajo fue realizado en conjunto

con Centro de Estudios Territoriales de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba (FCEFYN-UNC), el Gobierno de la Provincia de Córdoba a través del Ministerio de Finanzas y el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).

La tesis de Di Fabio Goncalves & García Medina [9] analizó el incremento de los valores de mercado de suelo de 1992 y 2018, calculados mediante regresión lineal múltiple y comparados mediante gráficos y mapas de valores. La muestra de datos fue una muestra aleatoria, cabe resaltar que dicha muestra corresponde a otro estudio completamente diferente, realizado por la empresa CSI Ingenieros en el año 1992. Además de dicho análisis, se llevó a cabo un contraste de los valores de suelo 2018 con los valores catastrales 2018; dentro de las conclusiones se puede resaltar la importancia en el grado de representatividad de la muestra, pues, “si las ofertas seleccionadas no forman una muestra representativa se obtendrán errores en los valores de terreno calculados” [9].

Monzani y otros [15] aplicaron técnicas geoestadísticas a la valuación masiva de suelo —krigeaje Ordinario, Co-krigeaje y krigeaje Universal— que contemplan la información espacial en la zona de estudio, la ciudad de Rio Cuarto en la Provincia de Córdoba. Es importante mencionar que los datos utilizados fueron recolectados por un equipo multidisciplinario de agentes locales y especialistas en tasaciones. Este artículo se enmarca en los esfuerzos gubernamentales por actualizar los valores de suelo como parte de las políticas económicas —fiscales y financieras— relacionadas al impuesto inmobiliario o predial, fuente de financiamiento del núcleo urbano, por lo cual es de interés determinar si la base imponible guarda o no relación con el valor de mercado de los inmuebles. “Cuando esta relación no es manifiesta, se produce un quiebre en la noción de equidad impositiva y, en consecuencia, afecta el bienestar de los ciudadanos” [15].

Reséndiz [25] teoriza sobre la complejidad para la generación del observatorio de valores en el mercado inmobiliario de la Zona Metropolitana de Querétaro. Si bien la tesis propone una plataforma virtual enfocada a la explicación, justificación y exposición del valor de la vivienda residencial, la metodología propuesta es un claro ejemplo de la aplicación de los sistemas de información geográfica y el tan necesario proceso de alimentación y modelado de los datos.

El empleo de valores de suelo mediante sistemas de información geográfica también facilita la aplicación de modelos de precios hedónicos que permiten establecer relaciones estadísticas significativas. El trabajo de Quintana, Ojeda, Ramírez, & Silvestre [26] analiza las



relaciones entre el valor del suelo y sus principales variables inmobiliarias, representadas a través de indicadores de educación, renta, accesibilidad, consumo de agua y criminalidad, de acuerdo con el mercado de la ciudad de Hermosillo, Sonora, México. El análisis se desarrolla a partir de una base de datos geográficamente referenciada, con 427 mediciones de valores del suelo y sus características inmobiliarias, y un análisis estadístico multivariado ordinario y geoespacial (OLS y GWR, en inglés) mediante el uso de SPSS 22 y ArcGis 10.2, con los cuales se procede a explicar las relaciones existentes entre los valores del suelo y los factores de mayor influencia. Cabe resaltar el uso de información del Instituto Nacional de Estadística y Geografía, mediciones del Organismo Operador Municipal Agua de Hermosillo y datos proporcionados por la Secretaría de Seguridad Pública del Estado de Sonora.

Bernales [27] documenta la aplicación del primer modelo automatizado para realizar la valuación en la zona de Lima, Perú, donde usa estándares europeos y norteamericanos. Realizó cuatro pasos: el primero, referido a la obtención de la información como materia prima de una base de datos y el manejo de las variables involucradas; segundo, la elaboración del modelo matemático adecuado que sea el indicado de acuerdo con las mejores prácticas estadísticas según el caso (estadística descriptiva, regresiones clásicas, regresiones espaciales o redes neuronales artificiales); tercero, las consideraciones de validación, limitantes y alcances del modelo; y finalmente, la interfaz de consulta entre el usuario y el AVM. Cabe mencionar la posibilidad de vincular, en tiempo real, la base de datos con un sistema de información para la visualización, análisis y administración de datos, todo esto, de forma automática.

Nunlist [28] describe en su artículo la valuación masiva con ayuda de un SIG en la zona de Shenzhen, China. Este sistema de valuación virtual es una extensión lógica del sistema de valuación masiva asistida por computadora (CAMA, por sus siglas en inglés) y el uso de SIG, para desarrollar en conjunto un sistema conocido como GAMA. Cabe resaltar de este artículo que este sistema, "que podría ser considerado el más avanzado del mundo" [28], fue llevada a cabo por el Centro de tasaciones de Shenzhen, un organismo legal municipal fundado para ayudar en el cobro de impuestos sobre ventas y transacciones de bienes inmuebles, para el cual el Instituto Lincoln tuvo una participación fundamental.

Dávila Granada, Cuesta Molestina, & Villagómez Orozco [29] describen el proceso del modelo de valuación masivo de suelo urbano de la ciudad de Tena, Ecuador, que explica la relación de ciertos aspectos

espaciales, tipo y uso de suelo, nivel socioeconómico, porcentaje de pendiente, cursos de agua, grado de cobertura de los servicios y el calor del suelo a través de un ambiente SIG. Del estudio de las variables físico geográficas, socioeconómicas y reglamentarias urbanas se obtuvo como resultado una zonificación jerarquizada de las manzanas que tienen similares características en su comportamiento; la herramienta SIG, con ayuda del método de ponderación por comparación de pares ordenados, permitió jerarquizar el espacio urbano y obtener una representación cartográfica coroplética.

En el artículo de Nahed, Rojas López, Aguilar & Dau Villareal [30], se analizan las características espaciales que explican el valor de los bienes inmuebles en la zona de Mazatlán, Sinaloa, así como las variables endógenas y exógenas relacionadas. Utilizan una captura sistematizada de muestras de mercado, lo cual da origen a la base de datos que sustenta el estudio y que se analiza espacialmente en un Sistema de Información Geográfico. Los resultados demuestran que se encuentran características endógenas y exógenas propias del inmueble sobre la distribución espacial.

En el LVIII congreso nacional de valuación, Quintana Pacheco, Ojeda de la Cruz, & García Arvizu [31] explican, con ayuda de modelos de precios hedónicos y de las posibles asociaciones espaciales de las variables inmobiliarias del mercado local, el comportamiento espacial de los valores de suelo habitacional a través de conceptos de deseabilidad del entorno edificado, de la accesibilidad urbana y de la jerarquía social materializados en los indicadores de educación, renta, accesibilidad, consumo de agua y criminalidad.

Erba D. [16] muestra los resultados alcanzados al implementar observatorios urbanos en 8 municipios del Ecuador, los cuales permitieron estudiar y representar el mercado inmobiliario a través de mapas de valor útiles para definir políticas públicas de financiamiento a ciudades mediante la distribución equitativa de los impuestos. Los valores de suelo recolectados fueron procesados por técnicas de geo estadística controlada, generándose un mapa mediante el sistema de información geográfica QGIS, que representa la variación continua del valor del m² del suelo.

En el artículo de Fitch Osuna [32], se describe la construcción de un sistema de valuación masiva de inmuebles para el cobro de impuestos y la identificación de elementos que expliquen el valor inmobiliario en la zona de Cataluña, España. Este proceso contempla el análisis mediante SIG. La acción individual de elección residencial es el proceso con el cual se puede interpre-

tar el territorio desde una perspectiva de la formación y distribución espacial de valores urbanos [32].

Fernández [33] estudia la incidencia de la accesibilidad de la vivienda (distancia al metro, distancia al centro de la ciudad), la relación del precio con las características del entorno (equipamientos del barrio, zonas verdes, calidad urbanística) y las externalidades sociales (inmigración) y económicas (nivel socioeconómico) con el precio de la vivienda, en Valencia, España. Además, se utilizó un SIG para visualizar en mapas de isovalores la evolución de las variables; precio de los inmuebles y la población en la zona de estudio.

OBJETIVO

Identificar áreas de oportunidad que faciliten el trabajo de actualizar los valores catastrales de suelo habitacional con fines contributivos, a través de la compa-

ración de las investigaciones sobre la actualización de valores mediante la aplicación de SIG o similares.

METODOLOGÍA

La modelación de datos a través de SIG ha permitido visualizar valores sobre áreas determinadas, y el análisis masivo de valores de suelo, por su naturaleza, ha sido estudiado por medio de esta herramienta con el objetivo de encontrar áreas de oportunidad. Se aplica la metodología de análisis documental a las investigaciones de los últimos cinco años relacionadas con actualización de valores catastrales de suelo. Se compararon las cualidades de los procedimientos generales de las investigaciones en tres pasos: muestreo, cálculos matemáticos y diseño cartográfico, se espera que en los pasos convergentes exista la posibilidad de facilitar, reducir o mejorar los trabajos de actualización.

Tabla 1. Características de los procesos antecedentes.
Fuente: elaboración propia.

TÍTULO	MUESTREO	CÁLCULO MATEMÁTICO	DISEÑO CARTOGRÁFICO
Modernización de la valuación masiva de la tierra en la provincia de Córdoba a través de técnicas de aprendizaje computacional (Artículo) Mario A. Piumetto Gustavo M. García Virginia Monayar Juan Pablo Carranza Hernán Morales Tomás Nasjleti Adriana Menéndez	Valores de oferta y ventas de inmuebles edificados y baldíos de diversas fuentes, como publicaciones web, periódicos, inmobiliarias, relevamientos in situ, entre otras. También se incorporaron datos seleccionados de la base del impuesto de sellos, años 2017 y 2018, así como tasaciones de entidades bancarias, del Consejo de Tasaciones de la Provincia y en Capital, del Catastro Municipal de Córdoba.	Se aplicaron algoritmos de aprendizaje automático (machine learning), como random forest, support vector Machine y redes neuronales, k-vecinos más cercanos, partial least squares y gradient boosting model. Sobre los residuos de cada una de estas técnicas algorítmicas se realizó una interpolación mediante krigeaje ordinario que, posteriormente, se sumó a las estimaciones originales con el objetivo de minimizar el error de predicción. Además, se contempló un diseño conformado por un ensamble de random forest, support vector machine y gradient boosting model mediante un modelo lineal generalizado, sobre el cual se realizó, también, una interpolación Geoestadística de los residuos. En cada sector del espacio se escogió el modelo que arrojó un menor error relativo promedio en valor absoluto, mediante un proceso de validación cruzada leave-one-out sobre la totalidad de los datos muestrales.	Observatorio del Mercado inmobiliario (OMI) de la provincia de Córdoba y software libre.
Análisis de la variación de los valores inmobiliarios Año 2018 - Año 1992 (Tesis) Guillermo di Fabio Goncalves Santiago García Medina	CSI ingenieros en el año 1992, además de dicho análisis se llevó a cabo un contraste de los valores de suelo 2018 con los valores catastrales 2018 y muestreo en páginas web dedicadas a la venta y alquiler de inmuebles.	Regresión lineal múltiple.	



TÍTULO	MUESTREO	CÁLCULO MATEMÁTICO	DISEÑO CARTOGRÁFICO
<p>Técnicas geoestadísticas aplicadas a la valuación masiva de la tierra urbana: el caso de la ciudad de Río Cuarto, provincia de Córdoba (Artículo)</p> <p>Federico Monzani Marcos Gaspar Montenegro Mario Andrés Piumetto Mariano Augusto Córdoba Micael Jeremías Salomón & Juan Pablo Carranza</p>	<p>Los datos utilizados fueron recolectados por un equipo multidisciplinario de agentes locales y especialistas en tasaciones; adicionalmente, se incorporaron datos de valuaciones declaradas para el cálculo de impuestos aplicado a contratos u operaciones onerosas.</p>	<p>Krigeaje ordinario, co-krigeaje y krigeaje universal.</p>	
<p>El mercado inmobiliario y su complejidad para la generación del observatorio de valores. Modelo para la zona metropolitana de Querétaro (Tesis)</p> <p>Jorge Reséndiz Velázquez</p>	<p>Información de mercado para inmuebles urbanos. Se realizó un estudio de mercado de los bienes inmuebles residenciales de la ZMQ a través de promotores y desarrolladores inmobiliarios, valuadores, dependencias gubernamentales y toda aquella fuente capaz de proporcionar la información requerida.</p>	<p>La tesis se centra mayoritariamente en la implementación teórica de un observatorio de valor, no especifica el tratamiento matemático de los datos.</p>	
<p>El valor del suelo habitacional (Artículo)</p> <p>Jesús Quintana Arturo Ojeda Gerardo Ramírez José Silvestre</p>	<p>Además de los datos de campo, se colectó información de diferentes bases de datos de sitios en Internet publicadas por empresas dedicadas a la compraventa de bienes raíces, asesores de crédito y personas físicas. De igual forma, se llevó a cabo la recolección de información consultando las bases de datos utilizados en sistemas de gestión de captura de avalúos en unidades de valuación acreditadas en la sociedad hipotecaria federal.</p>	<p>Análisis estadístico multivariado ordinario y geoespacial.</p>	<p>No menciona específicamente el software utilizado. "Cualquier software de aplicación a sistemas de información geográfica, tales como el QGIS, ArcGIS o gvSIG".</p>
<p>Un modelo automático de valoración (AVM) aplicado en Lima – Perú (Artículo)</p> <p>Luis Alberto Bernal Ghacham</p>	<p>Las bases de datos pueden estar compuestas de información procedente de ofertas, transacciones reales o valoraciones realizadas previamente.</p>	<p>Estadística descriptiva, regresiones clásicas, regresiones espaciales o redes neuronales artificiales.</p>	<p>QGIS</p>
<p>Valuación masiva con la ayuda de SIG en Shenzhen (Artículo)</p> <p>Tom Nunlist</p>	<p>Avalúos del centro de tasaciones de Shenzhen.</p>	<p>Sistemas GAMA y CAMA.</p>	<p>QGIS</p>
<p>Modelo de valoración masiva de suelo urbano caso de estudio: ciudad de Tena-Ecuador (Artículo)</p> <p>Álvaro Dávila Granda Rosa Cuesta Molestina Martha Villagómez Orozco</p>	<p>Encuestas realizadas en 2014.</p>	<p>Método de ponderación por comparación de pares ordenados.</p>	<p>SPSS 22 y ArcGIS 10.2</p>
<p>Formación y distribución espacial de los valores inmobiliarios: el caso de Mazatlán (Artículo)</p> <p>Iván Humarán Nahed José Refugio Rojas López Pedro A. Aguilar Leila Dau Villareal</p>	<p>Muestreo en el mercado inmobiliario; cabe señalar que obtuvo información de diferentes instituciones, no necesariamente datos muestra.</p>	<p>Estadística descriptiva.</p>	<p>Software Geoda (no genera un modelo de los resultados).</p>

TÍTULO	MUESTREO	CÁLCULO MATEMÁTICO	DISEÑO CARTOGRÁFICO
Elementos del valor del suelo habitacional: caso Hermosillo, Sonora, México (Artículo) Jesús Quintana Pacheco Arturo Ojeda de la Cruz Jesús Fernando García Arvizu	Se recolectó en campo una muestra de valores del suelo urbano habitacional unifamiliar.	Modelo de precios hedónicos y regresión geográficamente ponderada (GWR).	Herramientas SIG no especificada.
Valores del suelo monitoreados a través de observatorios urbanos implementados en un SIG en la nube (Artículo) Diego Erba	Levantamiento de datos de mercado. Junto con estos valiosos datos, se consiguieron bases provenientes de bancos, portales de Internet, anuncios clasificados de periódicos, revistas e información de otras entidades, tanto públicas como privadas, relacionadas con ventas y arriendos de inmuebles.	Análisis estadístico y la revisión de la calidad de los datos.	Herramienta SIG no especificada.
Sistema de valuación masiva de inmuebles para tasaciones (Artículo) Jesús Manuel Fitch Osuna	La base de datos principal corresponde a las tasaciones elaboradas por el Colectivo de Arquitectos Tasadores (CATSA).	Modelos de Precios Hedónicos (MPH).	Herramienta SIG no especificada. Herramienta SIG no especificada.
Análisis del impacto de los aspectos relativos a la localización en el precio de la vivienda a través de técnicas de Soft Computing. Una aplicación a la ciudad de Valencia (Tesis) Laura Fernández Durán	Base de datos de Idealista.com durante el período comprendido entre el 19 de julio de 2009 y el 10 de mayo de 2010.	Modelo basado en una red neuronal artificial.	Herramienta SIG no especificada. Herramienta SIG no especificada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la revisión documental, los procesos analizados convergen en el uso de la metodología general para la elaboración de mapas de isolíneas de isovalores por el dato “valor del suelo” bajo estudio: observación del dato en una serie suficiente de puntos (muestra); inferencia de valores al resto de la zona (interpolación); selección de intervalos; y diseño del mapa (colores, líneas, rótulos, etc.) [34]. En principio, se pueden ubicar todas las actividades del proceso dentro de estos niveles, sea cual fuere la actividad. Se resumen gráficamente a continuación en orden ascendente.



Figura 1. Proceso general para la elaboración de mapas de isovalores.

Fuentes: elaboración propia.

Se encontró que la base del proceso es la información muestra, misma de la cual depende la calidad de los resultados. Por una parte, estos se limitan de acuerdo a la calidad de la muestra, mejorada por métodos matemáticos; sin embargo, aun si es posible realizar un análisis significativo para la zona de estudio, por otro lado existe la falta de datos muestra, que imposibilita el inicio del proceso o reduce la representatividad de los resultados.

Desde una perspectiva macroespacial, los datos muestra son la materia prima para la valuación masiva de suelo hecha mediante SIG. En contraste con los comparables para la valuación individual, el proceso de su búsqueda llega a requerir una mayor cantidad de personal y tiempo dentro del proceso —incluso la aportación de estos elementos no garantiza ni la calidad ni la cantidad de las muestras—. En definitiva, se requiere de la mayor cantidad de muestras posibles, para lo cual se encontró que las investigaciones se acercaron a instituciones que por sus actividades recaban información del valor de los inmuebles, de forma directa o indirecta.



INSTITUCIONES CON POTENCIAL.

En el Registro Público de la Propiedad (RPP) se inscriben los actos relativos al derecho de propiedad, dentro de los cuales se encuentran las operaciones de compraventa de un bien inmueble; esta operación se puede realizar, por ejemplo, por medio de créditos hipotecarios, en cuyos procesos se elabora un avalúo que se registra como parte de la escritura resultante. Es decir que el RPP cuenta con los datos referentes al valor de los inmuebles adquiridos de esta forma; esta operación se toma como referente, ya que los avalúos están sancionados por la Sociedad Hipotecaria Federal (SHF), confiriendo regulación a los valores concluidos de mercado, como lo es el registro y revisión por parte de las Unidades de Valuación.



Figura 2. Información útil para la actualización de valores de suelo habitacional en el Registro Público de la Propiedad. Fuente: elaboración propia.

El Catastro es, precisamente, la institución encargada de registrar la información referente a los bienes inmuebles, de los cuales recaba directamente su valor, como parte del catálogo de información. Es importante mencionar que no todos los catastros utilizan el mismo procedimiento, sino que varía de estado a estado; en Querétaro, uno de los instrumentos que permiten la constante actualización de valores inmobiliarios es el avalúo, requisito para el trámite de traslado de dominio, en el cual se calcula el valor de mercado del inmueble, entre otras cosas, para el cálculo del impuesto por adquisición de derechos sobre un bien. De igual forma, cabe señalar que el valor concluido es estimado por un especialista sobre el cual recaen responsabilidades y obligaciones que regula el estado.



Figura 3. Información útil para la actualización de valores de suelo habitacional en el Catastro. Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

En México, las dos instituciones que realizan el muestreo como primer paso del proceso general planteado en el presente artículo para la actualización de los valores del suelo con fines contributivos son el RPP y el Catastro; no obstante, aunque los datos están ahí, en registros aparentemente al alcance y disposición pública, esta ventaja no ha sido aprovechada, lo que resalta que la multifinalidad de las instituciones no ha sido llevada a cabo..

Es una realidad que las instituciones gubernamentales se ven restringidas en cuanto a recursos materiales, humanos y económicos, y es en este punto que las universidades surgen como un instrumento que reduce las limitaciones mediante la aportación de conocimiento y recursos humanos (estudiantes, investigadores y catedráticos) que abonan en beneficio del progreso; en este caso, un paso más cerca de la actualización de valores de suelo habitacional para fines contributivos.



Figura 4. Aportación interinstitucional para facilitar la multifinalidad del catastro en la actualización de los valores unitarios de suelo habitacional. Fuentes: elaboración propia.

La intención del presente artículo es poner de manifiesto las áreas de oportunidad para elaborar trabajos técnicos que puedan contribuir a sanear las finanzas públicas municipales a través de la valuación masiva, la aplicación de SIG para esta misma o incluso la puesta en marcha de observatorios de valor, en los cuales se recomienda tener especial cuidado en el tratamiento adecuado de la información generada en las bases de datos; es decir, seleccionar las variables relevantes y su mediación a través de escalas apropiadas.

AGRADECIMIENTOS Y FINANCIAMIENTO

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo económico para el estudio de la Maestría en Valuación de Bienes y la realización de la tesis, requisito para su conclusión, de la cual es parte el presente artículo; así como a mis maestros y a la coordinación de la maestría por su orientación y apoyo.

REFERENCIAS

- [1] J. Fernández Ruiz, S. Valencia Carmona y M. Pérez López, "La reforma constitucional de diciembre de 1999 al artículo 115," *Cuest. Const. Rev. Mex. Der. Cons.*, n° 4, p. 1, 2001.
- [2] LUX Consultores en Comercio y Desarrollo S.A. de C.V, "El Centro de Estudios de las Finanzas Públicas de la Cámara de Diputados (CEFP)", 01 06 2017. [En línea]. Available: <https://www.cefp.gob.mx/transp/CEFP-CEFP-70-41-C-Estudio0009-010617.pdf>. [Último acceso: 11 03 2020].
- [3] M. Unda Gutiérrez, "Los límites de la recaudación predial en los municipios urbanos de México: un estudio de casos", *Est. Dem. Urb.*, vol. 33, n° 3, pp. 601-637, 2018.
- [4] Segundo Foro Regional entre Legisladores en Materia Hacendaria: "Reforma de las Haciendas Públicas", Instituto para el Desarrollo Técnico de las Haciendas Públicas, 14 05 2019.[Enlínea]. Available: <https://www.google.com/url?sa=i&url=http%3A%2F%2Fwww5.diputados.gob.mx%2Findex.php%2Fesl%2Fcontent%2Fdownload%2F149429%2F746999%2Ffile%2F1%2520Debilidad%2520de%2520las%2520Finanzas%2520Pu%25C3%25Acbricas%2520Municipales%2520Retos>.
- [5] R. Castañeda Ortega, "Instituto para el Desarrollo Técnico de las Haciendas Públicas", 2019. [Enlínea]. Available:http://www.indetec.gob.mx/delivery?srv=0&sl=2&path=/biblioteca/Federalismo_Hacendario/2019_01/4_CastanedaOrtega_25062019_V_Extendida.pdf. [Último acceso: 18 03 2020].
- [6] M. A. Piumetto, G. M. García, V. Monayar, J. P. Carraza, H. Morales, T. Nasjleti y A. Menéndez, "Modernización de la Valuación Masiva de la tierra en la provincia de Córdoba a través de técnicas de aprendizaje computacional", *Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, vol. 6, p. 49 a 52, 2 Octubre 2019.
- [7] B. Regalado, "Catastro desactualizado en México con 15 años de atraso", *Debate*, 21 09 2019.
- [8] Congreso General de los Estados Unidos Mexicanos, <http://www.diputados.gob.mx/>, *Diario Oficial*, 23 12 1999.
- [9] G. Di Fabio Goncalves y S. García Medina, "Análisis de la variación de los valores inmobiliarios año 2018 - año 1992", Universidad de la República Facultad de Ingeniería, Montevideo, Uruguay, 2019.
- [10] C. d. I. C. Rodríguez de Rivas, "Valor Inmobiliario y Estructura Urbana", 2015.
- [11] C. M. De Cesare, "Valuación de Inmuebles con Fines Fiscales", *Catastro Multifinlatario Aplicada a la Definicion de Políticas de suelo Urbano*, pp. 191-217, 2007.
- [12] I. Guerrero García, "Sistema de Valuación Catastral", Villa de Álvarez, Col., 2014.
- [13] J. M. Nuñez Tabales, "Mercados Inmobiliarios: Modelización de los Precios," Córdoba, España, 2007.
- [14] Indetec, "Administración del Impuesto Predial".
- [15] F. Monzani, M. G. Montenegro, M. A. Piumetto, M. A. Córdoba, M. J. Salomón y j. P. Carraza, "Técnicas geoestadísticas aplicadas a la valuación masiva de la tierra urbana: el caso de la ciudad de Río Cuarto, Provincia de Córdoba", *13° Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinlatário e Gestao Territorial, Florinapolis*, 2018.
- [16] D. Erba, "Valores del suelo monitoreados a través de observatorios urbanos implementados en un SIG en la nube", 2° Encuentro nacional de investigadores de Agrimensura., Santa Fe, Argentina, 2016.
- [17] S. P. Quete Ovalle, "Metodología de clasificación física para e avalúo masivo de terrenos de predios rurales en un catastro multipropósito", Magíster en Geomática, Bogota D. C., Colombia., 2017.
- [18] D. A. Erba, M. Piumetto y J. Ciampagna, "eCatastros", 2007.
- [19] Banco Interamericano de Desarrollo, "Catastro, Valoración Inmobiliaria y Tributación Municipal: Experiencias para mejorar su articulación y efectividad", 2020.
- [20] N. M. Sherman Quintero, "La Valuación Catastral de la Zona Metropolitana de Guadalajara. Hacia una Concurrencia y Coordinación Municipal", Tlaquepaque, Jal., 2010.
- [21] Instituto Nacional de Estadística y Geografía, "Sistema de Información Geográfica", 2014.
- [22] X. A. Peña Segura, "Sistemas de Información Geográfica aplicado al Catastro Predial del Cantón Paute, Ecuador", Maestría internacional en Sistemas de Información Geográfica, Quito, Ecuador, 2012.



[23] R. Casanova, "Reconocimiento de los efectos de intervenciones territoriales en los valores del mercado inmobiliario: Caso Montevideo", Universidad de la República, Montevideo, Uruguay, 2005.

[24] R. Casanova, R. Sosa y S. Rodríguez, "SIGAP: Sistema de Información Geográfica para el Análisis Prospectivo", Montevideo, Uruguay, 2012.

[25] J. Reséndiz, "El mercado inmobiliario y su complejidad para la generación del observatorio de valores. Modelo para la Zona Metropolitana de Querétaro", Querétaro, Qro., 2018.

[26] J. Quintana, A. Ojeda, G. Ramírez y J. Silvestre, "El valor del suelo habitacional", *Libro de proceedings, ctv 2018. xii Congreso Internacional Ciudad y Territorio Virtual, Ciudades y Territorio inteligente*, Vols. 1 de 2 CPSV, 2018, pp. 165 - 180, 5 - 7 septiembre 2018.

[27] L. A. Bernales Ghacham, "Un modelo automático de valoración (AVM) aplicado en Lima - Perú", LIV Congreso Nacional de Valuación, 2018.

[28] T. Nunlist, "Valuación masiva con la ayuda de SIG en Shenzhen", Land Lines, 2017.

[29] Á. Dávila Granada, R. Cuesta Molestina y M. Villagómez Orozco, "Modelo de valoración masiva de suelo urbano caso de estudio: ciudad de Tena- Ecuador", *Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GEO-SIG)*, vol. año 9, n° 9, pp. 152-170, 2017.

[30] I. H. Nahed, J. R. Rojas López, P. A. Aguilar y L. Dau Villareal, "Formación y Distribución Espacial de los Valores Inmobiliarios: El Caso de Mazatlán", pp. 77-103, 2017.

[31] J. Quintana Pacheco, A. Ojeda de la Cruz y J. F. García Arvizu, "Elementos del Valor de Suelo Habitacional: Caso Hermosillo, Sonora, México", LII Congreso nacional de Valuación, Hermosillo, Sonora, 2017.

[32] J. M. Fitch Osuna, "Sistemas de Valuación masiva de inmuebles para tasaciones", *Revista de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Autónoma de Nuevo León*, pp. 51-63, 13 septiembre 2016.

[33] L. Fernández Durán, "Análisis del impacto de los aspectos relativos a la localización en el precio de la vivienda a través de técnicas de *soft computing*. Una aplicación a la ciudad de Valencia", Valencia, España., 2016.

[34] Instituto Nacional de Estadística y Geografía, "Sistema de Información Geográfica", 2014.

[35] Lincoln Institute of Land Policy, "Catastro multifinanciado: aplicado a la definición de políticas de suelo urbano", Lincoln Institute of Land Policy, Cambridge, MA, 2007.

[36] M. O. Smolka, "Implementación de la Recuperación de Plusvalías en América Latina", Lincoln Institute of Land Policy, 2013.

[37] Lincoln Institute of Land Policy, "Sistemas de Impuesto Predial en América Latina y el Caribe", Lincoln Institute of Land Policy, 2016.

DE LA ARQUITECTURA SOSTENIBLE A LA ARQUITECTURA REGENERATIVA, UN CAMBIO DE PARADIGMA EN EL CONTEXTO MEXICANO

From sustainable architecture to regenerative architecture, a change of paradigm in the Mexican context

Mónica Liliana Rodríguez Arellano*, Carlos Cobreros Rodríguez

*Correo electrónico: lili.rdz.arellano@hotmail.com

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México.

RESUMEN

Este artículo se realizó con el fin de analizar el paradigma del desarrollo y diseño sostenible, y compararlo con el paradigma del desarrollo y diseño regenerativo para encontrar nuevas soluciones regenerativas que puedan ser aplicadas desde el ámbito de la arquitectura y nos ayuden a disminuir el impacto ambiental. También explica por qué la arquitectura sustentable ya no es suficiente en esta era geológica conocida como el Antropoceno. Actualmente estamos en una crisis ecológica debido al modelo de crecimiento donde no se respetan los límites naturales, por lo tanto, es necesario cambiar de paradigma y entender la arquitectura como un sistema complejo para pasar de una visión mecanicista a una cosmovisión ecológica. De esta manera, se espera que sea posible reconceptualizar las relaciones entre la tecnología humana y los sistemas ecológicos, económicos, sociales, culturales y políticos para plantear estrategias de sostenibilidad regenerativa. El diseño regenerativo basado en la Teoría General De Sistemas impulsa este cambio de paradigma hacia la concepción de los edificios como entidades sistémicas; a partir de esto se pueden diseñar edificios que eduquen mediante lo demostrativo y retomen la conexión con la naturaleza para crear una conciencia ambiental en las personas y promover la implementación del diseño regenerativo en México.

PALABRAS CLAVE: ARQ, desarrollo sostenible, desarrollo regenerativo, diseño regenerativo, pensamiento sistémico, arquitectura regenerativa.

ABSTRACT

The purpose of this paper is to analyze the paradigm of sustainable development and design, and to compare it with the paradigm of regenerative development and design in order to find new regenerative solutions that can be applied from the field of architecture and help us reduce the environmental impact. It also explains why sustainable architecture is no longer enough in this geological era known as the Anthropocene. We are in an ecological crisis due to the growth model where natural limits are not respected, therefore it is necessary to change the paradigm and understand architecture as a complex system to be able to move from the mechanistic vision to an ecological worldview. And thus to be able to reconceptualize the relationships between human technology and ecological, economic, social, cultural and political systems and with this to be able to propose regenerative sustainability strategies. Regenerative design based on general systems theory helps us with

this paradigm shift where buildings are understood as systemic entities. From this, buildings can be designed that educate through demonstration and reconnect with nature to create environmental awareness in people and promote the implementation of regenerative design in Mexico.

KEYWORDS: ARQ, sustainable development, regenerative development, regenerative design, systemic thinking, regenerative architecture.

INTRODUCCIÓN

Las sociedades industriales continúan esquivando los límites naturales del planeta, sustrayendo cada vez más recursos. Debido a esto, se han vuelto dependientes de los recursos naturales bajo la idea de que los límites naturales no existen. Pero en las últimas décadas los problemas ambientales han abierto debates alrededor de fenómenos como el calentamiento global, el agujero de la capa de ozono, el agotamiento de los recursos naturales, la extinción masiva de distintas especies y la sobrepoblación, entre otros. Este grupo de fenómenos componen lo que se ha nombrado como "crisis ecológica" [1], donde ya no podemos seguir con el mismo modelo de crecimiento que ignora los límites naturales. El desarrollo de la sociedad y la industrialización han generado un gran impacto ambiental y daños irreparables en el medio ambiente, este impacto va desde la ocupación de espacios cada vez mayores para las construcciones, hasta la amenazadora sobreexplotación de los bancos de materiales, lo que ocasiona deforestación y pérdida de flora y fauna de la región, generando una cadena interminable de situaciones creadas por la demanda y crecimiento de la población [2].

En el año 2018 se vieron olas de calor en cuatro continentes, incendios forestales en el Ártico y escasez de agua en Sudáfrica, Australia e India; por esto los científicos hablan de una "sexta extinción masiva" de vida silvestre, aves, insectos y vida marina y no cabe duda de que la actividad humana es responsable. Aunque 195 países firmaron el Acuerdo de París para reducir las emisiones de carbono en 2015, el uso de recursos continúa excediendo límites planetarios, consumimos más recursos de los que el planeta nos puede ofrecer. Es por esto que *Earth Overshoot Day* marcó el 1 de agosto como el punto en el que hemos usado más de la naturaleza de lo que el planeta es capaz de renovar [3].

La CONAVI (Comisión Nacional de Vivienda) estima que más del 50 % de las emisiones que contaminan a nivel mundial provienen del sector de la construcción, debido a los procesos de fabricación de los materiales, el transporte, los trabajos de construcción y a la utiliza-



ción de las edificaciones. En el caso de México, según un estudio de la UNAM, se estima que para el año 2050 se construyan siete millones de viviendas, las cuales podrían emitir alrededor de 25 millones de toneladas de gases de efecto invernadero. Los procesos tradicionales de edificación que utilizan combustibles fósiles y la demanda energética son las principales causas de liberación de CO_2 , es por esto que el sector de la construcción tiene un gran impacto en el ambiente [4]. Sin embargo, la demanda de espacios arquitectónicos continúa en aumento; por lo tanto, se tienen que diseñar espacios que respondan a las necesidades de la población pero que también respeten a la naturaleza y generen un menor impacto ambiental.

El 2030 es la fecha límite para prevenir una catástrofe mundial, según el informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) de la ONU: vamos en camino a un aumento de 3 °C, el cual está arriba del máximo de 2 °C divisado por el Acuerdo de París. El informe se basa en más de 6000 referencias científicas y explica los resultados catastróficos que tendría este aumento de temperaturas. En el Acuerdo de París, la mayoría de los países del mundo se comprometieron a conservar el crecimiento de la temperatura por debajo de 2 °C y continuar con los esfuerzos para limitar el aumento de la temperatura a 1.5 °C [5].

Los científicos afirman que mantener el aumento a 1.5 °C es posible pero se necesitan cambios inminentes y a gran escala por parte del gobierno y las personas. El informe dice que para realizar la meta del 1.5, las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) tendrían que reducirse en un 45 % para el año 2030 [5]. Como ya se dijo anteriormente, la industria de la construcción es uno de los principales sectores que más contamina a nivel mundial, pero como arquitectos podemos ayudar a disminuir este impacto diseñando proyectos que vayan más allá de la sostenibilidad. Como resultado del impacto ambiental y por no respetar los límites naturales del planeta, estamos en una era geológica conocida como el Antropoceno, definido como la etapa geológica más reciente de la Tierra, fundamentado en evidencia global abrumadora donde los procesos atmosféricos, geológicos, hidrológicos, biosféricos así como otros sistemas de la Tierra ahora están siendo alterados por la actividad antrópica [6]. Esto conlleva riesgos novedosos y amenaza las condiciones planetarias requeridas para que las sociedades humanas prosperen [8].

La sostenibilidad tal como la conocemos ya no es suficiente, el futuro de la sostenibilidad radica en la regeneración: restaurar y reponer lo que hemos perdido, reconstruir economías y comunidades para prosperar desde lo local a lo global. Para Pohn Elkington, el

objetivo de la sostenibilidad será “Regenerar economías, sociedades y la biosfera”, para abordar esto, necesitaremos colaborar a escala global para repensar los sistemas, reinventar la producción, reevaluar la forma en que hacemos negocios y reconsiderar cómo vivimos [3].

La escala, la tasa y la intensidad del impacto ambiental de los humanos ha generado una amplia discusión sobre cómo encontrar vías plausibles de desarrollo que sean más prometedoras para fomentar un futuro mejor en el Antropoceno [9]. Existe una oportunidad de replantear el comportamiento humano y las bases de un futuro regenerativo más sostenible; esta era nos desafía a encontrar nuevas formas de relacionarnos con la biosfera que no atenten contra nuestra existencia. Pero esto no solo requiere modular el cambio ambiental que acompaña nuestras actividades, sino reinventar la propia naturaleza humana dentro de cada uno de nosotros mismos [10]. El desarrollo y el diseño regenerativo son la clave para lograr este cambio.

El propósito de este artículo es analizar el paradigma de lo sostenible y compararlo con el paradigma de lo regenerativo para encontrar mejores soluciones basadas en el desarrollo y diseño regenerativo que puedan ser aplicadas desde el ámbito de la arquitectura y nos ayuden a disminuir el impacto ambiental.

MÉTODO

Para la estructura del artículo primero se definieron los objetivos, seguido de la elección de un método de búsqueda y revisión bibliográfica de varios autores, con la finalidad de poder analizar y comparar el Desarrollo Sostenible y los ODS vs Desarrollo Regenerativo, así como la Arquitectura/Diseño Sostenible vs Arquitectura/Diseño Regenerativo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

DESARROLLO SOSTENIBLE Y LOS ODS

En este apartado se analizó qué es el desarrollo sostenible y cuáles son sus aportaciones en la disminución del impacto ambiental. Este concepto sigue siendo referencia en debates y es un gran reto al que se enfrenta la sociedad. Hay varias definiciones pero una de las más utilizadas es la definición de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) la cual lo precisa como “el desarrollo que satisface las necesidades de las generaciones actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus necesidades [11]”. La sostenibilidad se centra en tres pilares interconectados [3]:

- Ambiental: vivir dentro de los límites de recursos naturales del planeta.
- Social: mantener el bienestar a largo plazo para personas y comunidades.
- Económico: generar un beneficio, pero no a expensas de los otros dos pilares.

La ONU, mediante el programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), desarrolló los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). En 2015 se adoptaron con el propósito de acabar con la pobreza, preservar el planeta y asegurarse que todos tengan paz y bienestar para el año 2030 [12].

Los ODS son 17 y son los siguientes [12]:

1. Fin de la pobreza: consiste en acabar con la pobreza en el mundo.
2. Hambre cero: su objetivo es terminar con el hambre, mejorar la alimentación e incentivar la agricultura sostenible.
3. Salud y bienestar: quiere garantizar una vida sana y promover el bienestar para todos.
4. Educación de calidad: su objetivo es asegurar una educación que sea inclusiva, equitativa y de calidad, así como fomentar el aprendizaje para todos.
5. Igualdad de género: su objetivo es lograr la igualdad entre los géneros y empoderar a las mujeres y niñas.
6. Agua limpia y saneamiento: su objetivo es optimizar la distribución de agua, su gestión sostenible y purificación para todos.
7. Energía factible y no contaminante: su objetivo es asegurar la disponibilidad de una energía accesible, segura, sostenible y moderna que esté al alcance de todos.
8. Trabajo decente y desarrollo económico: su objetivo es fomentar el crecimiento económico inclusivo y sostenible, así como el trabajo digno para todos.
9. Industria, innovación e infraestructura: su objetivo es construir infraestructuras resilientes, además de fomentar una industrialización inclusiva y sostenible e impulsar la innovación.
10. Reducción de las desigualdades: su objetivo es minimizar la desigualdad entre los países.
11. Ciudades y comunidades sostenibles: su objetivo es lograr que las ciudades sean inclusivas, seguras y sostenibles.
12. Producción y consumo responsables: su objetivo es asegurar modalidades de consumo y de producción sostenibles.
13. Acción por el agua: su objetivo es tomar medidas inminentes para luchar contra el cambio climático y sus efectos.

14. Vida submarina: su objetivo es preservar y utilizar de forma sostenible los océanos, los mares y los recursos marinos.
15. Vida de ecosistemas terrestres: su objetivo es administrar de manera sostenible los bosques, luchar contra la desertificación, acabar con la degradación de las tierras y detener la pérdida de la biodiversidad.
16. Paz, justicia e instituciones sólidas: su objetivo es promover sociedades que sean justas, pacíficas e inclusivas.
17. Alianzas para lograr los objetivos: su objetivo es revitalizar la alianza mundial para el desarrollo sostenible.

Aunque bienintencionados, los objetivos son muy ambiciosos y se enfrentan a varios desafíos complejos, que van desde detener el avance de las enfermedades hasta prevenir el conflicto. Implican un gran reto porque no se pueden tratar de forma eficiente si son aislados, y necesitan la cooperación del gobierno, de los sectores privados, la sociedad y los individuos para cerciorarse que se deje un mejor planeta para las próximas generaciones [12].

Si se analiza desde una perspectiva crítica para el 2030, es muy probable que varios objetivos queden incumplidos. Una de las fallas es globalizar al desarrollo sostenible debido a que la globalización se basa en dos sinergias que son contrarias: una tiende a la centralización, integración y globalización y la otra tiende hacia la descentralización, fragmentación y localización [11]; es por esto que las estrategias no pueden ser globalizadas, ni deben fragmentarse. Otro problema es lograr involucrar a las personas para lograr el cambio, el desarrollo regenerativo en una pieza clave en este punto.

ARQUITECTURA SOSTENIBLE

La arquitectura sostenible es la que toma en cuenta el impacto que tendrá una edificación en todo su ciclo de vida, además de considerar las condiciones climáticas, la topografía, los materiales que se van a utilizar y trata de conseguir el máximo rendimiento con menor impacto [13]. Las normativas y certificaciones aplicadas en México son los siguientes [14]:

1. Programa de Certificación de Edificaciones Sustentables (PCES): el Gobierno de la ciudad de México en el 2008 puso en marcha este programa, el cual tiene como objetivo crear un patrón para evaluar las edificaciones y ofrecer incentivos, como descuentos en el predial y financiamientos en tasas preferenciales, así como rapidez en los tramites.
2. NMX-AA-164-SCF1-2013 de Edificación Sustentable: es una norma mexicana que se aplica de forma voluntaria a



nivel nacional, en ella se especifican criterios y requerimientos ambientales mínimos aplicables en edificaciones sostenibles. Se puede aplicar a una o varias fases: ya sea en el diseño, construcción, operación, mantenimiento o demolición, también se puede aplicar en proyectos de remodelación.

3. Sí Se Vive, del Infonavit: este sistema de evaluación de viviendas se creó en 2012 y tiene como propósito medir la eficiencia de las viviendas mediante el uso de dispositivos ahorrrativos.

Certificaciones internacionales:

1. *Leadership in Energy and Environmental Design (LEED)*: es una certificación que evalúa la conducta medioambiental que tendrá una edificación durante su ciclo de vida. El sistema de evaluación consiste en cinco categorías: diseño y Construcción de Edificios, Diseño y Construcción de Interiores, Operación y Mantenimiento en Edificios, Desarrollo de vivienda y Desarrollo de suburbios.

2. *IFC Excellence In Design For Greater Efficiencies (EDGE)*: es una herramienta de creación de diseño, un sistema de certificación y una norma verde mundial en casi 100 países de mercados emergentes. Faculta al descubrimiento de soluciones técnicas en la etapa inicial de diseño para reducir los gastos operativos y el impacto ambiental, revela ahorros operacionales previstos y las emisiones de carbono reducidas.
3. *Living Building Challenge*: esta es una certificación internacional que tiene un sistema de evaluación riguroso en construcciones sustentables, debido a que busca que cumpla con varios requerimientos, como la energía cero, el tratamiento de los residuos y el agua, y 12 meses de operación continua.

A continuación, se muestra una tabla comparativa entre estas normativas y certificaciones. La certificación Living Building Challenge no se muestra en la tabla, porque se abarcara en un apartado más adelante.

Tabla 1. Comparativa entre las normativas y certificaciones aplicadas en México.

SISTEMA DE EVALUACIÓN	OBJETIVO	QUIEN LO OPERA	REQUISITOS DE A EVALUAR	RUBROS/ CRÉDITOS DE EVALUACIÓN
Programa de Certificación de Edificaciones Sustentables (PCES)	Promover la reducción de emisiones contaminantes y el uso eficiente de los recursos naturales en el diseño y operación de edificaciones en la Ciudad de México, con base en criterios de sustentabilidad y eficiencia ambiental. A través de la certificación en un proceso de regulación voluntaria y mediante el otorgamiento de incentivos económicos.	Implementadores registrados ante la Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. •Un organismo certificador (revisión de lineamientos). •Comité Promotor de Edificaciones Sustentables COPEs (Certificación de Edificación Sustentable)	Edificaciones en operación o en desarrollo (diseño, construcción, renovación u operación), destinadas a uso habitacional o a oficinas	Energía: hasta 8 créditos y 40 puntos. •Agua: hasta 5 créditos y 25 puntos. •Residuos sólidos: hasta 7 créditos y 10 puntos. •Calidad de vida y responsabilidad social: hasta 11 créditos y 25 puntos. •Impacto ambiental y otros impactos: hasta 15 créditos y 20 puntos.
NORMA MEXICANA NMX-AA-164-SCFI-2013. Edificación sustentable, criterios y requerimientos ambientales mínimos	Contribuir en la mitigación de impactos ambientales y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, sin descuidar los aspectos socioeconómicos que aseguran su habitabilidad e integración al entorno urbano y natural.	Unidades de verificación, aprobadas por la PROFEPA, en términos de los artículos 68 y 70 de la Ley Federal sobre Metrología y Normatización. Dicha unidad debe aplicar los criterios de cumplimiento establecidos en el Procedimiento de Evaluación de la Conformidad de la norma.	De aplicación voluntaria para todas las edificaciones que se ubiquen dentro del territorio mexicano, públicas o privadas, destinadas en su totalidad o en uso mixto a diferentes actividades: habitacional, comercial, de servicios o industrial. Aplica para las edificaciones y sus obras exteriores.	• Suelo • Energía • Agua • Materiales y residuos •Calidad ambiental y responsabilidad social • Paisaje •Calidad del ambiente interior • Responsabilidad social
Sistema de Evaluación de la Vivienda Verde SISEVI-VE-ECOCASA	Mejorar el programa "Hipoteca Verde" y elevar la calidad de vida de sus acreditados.	Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores (INFONAVIT)	Se cumple el objetivo si se disminuye el gasto familiar de los acreditados, se optimiza el uso de recursos y se mitiga las emisiones de CO2 al medioambiente.	•Demanda específica total. • Diseño constructivo. •Materiales de la envolvente. •Diseño bioclimático. •Demanda de energía primaria. •Consumo de electricidad y gas. •Consumo proyectado de agua.

SISTEMA DE EVALUACIÓN	OBJETIVO	QUIEN LO OPERA	REQUISITOS DE A EVALUAR	RUBROS/ CRÉDITOS DE EVALUACIÓN
Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) for Homes	Proponer soluciones para tener un equilibrio entre el ambiente, la sociedad y la economía, si se utilizan datos científicos y técnicos para proteger, preservar y restablecer el medio ambiente, los ecosistemas y las especies.	Desarrollado por Estados Unidos <ul style="list-style-type: none"> •Green Building Council (USGBC) •Dirigido por sector de las ONG 	Debe estar en un lugar permanente en la tierra. <ul style="list-style-type: none"> •Debe utilizar límites LEED. •Debe cumplir con los requisitos de tamaño de proyecto. 	<ul style="list-style-type: none"> • Proceso Integrativo: hasta 2 créditos. •LT: Ubicación y Transporte: hasta 30 créditos. •SS: Sitios Sostenibles: hasta 7 créditos. •WE: Eficiencia de Agua: hasta 22 créditos. •EA: Energía y Atmósfera: hasta 66 créditos. •MR: Materiales y Recursos: hasta 10 créditos. •EQ: Calidad Ambiental Interior: hasta 16 créditos. •IN: Innovación: hasta 6 créditos. •RP: Prioridad Regional: hasta 4 créditos.
IFC Excellence In Design For IFC. Excellence In Design For Greater Efficiencies (EDGE)	Crear un nuevo camino para el crecimiento verde y demostrar el caso financiero de una manera práctica reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero.	EDGE es una innovación de IFC, miembro del Grupo del Banco Mundial. La evaluación es proporcionada por socios EDGE, como la red verde del Consejo Mundial de Edificación con filiales en 96 países y otros expertos internacionales que sirven como terceros y auditores acreditados.	EDGE sólo puede utilizarse para los nuevos edificios, casas, hoteles, oficinas u hospitales. Sólo los proyectos de construcción pueden ser certificados.	EDGE no utiliza "créditos", sino que trabaja en una base sencilla, sin niveles de logro. En comparación con un edificio convencional, su proyecto debe lograr al menos una reducción del 20 % en cada una de las tres categorías de recursos para alcanzar el estándar EDGE.

DESARROLLO REGENERATIVO Y CULTURAS REGENERATIVAS

El desarrollo regenerativo expone el potencial de un lugar al conectar los sistemas en el contexto en el que están inmersos, este tejido de conexiones se crea entre múltiples partes para crear soluciones que mejoren la calidad de vida de todos los seres vivos. Cuando conciliemos la naturaleza y la cultura podremos avanzar y comprender nuestra naturaleza como parte de la evolución y podremos empezar a trabajar de manera regenerativa. La regeneración de los ecosistemas puede revertir el calentamiento global y estabilizar el clima [15].

El Desarrollo Regenerativo utiliza los recursos para mejorar el bienestar de la sociedad, aportando a la capacidad de los sistemas de soporte necesarios para el crecimiento futuro. Ya no hablamos de no destruir, sino de mejorar, se trata de satisfacer nuestras necesidades, pero desarrollando una mejor economía donde tengamos más bosques, más tierras fértiles, pesquerías repobladas, corrientes de agua abundantes y limpias y más biodiversidad. El desarrollo regenerativo se crea a partir de la necesidad de cambios a nivel global, debido a que el desarrollo sostenible no ha obtenido los resultados necesarios [16].

Como punto de partida, el desarrollo regenerativo comienza con la premisa de que todas las actividades humanas tienen el potencial de alimentar una nueva

vida, salud y riqueza en los sistemas ecológicos y sociales. La clave para hacerlo es comprender el contexto socioecológico, el cual es único en cada proyecto o iniciativa, es por esto que centra la identidad ecológica única de un lugar como el facilitador fundamental de la salud y la prosperidad futura de nuestras comunidades humanas [17].

El desarrollo regenerativo tiene un gran impacto en la arquitectura, ya que ha cambiado la antigua definición centrada en el edificio del entorno construido para incluir las relaciones entre edificios, infraestructura y sistemas naturales, así como la cultura, la economía y política de las comunidades. Dado su carácter holístico e integrador, se podría anticipar que estas aplicaciones más completas irán en tendencia, pues el desarrollo regenerativo hace posible un rol nuevo necesario para los desarrolladores. Ya se está viendo a nivel mundial que los desarrollos construidos con este enfoque sirven como instrumentos para revertir la ecología y los daños, y como fuerzas económicas para construir medios de vida sostenibles. También, a través del tejido de historias el desarrollo regenerativo, se convierten en una fuerza armonizadora dentro de las comunidades y entre diferentes partes interesadas, inspirando nuevos estándares de relación con el lugar. Asimismo, al introducir una visión sistémica y un potencial más amplios, el desarrollador se convierte en un catalizador para la creación de infraestructuras y culturas autoevolutivas de regeneración [18].



El enfoque de lo regenerativo está evolucionando y envuelve un espectro más extenso de preocupaciones de sostenibilidad, que se extiende más allá de los aspectos tradicionales del diseño para abordar la naturaleza del pensamiento y la interactividad que se requiere para diseñar y participar en un proceso regenerativo. No obstante, a pesar de que se tiene un interés creciente, la transición ecológica a la práctica regenerativa trae algunos desafíos, como el conciliar dos cosmovisiones entre la tecnología y la ecología, y la forma en cómo se lleva a la práctica, ya que pocos ingenieros y arquitectos en México están familiarizados con este enfoque. Este nuevo rol está comenzando a surgir en pequeñas escalas y en lugares dispersos por lo que aún no es muy reconocido como parte de una evolución más amplia, lo que se necesita ahora es crear conciencia e intención de su surgimiento como el nuevo patrón que de forma al campo del desarrollo [18].

Para poder avanzar hacia un futuro regenerativo, nos hace falta tener más conciencia y sensibilidad ambiental: "La cultura juega un papel crucial en el desarrollo de una sustentabilidad total en nuestro país, sobre todo en el ámbito social, económico y político [2]". Necesitamos culturas regenerativas, una cultura regenerativa es saludable, resistente y adaptable, se preocupa por el planeta y por la vida sabiendo que esta es la forma más eficaz de crear un futuro para toda la humanidad. El concepto de resiliencia está estrechamente relacionado con la salud, ya que describe la capacidad de recuperar funciones vitales básicas y recuperarse de cualquier tipo de crisis [19].

La creación de comunidades, empresas, economías y culturas regenerativas puede abrir un futuro muy diferente para la humanidad, puede cambiar nuestra experiencia de la realidad: puede convertir un planeta en camino hacia el colapso en un conjunto de sistemas socio-ecológicos que generen una abundancia de recursos renovables; restaurar las funciones vitales de los ecosistemas; fomentar la solidaridad, la cohesión y la resiliencia de la comunidad y, al mismo tiempo, mitigar el impacto eficazmente para adaptarse al cambio climático. La creación de culturas regenerativas tiene sus raíces en un cambio de perspectiva; de vernos a nosotros mismos sólo como individuos, comunidades, naciones y especies separadas, a comprender que somos parte de un todo que está interconectado. Todos podemos iniciar la transformación cultural y sembrar patrones de regeneración que nos lleven a reexaminar la relación entre naturaleza y cultura, prestando atención al efecto de nuestras acciones en múltiples escalas interconectadas y desarrollando una perspectiva partici-

pativa de los sistemas vivos. La educación desempeña un papel importante en la difusión del entendimiento de que somos participantes en un entorno físico interconectado con los procesos químicos, biológicos, ecológicos, sociales y psicológicos [19].

COMPARATIVA ENTRE LO SOSTENIBLE Y LO REGENERATIVO

En la siguiente tabla se comparan los aspectos más importantes del diseño sostenible contra el diseño regenerativo.

Tabla 2. Comparativa de lo sostenible y lo regenerativo.

SOSTENIBLE	REGENERATIVO
Se tiene una visión mecanicista del mundo.	Gira en torno a una visión holística y ecológica del mundo.
Pensamiento reduccionista.	Se basa en un pensamiento sistémico con un enfoque integral y una cosmovisión ecológica.
Usa un modelo fragmentado.	Está basado en la Teoría General de Sistemas, usa modelos de sistemas complejos y comprende las relaciones de los sistemas vivos de forma integral.
Se tiene al hombre sobre la naturaleza.	El hombre y la naturaleza coevolucionan en un mismo sistema.
Los aspectos sociales, ambientales y económicos se analizan de manera separada.	Los aspectos sociales, culturales, ambientales, económicos, políticos y espirituales están totalmente interrelacionados.

Elaboración propia basada en la tabla de Teruel [16].

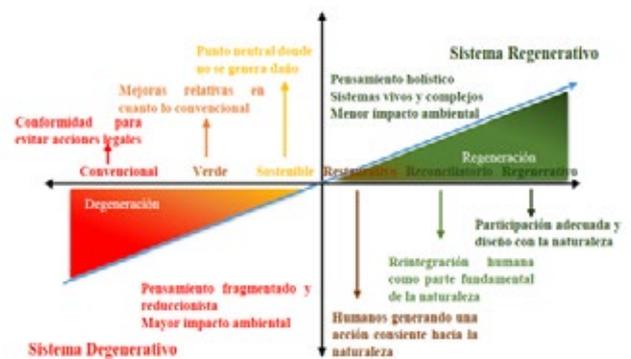


Figura 1. Diagrama del sistema regenerativo. Elaboración propia basada en el diagrama de Whal [19].

DISEÑO REGENERATIVO

El diseño regenerativo es un enfoque que se basa en la Teoría General de Sistemas (TGS) orientado a los procesos de diseño [20]. Se trata de un estudio interdisciplinario y tiene principios que son aplicables con un enfoque transversal a cualquier nivel en cualquier campo de la investigación. El diseño regenerativo aplicado a la arquitectura entiende a los edificios como entidades sistémicas, así como la relación de los seres humanos con su entorno y la relación de flujos de información de energía y materia.



Figura 2. Diagrama del diseño regenerativo aplicado en la arquitectura. Elaboración propia.

Los antecedentes del diseño regenerativo parten desde los primeros fundamentos para la teoría y pensamiento de sistemas introducidos por el biólogo Ludwig von Bertalanffy, quien en 1968 publicó su Teoría general de sistemas (TGS). Con esto introdujo el concepto de sistemas abiertos, enfatizando la diferencia entre los sistemas físicos y biológicos e introduciendo el pensamiento evolutivo. La TGS abrió el camino a una nueva ciencia de la complejidad, el reconocimiento de que los sistemas complejos no pueden entenderse a través del análisis simple condujo a la aparición del pensamiento sistémico. Esto fundó las bases para el desarrollo de la ciencia de los sistemas vivos de Charles Krone, referentes al pensamiento y los sistemas de vida, así como su aplicación en los sistemas naturales y los sistemas sociales. Su trabajo influyó en el modelado y la energía del ecosistema de Howard Odum, y este a su vez influyó en el trabajo sobre tecnologías de diseño regenerativo de John Tillman Lyle, este último postuló el diseño ecosistémico consciente como esencial para un futuro sostenible [18].

El diseño regenerativo apuesta por procesos que restauran, renuevan o revitalizan sus propias fuentes de energía y materiales [20]; con un enfoque de diseño regenerativo aplicado a la arquitectura se puede tener una gestión segura y sostenible de recursos. En el paradigma de lo sustentable y de lo sostenible, los ecosistemas que se pierden por el impacto ambiental no son reparados, son los sistemas regenerativos los que pretenden devolver la vida a los ecosistemas perdidos [21]. La implementación del diseño regenerativo es necesaria, el futuro de la sostenibilidad radica en la regeneración: restaurar y reponer lo que hemos perdido, construir economías

y comunidades que prosperen y también permitan que el planeta prospere [3]. El diseño regenerativo es un proceso de participación dinámica y retroalimentación que toma en cuenta el cambio incesante en el tiempo.

LIVING BUILDING CHALLENGE AND SEEDS OF GOOD ANTHROPOCENES

Algunos ejemplos de la aplicación del diseño regenerativo son el Living Building Challenge and Seeds of Good Anthropocenes. The International Living Future Institute diseñó el programa Living Building Challenge (LBC) el cual se centra en los edificios, es una herramienta unificada para el pensamiento sistemático que permite imaginar un futuro ecológicamente restaurador, proporciona un marco para el diseño, la construcción y la relación simbiótica entre las personas y la naturaleza. El LBC consta de siete categorías de rendimiento o pétalos: lugar, agua, energía, salud + felicidad, materiales, equidad y belleza [22].

1. Pétalo lugar: la intención de este pétalo es realinear la forma en que las personas entienden y se relacionan con el entorno natural, el entorno construido por el hombre debe volver a conectarse con la profunda historia del lugar y las características únicas que se encuentran en cada comunidad.
2. Pétalo agua: la intención de este pétalo es redefinir la forma en que las personas usan el agua en las construcciones ya que la escasez de agua potable se está convirtiendo en un problema grave a nivel mundial, además de los impactos del cambio climático.
3. Pétalo de energía: señala una nueva era de diseño, en la que el entorno construido se basa únicamente en formas renovables de energía y opera durante todo el año de una manera segura y libre de contaminación. Tiene como objetivo priorizar las reducciones y la optimización antes de que se apliquen soluciones tecnológicas para eliminar el gas-to derrochador de energía, recursos y dólares.
4. Pétalo Salud + Felicidad: su intención es enfocarse en las condiciones ambientales más importantes para crear espacios saludables. Al centrar la atención en las principales vías de salud, se crean entornos diseñados para optimizar el bienestar.
5. Pétalo de materiales: su intención es fomentar la creación de una economía de materiales no tóxica y que sea ecológicamente restauradora, transparente y equitativa.
6. Pétalo de equidad: su propósito es transformar los desarrollos para fomentar un sentido de comunidad verdadero e inclusivo que sea justo y equitativo, independientemente de la edad, la clase, la raza, el género o la orientación sexual de un individuo.



7. Pétalo belleza: este apartado nos habla de cómo utilizar las condiciones y las limitaciones actuales para diseñar mejores espacios habitables. La intención principal de este imperativo es conectar el contexto con los participantes sociales.

Cada uno de estos pétalos pueden aplicarse a distintos proyectos, The International Living Future Institute [23] tiene un apartado de casos de estudio, donde se encuentran todos los proyectos certificados y se explican cuáles estrategias se implementan en los edificios. Hay proyectos en Alaska, Canadá, Estados Unidos, Colombia, Brasil, Argentina, Australia, India e Italia, entre otros.

La iniciativa de *Seeds of good anthropocenes* implica un cambio fundamental en las relaciones entre humanos y el medio ambiente, así como cambios en los valores, las culturas, las visiones del mundo e incluso el poder y las relaciones de género que influyen en las normas y el comportamiento social. Su objetivo es ayudar a la comunidad global a desarrollar visiones e historias inspiradoras, con el potencial de ser componentes clave de las transformaciones hacia la sostenibilidad [24].

Las ideas detrás de este proyecto surgen ante la necesidad de explorar qué opciones existen para futuros positivos ante la crisis ambiental y un fuerte deseo de comprender cómo se podrían generar transformaciones de sostenibilidad. Se recopilan iniciativas o “semillas de un buen antropoceno” que pueden ayudarnos a comprender los diferentes componentes de un futuro mejor, donde la gente puede reconocer los procesos que llevan a la llegada y el desarrollo de iniciativas que transformen fundamentalmente a los humanos y las relaciones ambientales [9].

Cada vez más personas participan en estrategias para crear un mundo más justo, próspero y ecológicamente diverso, conocido como un “buen Antropoceno”, donde se pueden desarrollar mejores escenarios comenzando con ideas innovadoras emergentes, formas de vida y proyectos transformadores. Se han recolectado más de 500 semillas en todo el mundo, cuya información se almacena en una base de datos: cómo se establecen, crecen, propagan o inspiran los cambios en otras partes; todo esto para estudiar la transformación y comprender los patrones detrás de los proyectos e ideas transformadores [24].

RELACIONES ENTRE LA CRISIS SANITARIA ACTUAL, LA CRISIS CLIMÁTICA Y ECOLÓGICA, ASÍ COMO LA IMPORTANCIA DE LA CONEXIÓN CON LA NATURALEZA

Es importante retomar la conexión que se ha perdido con la naturaleza, ya que para lograr una cultura rege-

nerativa que nos ayude en el cambio de paradigma se necesita aumentar la sensibilidad y conciencia ambiental en las personas. Además, está comprobado que esta reconexión trae beneficios ambientales, psicológicos, sociales, culturales y económicos [25].

La crisis que se vive hoy en día con el COVID-19 nos da pauta para ver las relaciones entre la crisis sanitaria y la crisis climática-ecológica; y nos deja ver, como dice Eduard Müller [26], que la naturaleza no nos necesita, somos nosotros quienes necesitamos de ella. Sin embargo, nos hemos desconectado y necesitamos retomar esa conexión para evitar un colapso planetario. Todos podemos aportar algo mediante el trabajo colectivo, podemos mostrar el camino que nos lleve a aplicar el desarrollo regenerativo y dejar de impactar negativamente. Estos días de contingencia nos han dejado ver en distintas partes del mundo que, si le damos tiempo a la naturaleza, ésta puede regenerarse.

Esta pandemia evidenció que somos parte de un ecosistema planetario que está interconectado a pesar de todos los avances tecnológicos; su impacto puede conducirnos a una reconsideración de la capacidad humana de dominar las fuerzas de la naturaleza y explotar los recursos que proporciona el ambiente en su propio beneficio [27]. Con esto se puede ver la interconexión entre los sistemas y la necesidad de replantearnos el comportamiento humano y las bases de un futuro regenerativo más sostenible; esto se puede lograr mediante proyectos regenerativos que entiendan la complejidad de los sistemas vivos.

ARQUITECTURA REGENERATIVA

En la década de 1990, el tema más discutido para los diseñadores ecológicos era cómo convencer a los clientes para incorporar características de sostenibilidad; en 2010 las solicitudes se enfocaron en cómo satisfacer las demandas de los clientes para que su proyecto fuera “el más verde”. La perspectiva que se aplica a los asentamientos humanos y las instituciones se ha remodelado significativamente con los años; sus conceptos centrales —especialmente el de ver a las comunidades como ecosistemas en los que la naturaleza y la cultura están entrelazadas y son interdependientes— están impulsando cada vez más un movimiento hacia objetivos sistémicos e integrales que definan nuevos estándares de sostenibilidad [18].

Mediante el uso del diseño regenerativo aplicado a la arquitectura, y entendiendo la arquitectura como un sistema complejo de relaciones entre los elementos que lo integran, se puede plantear un cambio de paradigma [28] para pasar de la visión mecanicista a una cosmovisión ecológica. Esta nueva visión nos ayuda a

reconceptualizar las relaciones entre la tecnología humana y los sistemas ecológicos, económicos, sociales y políticos, para plantear mejores estrategias basadas en la narrativa, la demostración, la educación y la conexión con la naturaleza.

El medio construido es parte fundamental del problema del impacto ambiental, pero también es parte de la solución [29]. Es por esto que la arquitectura se vuelve una parte relevante en la solución de problemas medioambientales. Mediante el uso de la metodología del diseño regenerativo y del Living Building Challenge se pueden crear diseños que nos conecten con la naturaleza y los demás sistemas (ecológicos, sociales, culturales, económicos, políticos, etc).

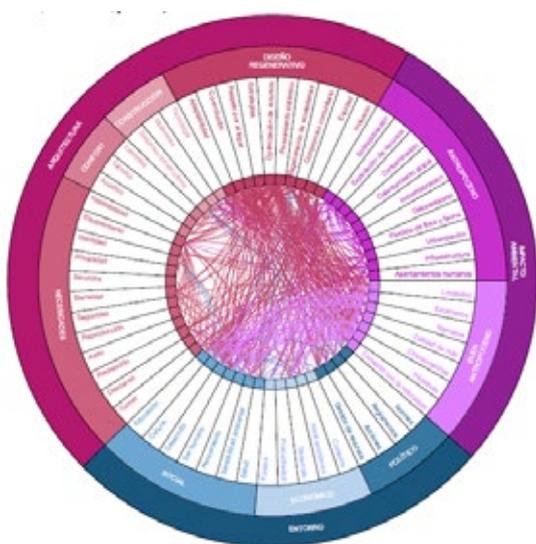


Figura 3. Diagrama complejo del sistema arquitectura regenerativa. Elaboración propia.

La figura 3 tiene el propósito de ilustrar el sistema complejo de la arquitectura regenerativa. Primero se dividió en tres sistemas generales: arquitectura, impacto ambiental y entorno; y cada uno de ellos se subdividió en subsistemas, el diagrama se realizó de esta forma para ver las relaciones entre cada uno de ellos. Cuando entendemos que estamos rodeados de sistemas complejos, podemos apreciar mejor las relaciones que afectan una problemática y se pueden proponer soluciones integrales.

En el análisis sistémico se pueden apreciar las conexiones que tiene la naturaleza con el ser humano, la conciencia ambiental, la salud, el bienestar, la regeneración de ecosistemas y el diseño regenerativo y esto nos puede ayudar a diseñar proyectos regenerativos que comprendan la complejidad de los sistemas vivos y que integren las dimensiones ecológica, política, social, cultural y económica para inspirar nuevos estándares de relación con el lugar donde introduzcan una visión sistémica y un potencial más amplios.

Es necesario diseñar y crear proyectos arquitectónicos en México que apliquen estrategias de sostenibilidad regenerativa y que funcionen como edificios demostrativos donde, mediante la educación y el acceso a la naturaleza, se promueva y difunda la aplicación del diseño regenerativo; además, que ayuden a crear una mayor conciencia ambiental. Se tiene que reinventar la educación como un proceso que inspire a todos para seguir explorando preguntas, estrategias e ideas, y adaptarlas a las condiciones únicas de una cultura y un lugar en particular [19].

CONCLUSIONES

El antropoceno, entendido como la era geológica más reciente de la Tierra, donde los procesos atmosféricos, geológicos, hidrológicos y biosféricos de la Tierra resultan alterados por la actividad antrópica, aparece como resultado de nuestro poco respeto a los límites naturales del planeta. Sin embargo, es también una oportunidad de replantear nuestro comportamiento humano y sentar las bases de un futuro regenerativo sostenible: tenemos que encontrar nuevas formas de relacionarnos con nuestro entorno. La crisis sanitaria que se vive hoy en día nos demuestra que podemos modular nuestras actividades y nos deja ver que la naturaleza puede regenerarse; solo necesita tiempo, y nosotros podemos ayudar con esa regeneración diseñando nuevos modelos de desarrollo que implementen estrategias regenerativas y aporten impactos positivos para la naturaleza.

Tal vez el diseño regenerativo no pueda restaurar las condiciones al 100 %, pues el crecimiento positivo y la adaptación de un sistema dependen de cómo éste se ajuste a su entorno; no obstante, podemos aproximarnos. Es preciso recordar que todos causamos un impacto en el planeta, de mayor o menor medida, y depende de nosotros minimizarlo; podemos aportar individualmente para lograr ese cambio como personas, como profesionistas y como sociedad .

Basados en la información recopilada y en el análisis sistémico que se hizo, se pueden apreciar las conexiones que tiene la naturaleza con el ser humano, la conciencia ambiental, la salud, el bienestar, la regeneración de ecosistemas y el diseño regenerativo. Se puede llegar a la conclusión de que si en México se diseñan proyectos regenerativos que comprendan la complejidad de los sistemas vivos y que integren las dimensiones ecológica, política, social, cultural y económica, se pueden inspirar nuevos estándares de relación con el lugar que introduzcan una visión sistémica y un potencial más amplios.

Estos proyectos pueden ser vistos como una semilla en México, como mencionan en los proyectos del buen



antropoceno, recordando que este concepto implica un cambio fundamental en las relaciones entre humanos y el medio ambiente, así como cambios en los valores, las culturas, las visiones del mundo e incluso el poder y las relaciones de género que influyen en las normas y el comportamiento social. De esta forma los edificios pueden servir como un ejemplo para empezar a desarrollar más proyectos con este enfoque mediante historias de restauración regenerativa.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo durante toda esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] R. Crespo, "Límites naturales a la expansión industrial, semántica del 'desarrollo sostenible' y el programa mínimo bioeconómico de Georgescu-Roegen," en *Ciencia Sociológica*, noviembre de 2012 [en línea], disponible en: <https://cisolog.com/sociologia/limites-naturales-desarrollo-sostenible-y-el-programa-minimo-bioeconomico-de-georgescu-roegen/>.
- [2] G. S. Vázquez, "La arquitectura sustentable como respuesta al daño ambiental," *Revista Latinoamericana de Educación y Estudios Interculturales-RLEEI*, vol. 2, pp. 36-40, 2018.
- [3] M. Stafford, S. Tilley and E. Britton, *The new sustainability: Regeneration*, Innovation Group, Seattle, WA, USA, 2018.
- [4] (2018) *Digital Bricks*. [Online]. Available: <https://digitalbricks.com.mx/2018/08/01/la-construccion-genera-mas-del-50-de-los-contaminantes-en-el-mundo/>
- [5] IPCC, "Calentamiento global de 1,5 °C, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales", IPCC, Ginebra, Suiza, 2018.
- [6] (2020) *Welcome to the anthropocene*. [Online]. Available: <http://www.anthropocene.info/>
- [7] A. Cearreta, "La definición geológica del Antropoceno según el Anthropocene Working Group (AWG)," *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, vol. 23, no. 3, pp. 263-271, 2015.
- [8] W. Steffen, K. Richardson, J. Rockström, S. E. Cornell, I. Fetzer, E. M. Bennett, ... and C. Folke, "Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet," *Science*, vol. 347, no. 6223, 2015.
- [9] E. M. Bennett, M. Solan, R. Biggs, T. McPhearson, A. V. Norstrom, P. Olsson, L. Pereira, G. D. Peterson, C. Raudsepp-Hearne, F. Biermann, S. R. Carpenter, E.C. Ellis, and J. Xu, "Bright spots: seeds of a good Anthropocene," *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 14, no. 8, 2016.
- [10] M. H. A. Equihua, O. Pérez, G. Benítez y S. Ibañez, "Cambio global: el Antropoceno," *Ciencia Ergo-Sum*, vol. 23, no. 1 pp. 67-75, 2016.
- [11] I. L. Pardo, "Sobre el desarrollo sostenible y la sostenibilidad: conceptualización y crítica," *BARATARIA. Revista Castellano-Manchega de Ciencias sociales*, vol. 20, pp. 111-128, 2015.
- [12] UNDP, "Objetivos de Desarrollo Sostenible", Programa de las Naciones Unidas para el desarrollo. [En línea]. Disponible: <https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html>.
- [13] M. Broutin, "Sostenibilidad & salud: beneficios de la arquitectura sostenible para la salud", *Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Cataluña*, España, 2010.
- [14] S. A. Sánchez Fermín, "11 normas y certificaciones de edificación sustentable en México", *Obras por expansión*, México, 2014. [Online]. Available: <https://obras.expansion.mx/construccion/2014/08/28/11-normas-y-certificaciones-de-edificacion-sustentable-en-mexico>
- [15] "¿Sabes lo que es el desarrollo regenerativo? Un concepto más allá de la sostenibilidad" *Ágora Inteligencia colectiva para la sostenibilidad*. [Online]. Available: <https://www.agorarsc.org/sabes-lo-que-es-el-desarrollo-regenerativo-un-concepto-mas-alla-de-la-sostenibilidad/>
- [16] S. Teruel, "Análisis y aproximación a la definición del paradigma del turismo Regenerativo," *MIST thesis, Universidad para la cooperación Internacional (UCI)*, San José, Costa Rica, 2018.
- [17] Regenes Institute, 2020. [Online]. Available: <https://regenerat.es/>.
- [18] P. Mang and B. Reed, "Regenerative Development and Design," *Encyclopedia Sustainability Science & Technology*, vol. 2112, 2012.
- [19] D. C. Whal, *Designing regenerative cultures*. England: Triarchy Press, 2016.
- [20] "Arquitectura regenerativa", *Heaven grown*, 2020. [Online]. Available: <http://heavengrown.com/arquitectura-regenerativa/>.
- [21] J. T. Lyle, *Regenerative design for sustainable development*. United States of America: John Wiley & Sons, 1996.
- [22] International Living Future Institute, *Living Building Challenge 4.0*, 2019.
- [23] International Living Future Institute, 2020. [Online]. Available: https://living-future.org/lbc-3_1/case-studies/.
- [24] *Seeds of good anthropocenes*, 2019. [Online]. Available: <https://goodanthropocenes.net/>.
- [25] J. A. Corraliza and S. Collado, "Conciencia ecológica y experiencia ambiental en la infancia," *Papeles del psicólogo*, vol. 40, no 3, pp. 190-196, 2019.

[26] Democracia En Red. Ciudades Comunes - Dia 2 - Sabado 25 de Abril 2020.(25 de abril de 2020) [Video en línea]. Available: https://www.youtube.com/watch?v=-GOJHD0C1p4&feature=emb_title.

[27] F. Bosoer y M. Turzi, "La pandemia del 2020 en el debate teórico de las Relaciones Internacionales," *Geopolítica(s) Revista de estudios sobre espacio y poder*, pp. 153-163, 2020.

[28] C. Du Plessis, "Towards a regenerative paradigm for the built environment," *Building Research & Information*, vol. 40, pp. 7-22, 2012.

[29] A. Poó, "Edificios verdes, edificios Inteligentes : tecnología para la arquitectura sustentable," *Zaloamati*, pp. 1-18, 2009.v

CHARACTERIZATION AND CATALYTIC PERFORMANCE OF Co-Mo-W SULFIDE CATALYST SUPPORTED ON EMS-₁₅

"Caracterización y rendimiento de catalizadores sulfurados de Co-Mo-W soportados en EMS-15"

Mariana Carolina Guerrero Rivera¹, Rufino Nava Mendoza¹, José Santos Cruz^{1*}

¹Universidad Autónoma de Querétaro

Querétaro, México

*Correo electrónico: jsantos@uaq.edu.mx

ABSTRACT

Hydrodeoxygenation (HDO) catalysts based on transition metal sulfides (Co-Mo-W) and supported on mesoporous silica sponge (EMS-15) were synthesized and characterized by different methods (SEM, TEM, XRD, Micro-Raman spectroscopy, DRS-UV-vis and catalytic activity). It was demonstrated that the use of mesoporous silica sponge has an advantage over the use of other silica materials for the preparation of supported catalysts for hydrodeoxygenation of m-cresol. This is because the presence of highly porous structures has a positive effect over the diffusion processes of the precursors of the active phases on the support, and the final result is a higher catalytic activity for the HDO reactions of m-cresol, even more than that of commercial catalysts; this activity is also related with the stage of the synthesis process in which the mixture is made.

Keywords: ENE, CATALYSTS, HDO, MESOPOROUS SILICA SPONGE, EMS-15, Co-Mo-W

RESUMEN

Se utilizaron diferentes métodos (SEM, TEM, XRD, espectroscopía Micro-Raman, DRS-UV-vis y actividad catalítica) para sintetizar y caracterizar catalizadores de hidrodeseoxigenación (HDO) basados en sulfuros de metales de transición (Co-Mo-W) y soportados en esponja de sílice mesoporosa (EMS-15). Se demostró que el uso de una esponja mesoporosa de sílice tiene una ventaja respecto al uso de otros materiales de sílice para la preparación de catalizadores soportados para la hidrodeseoxigenación de m-cresol. Esto se debe a que la presencia de estructuras altamente porosas tiene un efecto positivo sobre los procesos de difusión de los precursores de las fases activas sobre el soporte. El resultado es una mayor actividad catalítica para las reacciones HDO del m-cresol, incluso mayor que la de los catalizadores comerciales; esta actividad también está relacionada con la etapa del proceso de síntesis en la que se realiza la mezcla.

Palabras clave: ENE, CATALYSTS, HDO, MESOPOROUS SILICA SPONGE, EMS-15, Co-Mo-W

INTRODUCTION

Energy is essential for a society to function; however, emerging economic, political and environmental concerns have a direct impact and pressure on existing energy sources. For example, global energy consumption is expected to double by 2050 [1]. As a consequence of the depletion of fossil fuels and the increasing demand for energy, it is imperative to develop alterna-

tive energy sources. On the other hand, CO₂, produced mainly by burning and thermal oxidation of fossil fuels, is one of the main contributors to climate change [2].

The composition and properties of bio-oils in terms of oxygen content, viscosity and acidity are crucial criteria to evaluate their potential to be transformed into biofuels or other chemical products [3]. Unlike conventional fuels, bio-oils are derived from depolymerization and fragmentation of biomass feedstock. Consequently, an improvement procedure is necessary to reduce the oxygen content before they can be processed in order to avoid undesirable characteristics that limit their application, such as viscosity, thermal instability, corrosivity and immiscibility with conventional fuels [4].

Bio-oils are made up of numerous compounds, including aldehydes, alcohols, furfurals, ketones, carboxylic acids, carbohydrates and phenols [5]. The compositions of these compounds depend on the raw materials they are extracted from. As a result, understanding bio-oil deoxygenation mechanisms is extremely complicated. A current strategy to study bio-oils is to use model compounds —ones that can control the selectivity of certain products and test the improvement of the bio-oil towards fuels of the desired qualities with the knowledge of the chemistry and mechanisms of the model compounds [5]. The advantage of using model compounds is that they can provide more accurate chemical information and avoid thermal polymerization reactions [6].

In order to upgrade bio-oils, hydrodeoxygenation (HDO) seems to be a promising route because the process is effective [7] and has less impact on the aromatics in the raw material [8]. It was originally inspired by hydrodesulfurization (HDS) and hydrodenitrogenation (HDN) of coal liquids and petroleum gas oils because of their similarities, as they all aim to remove heteroatoms under analogous conditions.

Many studies have been published regarding the use of mesoporous silica materials as metallic catalyst supports for hydrotreatment reactions. According to the studies by Lopez Mendoza and co-workers [9], most common catalytic materials used in hydrotreating processes are based on molybdenum and tungsten sulphides, promoted by cobalt or nickel and supported on inert materials. Aluminum is the most common support material for HDS reactions; however, it has several disadvantages, mainly related to the presence of unwanted interactions between metals and the support; this has prompted the search for alternative materials such as silica, which has shown equally advantageous properties in terms of physical as well as chemical properties.

Similar studies have been reported by Soni and co-workers [10],[11], who have synthesized NiMo cat-



alysts supported on SBA-15 and SBA-16 silicas that have been tested in different hydrotreating reactions; they have shown good catalytic activity and even better performance. Meanwhile, Klimova and co-workers used SBA-15 and SBA-16 silicas as catalytic support for the system Ni-Mo-W under different conditions, and they obtained improvements in catalytic activity for hydrodesulfurization of dibenzothiophene molecules [12],[13],[14]. Adjaye and co-workers proved the effectiveness of SBA-15 as support for HDS catalysts using system Ni-Mo and Fe-W; their results showed catalytic activities comparable to those of commercial NiMo-alumina catalysts [15], [16]. Rayo and co-workers studied the effect of the acid-base conditions of the impregnation media and the presence of dopant heteroatoms (such as Al, Ti and Zr) over Ni-Mo sulfided catalysts supported in SBA-15 used in the HDS reaction of thiophene; good catalytic performance was observed, improved by the presence of conditions or heteroatoms capable of promoting an increased Brønsted acidity in the catalyst surface and avoiding the formation of NiMoO₄; additionally, they reported that the synthesis of transition metal sulfide precursors under acid conditions favors the preservation of the porous structure of the SBA-15 [17], [18].

Additional studies have focused on the surface modification/functionalization of the SBA materials by incorporation of other transition metals such as titanium, zirconium or aluminum; improvements have been observed in the dispersion and reducibility of the active species, which results in a better catalytic performance [19], [20], [21], [22], [23]. Wang and co-workers demonstrated the importance of porous morphology in catalysts supported in mesoporous silica SBA-15 by the synthesis of materials with different structure, which showed different catalytic performance as consequence of variations in the diffusion processes in the porous structure [24].

To date, despite all these studies, there has been no reported research on the combination of supports with different porosities for transition metal sulfides HDO catalysts. In this work, a group of HDO catalysts based on transition metal sulfides (Co-Mo-W) and supported in mixtures of mesoporous silicas (EMS-15) were synthesized and characterized by different physicochemical techniques in order to determine their catalytic properties and performance.

MATERIALS AND METHODS

SUPPORT PREPARATION

The mesoporous silica sponge EMS-15 was synthesized according to the procedure described previously by

Zhao *et al.* [25] and Flodström & Alfredsson [26]. For the synthesis of EMS-15 material, Pluronic® P-123 (EO₂₀PO₇₀EO₂₀, Sigma-Aldrich) triblock copolymer was used as the structure-directing agent. To perform a typical synthesis, the Pluronic® P-123 was completely dissolved in a solution of water and 4M HCl under stirring. After that, the required amount of 1,3,5-Triisopropylbenzene (C₆H₃[CH(CH₃)₂]₃, Sigma-Aldrich) was added to the solution as swelling agent. Finally, the required amount of tetraethyl orthosilicate (TEOS, 98%, Sigma-Aldrich) was added to the solution, the sol-gel reaction was carried out with stirring at 35 °C for 24 h. The reaction mixture was subsequently transferred into polypropylene bottles and heated at 80 °C for 24 h in a controlled temperature oven. Afterward, the obtained solid was vacuum filtered, washed thoroughly with deionized water and dried, first at room temperature air, then at 110 °C for 18 h, and finally calcined at 550 °C for 4 h in a static air muffle with a 2 °C per minute temperature ramp, in order to remove the organic template.

The EMS-15 support was superficially modified with phosphorus using H₃PO₄ solutions at different concentrations. The incorporation of phosphorus was carried out by the impregnation method (filling of pores), using solutions of H₃PO₄ with the corresponding concentrations, to obtain different loads of phosphorus in its oxidized form P₂O₅ of 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5% and 2.0% by weight. After impregnation, the supports were left to dry at room temperature for 24 h, subsequently they were dried at 110 °C for 4 h, and finally calcined at 500 °C for 4 h.

CATALYST PREPARATION

Oxide-state catalysts were prepared by the simultaneous impregnation via incipient wetness method. Each support was loaded with fixed equal amounts of molybdenum (5.75 wt% as MoO₃), tungsten (10.92 wt% as WO₃) and cobalt (3.05 wt% as CoO). 1 g of support was impregnated in a typical synthesis with 1 ml impregnation aqueous solution of ammonium heptamolybdate tetrahydrate ((NH₄)₆Mo₇O₂₄ · 4H₂O), assay: 81-83%, Sigma-Aldrich), ammonium metatungstate hydrate ((NH₄)₆H₂W₁₂O₄₀ · x H₂O), assay: 99%, Sigma-Aldrich) and cobalt nitrate hexahydrate (Co(NO₃)₂ · 6H₂O, assay: 98%, Sigma-Aldrich). The concentrations of each transition-metal precursor were calculated to achieve a Mo(W)/(Mo+W) atomic ratio of 0.5 and a Co/(Mo+W) atomic ratio of 0.43. The impregnated supports were dried first at room temperature for 24 h, and then at 110 °C for 4 h. Finally, they were calcined at 500 °C for 4 h in a static air muffle with a 2 °C per minute temperature ramp. It is important to mention that the aqueous

solution containing the precursors of the three metals is stable during the catalysts preparation. Fresh sulfided catalysts were prepared by sulfidation of the oxide-state catalysts. The sulfidation reaction was carried out in a U-shaped glass tubular reactor; oxide-state catalysts were charged in the reactor and heated to 400 °C in N₂ at 2 °C per minute; when reaction temperature was raised, sulfidation was carried out using a stream of 15 (v/v)% of H₂S in H₂ with a flux of 0.71 m³ per minute per catalyst gram, at controlled constant temperature (400 °C) for 4 h. Once the sulfidation reaction was carried out, sulfided catalysts were cooled to room temperature in a nitrogen stream and charged directly to the HDO reactor in inert atmosphere in order to avoid oxidation of the transition metal sulfides.

CHARACTERIZATION TECHNIQUES

SCANNING ELECTRON MICROSCOPY

The morphological properties of supports and catalysts were studied by scanning electron microscopy. The images for supports and oxide-state catalysts were obtained using secondary electrons in a JEOLJSM-6060 LV microscope operated at 20 kV under high vacuum conditions. The samples were ground into a fine powder, deposited over copper stubs and covered with a thin gold film with the aid of a metal evaporator EMS 550 Sputter Coater. The sulfided catalysts were characterized with a JEOL JSM-7600F microscope operated at 1 kV under high vacuum, and the images were collected by the use of secondary electrons; the powdered samples were treated in an inert atmosphere, deposited on copper stubs and submitted to uncoated analysis.

TRANSMISSION ELECTRON MICROSCOPY

The morphological properties and sizes of supports were studied by transmission electron microscopy. The images were taken in a JEOL JEM 2000FX microscope operated at 200 kV under very low illumination to avoid destruction of material under the electron beam. The powdered calcined catalysts were dispersed in acetone at room temperature and then deposited on copper stubs. This technique allowed to obtain information about the morphology and size of the supported metal oxides

X-RAY DIFFRACTION

The presence of crystalline phases of oxides and sulfides of transition metals in the catalysts was determined by X-ray diffraction in a range of 5-80 °C for

2 ; the diffractograms for oxide-state catalysts were recorded in a Rigaku Miniflex diffractometer, using Ni-filtered Cu-K α radiation ($\lambda = 1.54 \text{ \AA}$), operated at 30 kV and 15 mA, with a step size of 2 °C per minute and sampling every 0.02 s. Those for fresh sulfided catalysts were obtained in a Rigaku Ultima IV diffractometer, working with Co-filtered Cu-K α radiation ($\lambda = 1.54 \text{ \AA}$), with a step size of 5 °C per minute, sampling frequency of 0.02 s, and rotating the specimen at 30 revolutions per minute. The determination of the crystalline phases and indexing was done using the MDI-Jade® V 5.0.37 software.

MICRO-RAMAN SPECTROSCOPY

The characterization and aggregation of transition metal oxides in catalysts was studied by Micro-Raman spectroscopy. All the spectra were recorded at room temperature in a Dilor Labram II Micro-Raman system equipped with an Ar laser emitting at 488 nm and operated at 30 mW, with a resolution of $\pm 1 \text{ cm}^{-1}$, and a holographic notch filter from Kaiser Optical Systems, Inc. (model Super Notch-Plus).

DRS-UV-VIS SPECTROSCOPY

Diffuse reflectance spectroscopy in the UV-visible range was aimed to determine the coordination environment of transition metals in oxide-state catalysts, the spectra were recorded in the range of 200-800 nm at room temperature using a Varian Cary 5000 UV-vis spectrometer equipped with an integration sphere. The spectra were determined using an internal MgO reference material and using the EMS-15 as blank in order to avoid the appearance of the electronic transitions corresponding to the siliceous material. Before the analysis, samples were meshed in order to obtain particles with sizes in the range of 100-125 μm .

CATALYTIC PERFORMANCE MEASUREMENTS

HDO reaction of m-Cresol was carried out in a 50 ml Parr model 4520 high pressure batch reactor. In order to minimize internal diffusion limitations, all catalysts were thoroughly ground in a mortar to a fine powder and meshed for use materials with particle sizes between 106 and 125 μm . For the experiment, 20 mg of sulfided catalyst were introduced into the batch reactor, which contained a solution of m-Cresol in decalin with a concentration of 5 mmol/l at room temperature. The reactor was heated up to 350 °C in presence of inert atmosphere with N₂ at 32 atm. Once reaction temperature was raised, nitrogen was purged out and the reactor

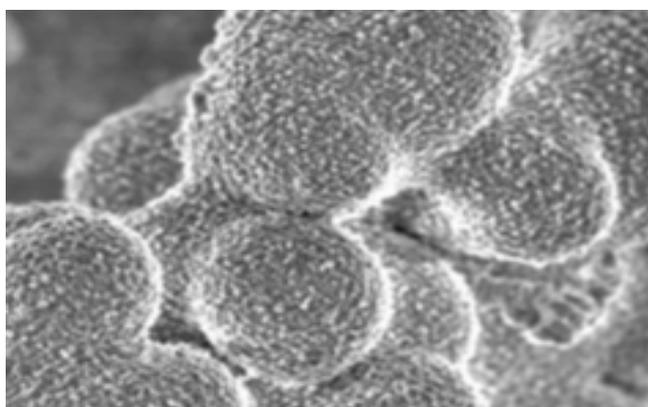
was pressurized with hydrogen to 32 atm, a hydrodeoxygenation reaction was carried out at constant temperature (350 °C) with intense stirring (1000 rpm). These conditions allow to exclude external diffusion effects and minimize internal diffusion limitations [19], [27], [28], [29], [30]. The reaction time was averaged to 5 h from the incorporation of hydrogen to the reaction system. The residual reactants and resulting products concentrations were analyzed using gas chromatography with the use of an Agilent Technologies 7990A chromatograph provided with a flame ionization detector, capillary column and HP-5.

RESULTS AND DISCUSSION

SCANNING ELECTRON MICROSCOPY

Scanning electron microscopy (SEM) micrographs of supports are shown in Figure 1. Concerning the support morphology, SEM images confirmed that EMS-15 is a highly porous material supported catalyst. Figure 1A shows that the particles of EMS-15 have spheres form with highly uniform size, approximately 3.5 μm diameter. Also, in Figure 1B, a highly porous material can be observed, with a pore diameter between 20 and 30 nm and a wall thickness of approximately 18 nm. Therefore, this material corresponds to a mesoporous silica sponge.

A



B

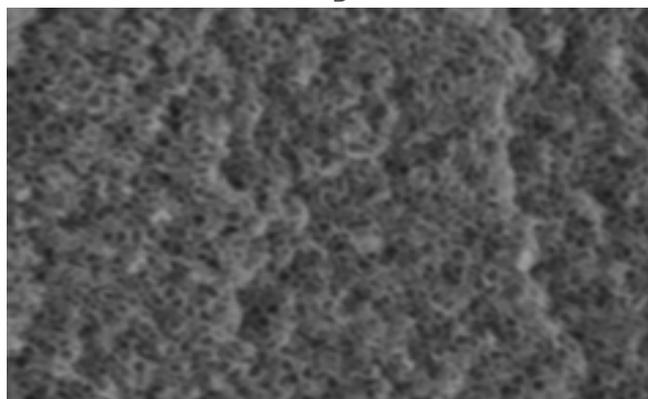


Figure 1. SEM micrographs of mesoporous silica sponge EMS-15.

TRANSMISSION ELECTRON MICROSCOPY

Transmission electron microscopy (TEM) micrographs of supports are shown in Figure 2. Concerning the support morphology, TEM images also confirmed that EMS-15 has a mesoporous silica sponge structure with 20-30nm diameter cavities. That is consistent with the structure reported in the literature [31].

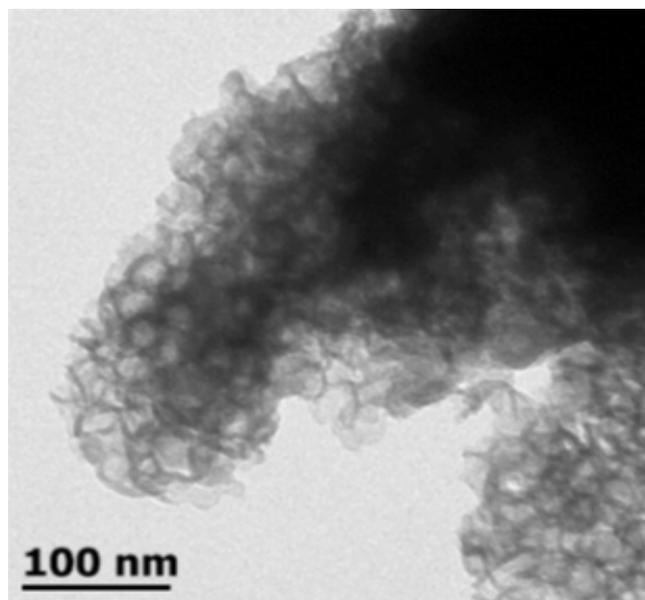


Figure 2. SEM micrographs of mesoporous silica sponge EMS-15.

X-RAY DIFFRACTION

Normal angles diffractograms obtained for mesoporous silica sponge EMS-15 are shown in Figure 3. This procedure was carried out to detect the presence of crystalline phases in the catalysts prepared. As expected, all the catalysts revealed typical diffraction patterns, with a very wide reflection around $2\theta = 24^\circ$, typical of amorphous silica, because the support (EMS-15) was calcined at 550 °C, temperature at which silica does not crystallize unless it is in its amorphous form [25], [27], [32].

The Co-Mo-W/(x)P-EMS-15 patterns contain low intensity reflections at $2\theta = 22.6, 24.7, 26.2, 31.8, 32.9, 33.5, 33.8$ and 51.7° , corresponding to the Mo_4O_{11} phase. It also presents low intensity reflections in $2\theta = 23.3$ and 27.3° , corresponding to the MoO_3 phase. Finally, the presence of a third species was found, which appears at $2\theta = 23.4, 23.9$ and 34.19° , corresponding to the $\text{Mo}(0.2)\text{W}(0.8)\text{O}_3$ phase. The low and wide intensity of the reflections indicates that most of the compatible species must be widely dispersed on the surfaces of all supports. This characteristic was best observed in the Co-Mo-W/(1.5P)EMS-15 catalyst; this could be due to the fact that, at this concentration, the phosphorus

stimulates the interaction between the support and the metal oxides.

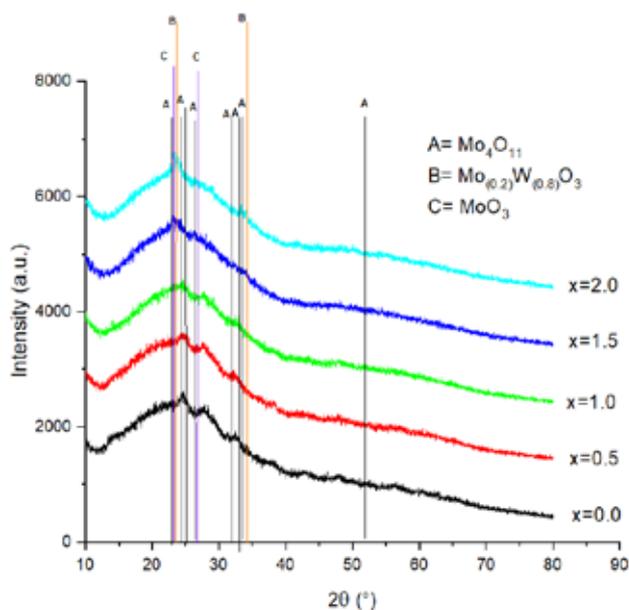


Figure 3. X-ray diffractograms for Co-Mo-W/(P)EMS-15 catalysts.

MICRO-RAMAN SPECTROSCOPY

Micro-Raman spectra obtained for the state oxide catalysts are shown in Figure 4. It may be seen that they all show the most intense band in the range of 900-1000 cm^{-1} ; moreover, the size and position indicate the presence of several species of tungsten and molybdenum with different symmetries. Deconvolution (not shown) of this band exhibits a strong peak at 940-960 cm^{-1} attributed to the symmetric stretching vibration of the terminal bond Mo(W)=O in various types of polymolybdates and polytungstates with octahedral coordination of the metal, whose intensity is enriched by the contribution of the Si-O stretching of the silanol groups of the silica that appears in the same range. Additionally, a shoulder is present at 980-985 cm^{-1} and a band of low intensity about 860 cm^{-1} that has been reported as corresponding to the O-Mo-Mo-O stretching vibrations of distorted polymolybdates [35], [36], [37]. The presence of polytungstates in samples is confirmed by the appearance of a low intensity band at 510 cm^{-1} and 200-300 cm^{-1} , which correspond to the stretching and angular deformation of the W-O-W bonds, respectively [34], [38], [39]. Dioxo compounds of molybdenum and tungsten are present as isolated species with tetrahedral coordination, which is evidenced by an intense band at 970-975 cm^{-1} , corresponding to the O=Mo(W)=O asymmetric stretching; and a contribution to the band at 990-995 cm^{-1} , related to the O=Mo(W)=O symmetric stretching [34], [38]. The presence of an intense band between 935

and 945 cm^{-1} may be ascribed as the W=O symmetrical stretching related with tungsten in tetrahedral position, such as in the WO_4^{2-} ion, which is presented as an isolated species. The presence of this compound in the catalysts is confirmed by the appearance of a low intensity band at 730-740 cm^{-1} attributed to the O-W-O asymmetrical vibration [33], [34]. The displacement of this band is indicative of distortion in the tetrahedral structure of the complex. The presence of molybdenum species isolated in tetrahedral coordination, as $\beta\text{-CoMoO}_4$, is assumed by the presence in all samples of the band at 890-900 cm^{-1} corresponding to the Mo-Co-O stretching, at 830-840 cm^{-1} associated with Mo-O asymmetric stretching, and at 317 cm^{-1} , related to the O-Mo-O angular deformation [40].

The presence of bands at 990-995 and 815-820 cm^{-1} , in addition to low intensity bands at 708, 666, 417, 377, 338, 290, 248, 217, 198 and 160 cm^{-1} are signals of the presence of MoO_3 supported on silica, as has been reported previously [35]. Low intensity bands are observed in all spectra at 715 cm^{-1} and 435 cm^{-1} associated with WO_3 . Most of the samples exhibit bands at 990, 970 and 910 cm^{-1} , which appear as shoulders on the main band, additionally to low intensity bands at 635, 252 and 220 cm^{-1} , which have been previously reported as corresponding to silico-molybdc anion $[\text{SiMo}_{12}\text{O}_{40}]^{4-}$ [41]. Around 1020 cm^{-1} a very low intensity band can be seen associated with the Mo=O stretch in mono-oxo molybdenum species attached directly to the support [35].

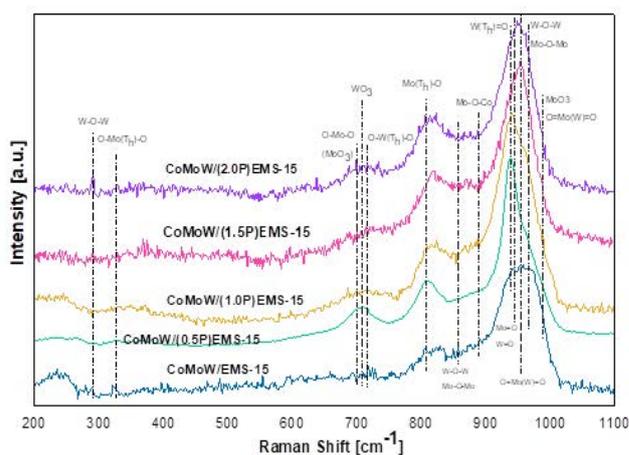


Figure 4. Micro Raman spectra for Co-Mo-W/(P)EMS-15.

DRS-UV-VIS SPECTROSCOPY

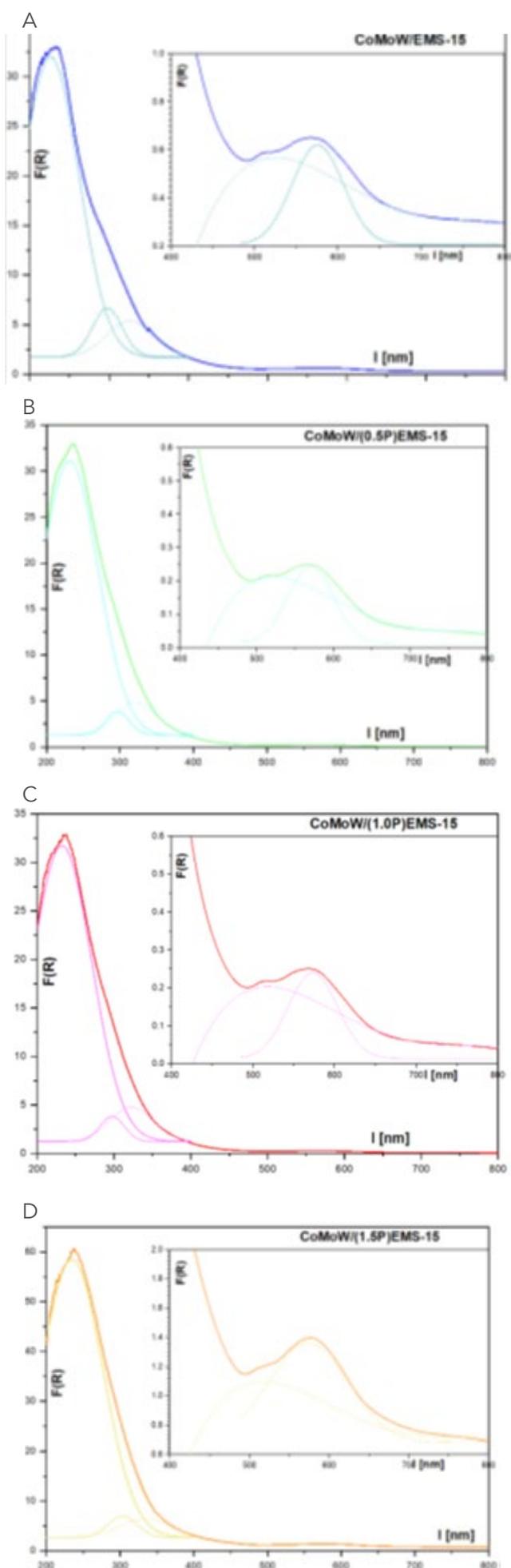
The diffuse reflectance spectra in the UV-visible range for the oxide state catalysts are presented in Figure 5 accompanied with the corresponding deconvolution peaks. In all the spectra, a very intense band



has been identified between 200 and 350 nm whose deconvolution denotes the presence of three bands: a band between 220 and 240 nm corresponding to the ligand-metal charge transfer related to the presence of Mo^{6+} and W^{6+} ions in tetrahedral coordination like in WO_4^{2-} and MoO_4^{2-} isolated species, whose presence on silica supported catalysts has already been reported [20], [27], [32], [33]; a second band at 290-300 nm has been attributed by Jeziorowski *et al.* [42]-[43] to ligand-metal charge transfer transitions in Mo-O-Mo bonds present in octahedral polymolybdates; the third band at 320-340 nm has been reported as corresponding to the ligand-metal charge transfer transition from the O^{2-} to $\text{Mo}^{6+}(\text{W}^{6+})$ in octahedral coordination compounds such as polymolybdates and polytungstates [20], [27], [32], [34], [35]; both types of compounds were identified in the analysis of X-ray diffraction, so these results are consistent with the fact that the structure of the species supported on environmental conditions is governed by the acid-base interactions between transition metals and the support, so that the silica surface having an acidic species tends to form stable in acid media, such as $\text{Mo}_7\text{O}_{26}^{4-}$ and $\text{Mo}_8\text{O}_{24}^{6-}$ [42], [44], [45], [46].

The presence of broad bands indicates that the metals exist in aggregates of different sizes. In all samples, a similar amount of octahedral molybdenum and tungsten species is observed, except for the Co-Mo-W/(1.5P)EMS-15, which shows a higher band corresponding to these species, similar results were obtained for the content of species in tetrahedral coordination, which shows that metal-support interaction is more significant in this catalyst.

With respect to the to the band at 500-520 nm, it has been previously reported that it corresponds to charge transitions in Co^{2+} complexes with octahedral coordination [47]. Additionally, the band observed between 565 and 580 nm has been attributed in previous studies to the d-d electronic transitions (4T_{2g} to 4A_{2g} and 4T_{2g} to 4T_{1g}) in octahedral high spin cobalt complexes present in the $\beta\text{-CoMoO}_4$, where the cobalt interacts with molybdenum and whose presence has already been confirmed by X-ray diffraction; this octahedral ion has been observed to be easily sulfided to generate active species for catalytic hydrodesulfurization reactions [20], [27], [32], [48]; however, there have also been reports of the occurrence of charge transfer transitions for Co^{2+} species in tetrahedral coordination in this range [48], indicating the presence of cobalt ions interacting directly with the support as Co_2SiO_4 , so that there may be small amounts of these species supported on the catalysts.



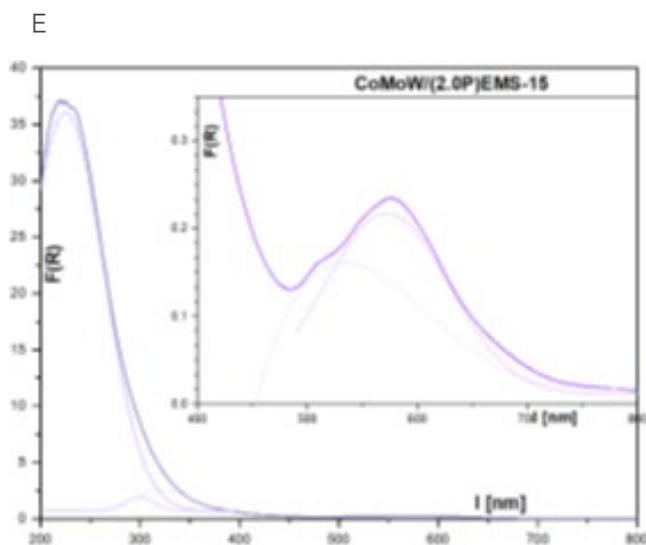


Figure 5. Diffuse Reflectance uv-Vis spectra for the oxide state catalysts.

CATALYTIC PERFORMANCE

The m-Cresol hydrodeoxygenation (HDO) reaction was used to evaluate the activity and selectivity of Co-Mo-W/EMS-15 and Co-Mo-W/(P)EMS-15 sulfur catalysts. The only reaction products identified by gas chromatography for all trimetallic catalysts were toluene and methylcyclohexane.

For all the catalysts studied, the m-Cresol hydrodeoxygenation reaction was carried out mainly through direct deoxygenation, for the generation of toluene. The formation of a very small amount of methylcyclohexane was observed, indicating that the hydrogenation of toluene was not favored under the reaction conditions.

All the catalysts had a high catalytic activity in the HDO of m-Cresol; moreover, the presence of phosphorus in the catalysts generated catalytic sites with higher catalytic activity compared to the phosphorus-free catalysts. The Co-Mo-W catalyst supported in EMS-15 modified with 1.0 wt% phosphorus showed the highest catalytic activity.

The micro-Raman results allow to attribute the high activity of the catalysts modified with phosphorus, Co-Mo-W/(P)EMS-15, to the presence of molybdenum and tungsten species in octahedral coordination. The bands related to this species show a greater intensity, compared to the phosphorus-free catalysts; therefore, these catalysts have a high amount of terminal bonds Mo(W)=O, which are responsible for the catalytic activity in the hydrodeoxygenation of m-Cresol.

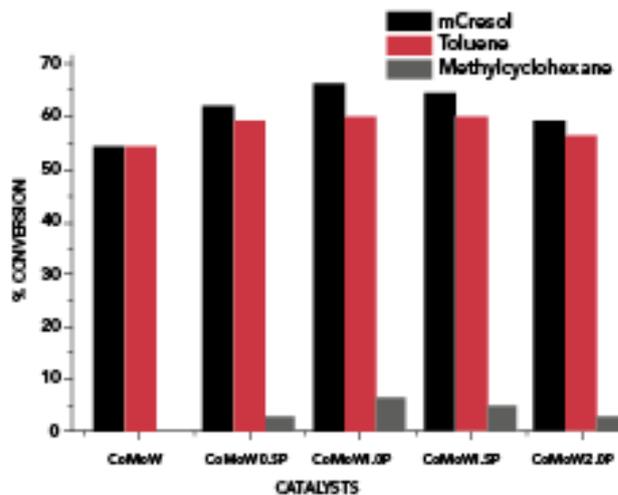


Figure 6. Conversion and distribution of products obtained from m-Cresol by HDO.

CONCLUSIONS

The use of mesoporous silica sponge EMS-15 as support for catalytic materials show advantages over the use of other mesoporous silicas in the preparation of trimetallic catalysts based on transition metal sulphides. This improvement is attributed to the presence of different mesoporous structures, which has a positive effect over the diffusion processes of the precursors of the active phases on the support. This, as well as the fact that mesoporous silica sponge has suitable pore dimensions for the diffusion of the reactants and the products which inhibits the external mass transfer limitations, promotes a higher formation of desirable precursor phases. The whole result is a higher catalytic activity for the HDO reactions of m-cresol, even more than that of commercial catalysts. It was observed that the improvement in activity is also related with the stage of the synthesis process in which the mixture is made, this suggests that the higher activity results from different levels of electronic and chemical interaction between precursors and the support material.

REFERENCES

- [1] J. P. Lange, "Lignocellulose conversion: an introduction to chemistry, process and economics," *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, vol. 1, pp. 39-48, 2007.
- [2] A. Gil, M. Medrano, I. Martorell, A. Lázaro, P. Dolaro, B. Zalba & L. F. Cabeza, "State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation. Part 1—Concepts, materials and modellization," *Ren. and Sust. E. Rev.*, vol. 14, n° 1, pp. 31-55, 2010.
- [3] Q. Zhang, J. Chang, T. Wang & Y. Xu, "Review of biomass pyrolysis oil properties and upgrading re-



search," *Energy Conversion and Management*, vol. 48, n° 1, pp. 87-92, 2007.

[4] E. Furimsky, "Catalytic hydrodeoxygenation," *App. Cat. A: General*, vol. 199, n° 2, pp. 147-190, 2000.

[5] H. Zhong & W. Xianqin, "Hydrodeoxygenation of model compounds and catalytic systems for pyrolysis bio-oils upgrading," *Catalysis for Sustainable Energy*, vol. 1, pp. 28-52, 2013.

[6] E. Laurent y B. Delmon, "Influence of oxygen-, nitrogen-, and sulfur-containing compounds on the hydrodeoxygenation of phenols over sulfided cobalt-molybdenum/gamma.-alumina and nickel-molybdenum/gamma.-alumina catalysts," *Ind. & Eng. Chem. Res.*, vol. 32, n° 11, pp. 2516-2524, 1993.

[7] C. A. Fisk, T. Morgan, Y. Ji, M. Crocker, C. Crofchek & S. A. Lewis, "Bio-oil upgrading over platinum catalysts using in situ generated hydrogen," *Applied Catalysis A: General*, vol. 358, n° 2, pp. 150-156, 2009.

[8] N. Joshi & A. Lawal, "Hydrodeoxygenation of pyrolysis oil in a microreactor," *Chemical Engineering Science*, vol. 74, pp. 1-8, 2012.

[9] M. López Méndoza, R. Nava, C. Peza Ledesma, B. Millán Malo, R. Huirache Acuña, P. Skewes & E. Rivera Muñoz, "Characterization and catalytic performance of Co-Mo-W sulfide catalysts supported on SBA-15 and SBA-16 mechanically mixed," *Catalysis Today*, vol. 271, pp. 114-126, 2016.

[10] K. Soni, K. Mouli, A. Dalai & J. Adjave, "Influence of Frame Connectivity of SBA-15 and KIT-6 Supported NiMo Catalysts for Hydrotreating of Gas Oil," *Catalysis Letters*, vol. 136, pp. 116-125, 2010.

[11] K. Soni, T. Bhaskar, M. Kumar, K. S. R. Rao & G. M. Dhar, "Hydrodesulfurization Studies on SBA-16 Supported Molybdenum Hydrotreating Catalysts," *Novel Materials for Catalysis and Fuels Processing*, vol. 1132, pp. 161-192, 2013.

[12] T. Klimova, L. Lizama, J. Amezcua, P. Roquero, E. Terrés, J. Navarrete & J. Domínguez, "New NiMo catalysts supported on Al-containing SBA-16 for 4,6-DMDBT hydrodesulfurization: Effect of the alumination method," *Catalysis Today*, vol. 98, n° 1-2, pp. 141-150, 2004.

[13] J. A. Mendoza Nieto, O. Vera Vallejo, L. Escobar Alarcón, D. Solís Casados & T. Klimova, "Development of new trimetallic NiMoW catalysts supported on SBA-15 for deep hydrodesulfurization," *Fuel*, vol. 110, pp. 268-277, 2013.

[14] L. Lizama & T. Klimova, "Highly active deep HDS catalysts prepared using Mo and W heteropolyacids supported on SBA-15," *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 82, n° 3-4, pp. 139-150, 2008.

[15] V. Sundaramurthy, I. Eswaramoorthi, A. Dalai & J. Adjave, "Hydrotreating of gas oil on SBA-15 supported

NiMo catalysts," *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 111, n° 1-3, pp. 560-568, 2008.

[16] P. E. Boahene, K. Soni, A. Dalai & J. Adjave, "Application of different pore diameter SBA-15 supports for heavy gas oil hydrotreatment using FeW catalyst," *Applied Catalysis A: General*, vol. 402, n° 1-2, pp. 31-40, 2011.

[17] P. Rayo, M. S. Sana, J. Ramírez, J. Ancheyta & A. Aguilar Elguézabal, "Effect of the preparation method on the structural stability and hydrodesulfurization activity of NiMo/SBA-15 catalysts," *Catalysis Today*, vol. 130, n° 2-4, pp. 283-291, 2008.

[18] P. Rayo, J. Ramírez, M. Rana, J. Ancheyta & A. Aguilar Elguézabal, "Effect of the Incorporation of Al, Ti, and Zr on the Cracking and Hydrodesulfurization Activity of NiMo/SBA-15 Catalysts," *Ind. & Eng. Chem. Res.*, vol. 48, n° 3, pp. 1242-1248, 2009.

[19] R. Nava, R. Ortega, G. Alonso, C. Ornelas, B. Pawelec & J. Fierro, "CoMo/Ti-SBA-15 catalysts for dibenzothiophene desulfurization," *Catalysis Today*, vol. 127, n° 1-4, pp. 70-84, 2007.

[20] R. Huirache Acuña, B. Pawelec, C. Loricera, E. Rivera Muñoz, R. Nava, B. Torres & J. Fierro, "Comparison of the morphology and HDS activity of ternary Ni(Co)-Mo-W catalysts supported on Al-HMS and Al-SBA-16 substrates," *App. Cat. B: Env.*, vol. 125, pp. 473-485, 2012.

[21] R. Palcheva, A. Spojakina, L. Dimitrov & K. Jiratrova, "12-Tungstophosphoric heteropolyacid supported on modified SBA-15 as catalyst in HDS of thiophene," *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 122, n° 1-3, pp. 128-134, 2009.

[22] O. Y. Gutiérrez, F. Pérez, G. A. Fuentes, X. Bokhimi & T. Klimova, "Deep HDS over NiMo/Zr-SBA-15 catalysts with varying MoO₃ loading," *Catalysis Today*, vol. 130, n° 2-4, pp. 292-301, 2008.

[23] A. Sampieri, S. Pronier, S. Brunet, X. Carrier, C. Louis, J. Blanchard, K. Fajerweg & M. Breyse, "Formation of heteropolymolybdates during the preparation of Mo and NiMo HDS catalysts supported on SBA-15: Influence on the dispersion of the active phase and on the HDS activity," *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 130, n° 1-3, pp. 130-141, 2010.

[24] D. Gao, A. Duan, X. Zhang, Z. Zhao, H. E, J. Li & H. Wang, "Synthesis of NiMo catalysts supported on mesoporous Al-SBA-15 with different morphologies and their catalytic performance of DBT HDS," *Applied Catalysis B: Environmental*, vol. 162, pp. 269-284, 2015.

[25] D. Zhao, J. Feng, Q. Huo, N. Melosh, G. H. Fredrickson, B. F. Chmelka & G. D. Stucky, "Triblock Copolymer Syntheses of Mesoporous Silica with Periodic 50 to 300 Angstrom Pores," *Science*, vol. 279, n° 5350, pp. 548-552, 1998.

- [26] K. Flodström & V. Alfredsson, "Influence of the block length of triblock copolymers on the formation of mesoporous silica," *Microporous and Mesoporous Materials*, vol. 59, n° 2-3, pp. 167-176, 2003.
- [27] R. Huirache Acuña, B. Pawelec, E. Rivera Muñoz, R. Nava, J. Espino & J. Fierro, "Comparison of the morphology and HDS activity of ternary Co-Mo-W catalysts supported on P-modified SBA-15 and SBA-16 substrates," *App. Cat. B: Env.*, vol. 92, n° 1-2, pp. 168-184, 2009.
- [28] G. Berhault, M. Perez de la Rosa, A. Metha, M. J. Yácaman & R. R. Chianelli, "The single-layered morphology of supported MoS₂-based catalysts—The role of the cobalt promoter and its effects in the hydrodesulfurization of dibenzothiophene," *Applied Catalysis A: General*, vol. 345, n° 1, pp. 80-88, 2008.
- [29] J. Chen, H. Yang & Z. Ring, "HDS kinetics study of dibenzothiophenic compounds in LCO," *Catalysis Today*, vol. 98, n° 1-2, pp. 227-233, 2004.
- [30] T. Zepeda, B. Pawelec, J. Díaz de León, J. De los Reyes & A. Olivas, "Effect of gallium loading on the hydrodesulfurization activity of unsupported Ga₂S₃/WS₂ catalysts," *Applied Catalysis B: Environmental*, Vols. 1 de 2111-112, pp. 10-19, 2012.
- [31] S. Y. Chen, T. T. Chen, J. J. Lee & S. Cheng, "Tuning pore diameter of platelet SBA-15 materials with short mesochannels for enzyme adsorption," *Journal of Materials Chemistry*, vol. 21, n° 15, p. 5693, 2011.
- [32] R. Huirache Acuña, R. Nava, C. Peza Iedesma, J. Lara Romero, G. Alonso Núñez, B. Pawelec & E. M. Rivera Muñoz, "SBA-15 Mesoporous Silica as Catalytic Support for Hydrodesulfurization Catalysts—Review," *Materials*, vol. 6, pp. 4139-4167, 2013.
- [33] E. I. Ross Medgaarden & I. E. Wachs, "Structural Determination of Bulk and Surface Tungsten Oxides with UV-vis Diffuse Reflectance Spectroscopy and Raman Spectroscopy," *The Journal of Physical Chemistry*, vol. 111, pp. 15089-15099, 2007.
- [34] D. G. Barton, M. Shtein, R. D. Wilson, S. L. Soled & E. Iglesia, "Structure and Electronic Properties of Solid Acids Based on Tungsten Oxide Nanostructures," *The Journal of Physical Chemistry*, vol. 103, n° 4, pp. 630-340, 1999.
- [35] C. Williams, J. Ekerdt, J. Jehng, F. Hardcastle, A. Turek & I. Wachs, "A Raman and ultraviolet diffuse reflectance spectroscopic investigation of silica-supported molybdenum oxide," *Journal of Physical Chemistry*, vol. 95, pp. 8781-8791, 1991.
- [36] F. D. Hardcastle & I. E. Wachs, "Determination of molybdenum-oxygen bond distances and bond orders by Raman spectroscopy," *Journal of Raman Spectroscopy*, vol. 21, n° 10, pp. 683-691, 1990.
- [37] H. Hu, I. E. Wachs & S. R. Bare, "Surface Structures of Supported Molybdenum Oxide Catalysts: Characterization by Raman and Mo L₃-Edge XANES," *The Journal of Physical Chemistry*, vol. 99, n° 27, pp. 10897-10910, 1995.
- [38] G. Busca, "Differentiation of mono oxo and polyoxo and of monomeric and polymeric vanadate, molybdate and tungstate species in metal oxide catalysts by IR and Raman spectroscopy," *Journal of Raman Spectroscopy*, vol. 33, n° 5, pp. 348-358, 2002.
- [39] F. D. Hardcastle & I. E. Wachs, "Determination of the Molecular Structures of Tungstates by Raman Spectroscopy," *Journal of Raman Spectroscopy*, vol. 26, pp. 397-405, 1995.
- [40] F. R. Brown & L. E. Makovsky, "Raman Spectra of a Cobalt Oxide-Molybdenum Oxide Supported Catalyst," *Applied Spectroscopy*, vol. 31, n° 1, pp. 44-46, 1977.
- [41] R. Weber, "Effect of Local Structure on the UV-Visible Absorption Edges of Molybdenum Oxide Clusters and Supported Molybdenum Oxides," *Journal of Catalysis*, vol. 151, n° 2, pp. 470-474, 1995.
- [42] H. Jeziorowski & H. Knoezinger, "Raman and ultraviolet spectroscopic characterization of molybdena on alumina catalysts," *The Journal of Physical Chemistry*, vol. 83, n° 9, pp. 1166-1173, 1979.
- [43] H. Jeziorowski, H. Knoezinger, P. Grange & P. Gajardo, "Raman spectra of cobalt molybdenum oxide supported on silica," *The Journal of Physical Chemistry*, vol. 84, n° 14, pp. 1825-1829, 1980.
- [44] D. Masure, P. Chanquin, C. Louis, M. Che & M. Fournier, "Polyoxometallates as models for oxide catalysts: Part II. Theoretical semi-empirical approach to the influence of the inner and outer Mo coordination spheres on the electronic levels of polyoxomolybdates," *Journal of Catalysis*, vol. 119, n° 2, pp. 415-425, 1989.
- [45] R. Schoonheydt, "UV-VIS-NIR spectroscopy and microscopy of heterogeneous catalysts," *Chemical Society Reviews*, vol. 39, pp. 5051-5066, 2010.
- [46] J. P. Thielemann, T. Ressler, A. Walker, G. Tzolova Müller & C. Hess, "Structure of molybdenum oxide supported on silica SBA-15 studied by Raman, UV-Vis and X-ray absorption spectroscopy," *Applied Catalysis A: General*, vol. 399, n° 1-2, pp. 28-34, 2011.
- [47] J. D. Han & I. W. Seong, "UV/VIS diffuse reflectance spectroscopic (DRS) study of cobalt-containing Y zeolites dehydrated at elevated temperatures," *Korean Journal of Chemical Engineering*, vol. 8, p. 235, 1991.
- [48] J. Herrera & D. Resaco, "Loss of single-walled carbon nanotubes selectivity by disruption of the Co-Mo interaction in the catalyst," *Journal of Catalysis*, vol. 221, n° 2, pp. 354-364, 2004.

La presente edición del octavo número de
Perspectivas de la Ciencia y la Tecnología
fue maquetada en el Despacho de Publicaciones
de la Facultad de Ingeniería
de la Universidad Autónoma de Querétaro
por Gabriel Jesús Tovar González y
Cristian Emanuel Tovar Navarro.
El cuidado de la edición estuvo a cargo de
Soid Lazlo Ruiz y Daniela Pérez López.
Se publicó en enero de 2022
en Santiago de Querétaro, Qro., México.

